



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة باجي مختار - عنابة

Université Badji Mokhtar –Annaba-

Faculté des Sciences
Département de Biologie

THESE

Présentée en Vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : Biologie Végétale

Intitulée

Evolution des sols des principaux lacs du Parc National d'El Kala sous l'influence de la qualité des eaux

Présentée par : BOUMARAF Warda

Membres de jury :

| | | |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| BENSLAMA Mohamed (Pr.) | Président | Université Badji Mokhtar-Annaba |
| DJAMAI Rachid (Pr.) | Directeur de thèse | Université Badji Mokhtar-Annaba |
| LAIFA Aziz (Pr.) | Examinateur | Université Badji Mokhtar-Annaba |
| HOUHAMDI Moussa (Pr.) | Examinateur | Université 08 Mai 1945- Guelma |
| ALAYAT Hacène (Pr.) | Examinateur | Université Chadli Bendjedid El-Tarf |
| BENMEZIANE Farida (Dr.) | Examinateuse | Université Chadli Bendjedid El-Tarf |

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

*C'est à mon encadreur, Monsieur **DJAMAI Rachid**, que je dois respect et gratitude pour m'avoir guidé afin de mener à bien cette étude. Sa disponibilité durant toutes les étapes de ce travail, ses remarques pertinentes et ses suggestions ont sans cesse permis l'amélioration de la qualité de ce document.*

*Je tiens à remercier Monsieur **BENSLAMA Mohamed**, Professeur à l'Université d'Annaba, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de thèse ; je le remercie infiniment pour sa disponibilité et sa considération.*

*Je suis très honorée que Monsieur **LAIFA Aziz**, Professeur à l'Université d'Annaba, ait voulu accepter de faire partie du jury, je lui exprime mes très sincères remerciements pour son aide et son orientation.*

*Ma profonde gratitude envers Monsieur **HOUHAMDI Moussa**, Professeur à l'Université de Guelma, qui a accepté de participer au jury, je le remercie pour m'avoir guidé, encouragé et conseillé.*

*Je remercie Monsieur **ALAYAT Hacène**, Professeur à l'Université d'El Tarf, qui a accepté d'examiner mes résultats et de faire partie de cet honorable jury*

*J'adresse mes vifs remerciements à Madame **BENMEZIANE Farida**, Docteur à l'Université d'El-Tarf, qui a bien voulu accepter de valoriser et de juger ce travail.*

*Je voudrais remercier également Monsieur **SAMAR Mohamed Faouzi**, Docteur à l'Université d'El-Tarf, pour son aide dans les traitements statistiques.*

*J'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à mon compagnon de terrain et mon époux qui m'encourage tout le temps pour aller au devant. A mes enfants «**Aymen & Yasmine**» à qui je dédie ma thèse.*

Enfin merci de tout mon cœur à mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenue, encouragée et surtout supportée au cours de ces années de doctorat.

Résumé

Evolution des sols des principaux lacs du Parc National d'El Kala sous l'influence de la qualité des eaux

Les zones humides du Parc National d'El Kala constituent des milieux très particuliers. Ces zones humides de faible extension connaissent souvent une dégradation générale, liée en particulier à la détérioration de ces ressources notamment l'eau.

L'objectif de ce travail est d'étudier la composition géochimique des eaux et des sols de deux plans d'eau (Oubeïra et Tonga) prélevées sur différents sites et durant deux périodes l'une durant la fin de la période humide (mai 2016) et l'autre durant la fin de la période sèche (septembre 2016); et de déterminer l'influence de la qualité des eaux sur l'évolution de ces sols.

L'utilisation de diagramme de Piper a permis de définir les ions dominants responsables des faciès chimiques des eaux. L'analyse en composantes principales (ACP), comme outil d'aide à l'interprétation, a permis de connaître les principaux facteurs qui représentent les différents processus intervenant dans la composition chimique des eaux et des sols.

L'étude pédologique fait apparaître la présence d'une texture limono-sableuse à sableuse, forte à assez forte porosité, pH eau neutre à légèrement alcalin, riches en matière organique et un complexe adsorbant moyennement saturé en bases échangeables qui sont dominées par le calcium.

L'étude hydrochimique des zones étudiées montrent qu'elles sont des eaux neutre à légèrement alcalin, non salées. Les eaux sont moyennement chargées en sels solubles dans le lac Tonga et faiblement minéralisé pour lac Oubeïra, avec l'existence de deux faciès chimiques important l'un chloruré-calcique et magnésien et l'autre chloruré-sodique. De plus, nos résultats montrent qu'il existe une pollution très importante par l'ammonium pour les deux sites d'étude.

L'évolution et la différenciation des sols est sous l'influence des mouvements de la nappe ou du plan d'eau du lac Oubeïra et Tonga

Les résultats obtenus ont montré que ces zones sont dégradées suite à l'action anthropique sans négliger les effets climatique, qui influent directement sur l'eau et le sol. A cet effet, la protection de ces écosystèmes sensibles est une nécessité pour sa préservation et sa durabilité.

Mots clés : Oubeïra, Tonga, géochimie, eau, sol, qualité, évolution.

Abstract

Soil's Evolution of the main lakes in El Kala National Park, under the influence of water quality.

The humid zones of El Kala National Park constitute very particular environments. These shallow zones often suffer from general degradation, particularly due to the deterioration of its resources, mainly water.

The main objective of this work is to study the geochemical composition of both water and soil for two different plans of water (Oubeïra and Tonga), which are taken from different sites and during two periods, one wet (May 2016) and the other is dry (September 2016), to determine the influence of water quality on the evolution of its soils.

The use of Piper diagram has made it possible to define the dominant ions responsible for the chemical facies of water. Principal Component Analysis (PCA), as a tool for interpretation, has revealed the main factors that represent the different processes involved in the chemical composition of water and soil.

The soil study reveals the presence of a sandy-loamy texture with a sandy, high porosity, neutral PH water slightly alkaline, rich of organic material and a medium saturated adsorbent complex in exchangeable bases that are dominated by calcium.

The hydro-chemical study of the studied zones ascends that they are neutral water slightly alkaline and unsalted. These waters are moderately charged with soluble salts in Tonga Lake and weakly mineralized for Oubeïra Lake, with the existence of two important chemical facies, one chlorinated-calcic and magnesium and the other is sodium chloride. In addition, our results also show that there is a very high level of ammonium pollution at both study sites.

The evolution and differentiation of soils is influenced by movements of the aquifer or water body of Lake Oubeïra and Tonga

The obtained results showed that these areas are degraded as a result of human activity without neglecting the climatic effects, which can affect water and soil directly. To this end, the protection of these sensitive ecosystems is a necessity for its preservation and sustainability.

Keywords: Oubeïra, Tonga, geochemistry, water, soil, quality, evolution

ملخص

تطور التربة لاهم بحيرات الحظيره الوطنيه للقاله تحت تاثير نوعيه المياه

المناطق الرطبة في الحظيره الوطنيه للقاله تشكل أوساطا خاصة جدا. كما تلعب دورا هاما

ايكولوجيا وهيدرولوجيا بالإضافة إلى الدور الاقتصادي على الصعيد المحلي . هاته المناطق الرطبة
المحدودة المساحة غالبا ما تعرف تدهورا شاملا . لا سيما الجانب المائي فيها.

الهدف من هذا العمل هو دراسه التركيبة الجيوكيميائية للتربة و الماء للبحيرتين الابيره و تونغا من
مناطق مختلفة موزعة على موسمين رطب و جاف و دراسه تاثيرنوعية المياه على تطور التربة.

سمحت دراسة مختلف النتائج المتحصلة بتحديد الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه والتربة، و ساعد في
إبراز الايونات المسئولة في التصنيف الكميائي و المصدر (Piper) البرنامج التبياني على تشخيص
العناصر المؤثرة (ACP) للمياه و التربة كما ساعد برنامج التحليل الرئيسي في التركيبة الكيميائية للمياه
و التربة.

الدراسة البيدولوجية بيّنت ان الملمس من الرمل ، المسامية عالية ، حموضة معتدلة الى قلوية، غنية بالمادة
العضوية و مركب مدمج مشبع بشكل معتدل في قواعد قابلة للتبديل والتي يهيمن عليها الكالسيوم. .

الدراسة الهيدروكيميائية للمنطقة المدرسة بيّنت ان المياه معتدلة الى قلوية، غير مالحة.المياه معتدلة من
حيث الاملاح المذابة بالنسبة لبحيرة تونغا و اقل تمعدن بالنسبة لبحيرة اوبيرة مع وجود سحتين كيميائيتين
كلوريدي كالسيوم و اخر كلوريدي صودي.بالاضافة النتائج تبين نسبة تلوث عالية بالامونيوم.

يتاثر تطور التربة وتمايزها بحركات طبقه المياه الجوفية أو الهيئة المائية في بحيرة اوبيرة وتونغا
ان هذه المناطق الرطبة تشهد تدهورا، بل مهددة بالزوال بسبب تدخل الإنسان والتأثيرات المناخية التي
تؤثر مباشرة على المياه، التربة، النبات والحيوانات. أذن من الضروري حماية هاته البيئة من خطر
التلوث لضمان إستمراريتها.

الكلمات المفتاحية : الابيره، تونغا ، المياه ، التربة ، الجيوكيماء ، النوعية ، التطور.

SOMMAIRE

- **Résumés**
- **Liste des Tableaux**
- **Liste des Figures**

Introduction01

Chapitre I : Cadre général du Parc National d'El Kala

| | |
|---|----|
| 1. Description générale et situation géographique | 05 |
| 2. Géologie et géomorphologie..... | 05 |
| 2.1. Formations secondaires..... | 05 |
| 2.2. Formations tertiaires..... | 07 |
| 2.3. Formations quaternaires..... | 07 |
| 3. Topographie..... | 07 |
| 4. Les sols..... | 08 |
| 4.1. Définition | 08 |
| 4.2. Les différentes fonctions du sol..... | 09 |
| 4.3. La couverture pédologique du PNEK..... | 10 |
| 4.3.1. Les sols dunaires..... | 10 |
| 4.3.2. Les sols inter-collinaires..... | 11 |
| 4.3.3. Les sols des milieux forestiers..... | 11 |
| 5. Hydrographie | 11 |
| 6. Description des différents habitats du Parc National d'El-Kala..... | 14 |
| 6.1. Les tourbières..... | 14 |
| 6.2. La cocciféraie..... | 14 |
| 6.3. Les ripisylves..... | 14 |
| 6.4. Les milieux rocheux et plages..... | 15 |
| 6.5. Le milieu marin..... | 15 |
| 6.6. Les zones humides..... | 15 |
| 7. Etude climatique | 16 |
| 7.1. Températures | 16 |
| 7.2. Pluviométrie..... | 16 |
| 7.3. Hygrométrie..... | 17 |
| 7.4. Vents..... | 17 |
| 7.5. Synthèse des données climatiques de la région d'étude..... | 18 |
| 7.5.1. Diagramme pluvio-thermique de GausSEN..... | 18 |
| 7.5.2. Climagramme d'Emberger..... | 19 |
| 8. Biodiversité | 20 |
| 8.1. La faune..... | 21 |
| 8.2. La flore..... | 21 |

Chapitre II : Matériel et méthodes

| | |
|--|-----------|
| 1. Sites d'étude | 23 |
| 1.1. Le lac Oubeïra..... | 23 |
| 1.1.1. Caractéristiques du bassin versant..... | 23 |
| 1.1.2. Paramètres de forme..... | 23 |
| 1.1.3. Le réseau hydrographique..... | 24 |
| 1.1.4. Caractéristiques morphométriques du lac Oubeïra..... | 25 |
| 1.1.4.1. Localisation..... | 25 |
| 1.1.4.2. Dimensions..... | 25 |
| 1.1.4.3. Bathymétrie..... | 26 |
| 1.1.4.4. Volume | 26 |
| 1.1.5. Les menaces sur l'eau..... | 26 |
| 1.1.5.1. Pompage de l'eau..... | 26 |
| 1.1.5.2. Pollution de l'eau..... | 26 |
| 1.2. Le lac Tonga | 27 |
| 1.2.1. Caractéristiques du bassin versant..... | 27 |
| 1.2.2. Paramètres de forme | 27 |
| 1.2.3. Réseau hydrographique..... | 27 |
| 1.2.4. Caractéristiques morphométriques du lac Tonga..... | 29 |
| 1.2.4.1. Localisation..... | 29 |
| 1.2.4.2. Dimensions..... | 29 |
| 1.2.4.3. Bathymétrie..... | 29 |
| 1.2.4.4. Volume..... | 29 |
| 1.2.5. Les menaces sur l'eau..... | 30 |
| 1.2.5.1. Drainage et irrigation | 30 |
| 1.2.5.2. Pollution de l'eau | 30 |
| 2. Objectif de l'étude | 30 |
| 3. Echantillonnage | 31 |
| 4. Protocole du prélèvement des échantillons..... | 31 |
| 4.1. Sol | 31 |
| 4.2. Eau | 31 |
| 5. Méthodes d'analyses au laboratoire..... | 35 |
| 5.1. Analyse des paramètres physico-chimiques des sols..... | 35 |
| 5.2. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux..... | 36 |
| 6. Signification des faciès chimiques | 37 |
| 7. Analyse en composantes principales | 37 |

Chapitre III : Résultats et discussion

Partie 1 : Etude pédologique

| | |
|--|-----------|
| 1. Le lac Oubeïra..... | 38 |
| 1.1. Caractéristiques physiques des sols du lac Oubeïra..... | 38 |
| 1.1.1. La densité apparente (Da)..... | 38 |
| 1.1.2. La densité réelle (Dr) | 38 |
| 1.1.3. La porosité (P%)..... | 39 |
| 1.1.4. La granulométrie..... | 40 |
| 1.2. Caractéristiques physico- chimiques des sols du lac Oubeïra..... | 42 |
| 1.2.1. Le pH..... | 42 |
| 1.2.1.1. Le pH eau..... | 42 |
| 1.2.1.2. Le pH KCl..... | 43 |
| 1.2.2. La conductivité électrique (CE)..... | 44 |
| 1.2.3. Le carbone organique (C%)..... | 45 |
| 1.2.4. La matière organique (MO%)..... | 45 |
| 1.2.5. Les bases échangeables..... | 47 |
| 1.2.5.1. Calcium (Ca²⁺)..... | 47 |
| 1.2.5.2. Magnésium (Mg²⁺)..... | 47 |
| 1.2.5.3. Sodium (Na⁺)..... | 48 |
| 1.2.5.4. Potassium (K⁺)..... | 48 |
| 1.2.5.5. Ammonium (NH₄⁺)..... | 48 |
| 1.3. Etude statistique des sols du lac Oubeïra | 50 |
| 1.3.1. Analyse en composantes principales (ACP)..... | 50 |
| 1.3.2. Etude des variables..... | 50 |
| 1.3.3. Représentation graphique de l'ACP des variables..... | 51 |
| 2. Le lac Tonga..... | 53 |
| 2.1. Caractéristiques physiques des sols du lac Tonga..... | 53 |
| 2.1.1. La densité apparente (Da)..... | 53 |
| 2.1.2. La densité réelle (Dr)..... | 53 |
| 2.1.3. La porosité (P%)..... | 54 |
| 2.1.4. La granulométrie..... | 54 |
| 2.2. Caractéristiques physico-chimiques des sols du lac Tonga..... | 56 |
| 2.2.1. Le pH..... | 56 |
| 2.2.1.1. Le pH eau..... | 56 |
| 2.2.1.2. Le pH KCl..... | 56 |
| 2.2.2. La conductivité électrique (CE)..... | 58 |
| 2.2.3. Le carbone organique (C%) | 58 |
| 2.2.4. La matière organique (MO%)..... | 59 |

| | |
|--|----|
| 2.2.5. Les bases échangeables..... | 60 |
| 2.2.5.1. Calcium (Ca^{2+})..... | 60 |
| 2.2.5.2. Magnésium (Mg^{2+})..... | 61 |
| 2.2.5.3. Sodium (Na^+)..... | 61 |
| 2.2.5.4. Potassium (K^+)..... | 61 |
| 2.2.5.5. Ammonium (NH_4^+)..... | 61 |
| 2.3. Etude statistique des sols du lac Tonga | 63 |
| 2.3.1. Analyse en composantes principales (ACP)..... | 63 |
| 2.3.2. Etude des variables..... | 63 |
| 2.3.3. Représentation graphique de l'ACP des variables..... | 64 |
| 3. Discussion | 66 |
| Conclusion | 69 |

Partie 2 : Etude hydrochimique

| | |
|---|----|
| 1. Caractérisation physico-chimique des eaux du lac Oubeïra..... | 70 |
| 1.1. Paramètres physiques et physico-chimiques | 70 |
| 1.1.1. Températures (T °C)..... | 70 |
| 1.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)..... | 71 |
| 1.1.3. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)..... | 71 |
| 1.1.4. Conductivité électrique (CE)..... | 73 |
| 1.2. Paramètres chimiques | 74 |
| 1.2.1. Les cations..... | 74 |
| 1.2.1.1. Calcium (Ca^{2+})..... | 74 |
| 1.2.1.2. Magnésium (Mg^{2+})..... | 75 |
| 1.2.1.3. Sodium (Na^+)..... | 76 |
| 1.2.1.4. Potassium (K^+)..... | 77 |
| 1.2.1.5. Ammonium (NH_4^+)..... | 77 |
| 1.2.2. Les anions..... | 78 |
| 1.2.2.1. Chlorures (Cl^-)..... | 79 |
| 1.2.2.2. Bicarbonates (HCO_3^-)..... | 79 |
| 1.2.2.3. Sulfates (SO_4^{2-})..... | 80 |
| 1.3. Détermination des principaux faciès chimiques des eaux du lac Oubeïra | 81 |
| 1.4. Aptitude des eaux du lac Oubeïra à l'irrigation | 83 |
| 1.5. Etude statistique des sols du lac Oubeïra | 85 |
| 1.5.1. Analyse en composantes principales (ACP)..... | 85 |
| 1.5.2. Etude des variables..... | 85 |
| 1.5.3. Représentation graphique de l'ACP des variables..... | 86 |

| | |
|--|------------|
| 2. Caractérisation physico-chimique des eaux du lac Tonga..... | 89 |
| 2.1. Paramètres physiques et physico-chimiques | 89 |
| 2.1.1. Températures (T °C)..... | 89 |
| 2.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)..... | 90 |
| 2.1.3. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)..... | 90 |
| 2.1.4. Conductivité électrique (CE)..... | 91 |
| 2.2. Paramètres chimiques..... | 92 |
| 2.2.1. Les cations..... | 92 |
| 2.2.1.1. Calcium (Ca²⁺) | 92 |
| 2.2.1.2. Magnésium (Mg²⁺)..... | 93 |
| 2.2.1.3. Sodium (Na⁺)..... | 93 |
| 2.2.1.4. Potassium (K⁺)..... | 94 |
| 2.2.1.5. Ammonium (NH₄⁺)..... | 95 |
| 2.2.2. Les anions..... | 96 |
| 2.2.2.1. Chlorures (Cl⁻)..... | 96 |
| 2.2.2.2. Bicarbonates (HCO₃⁻)..... | 97 |
| 2.2.2.3. Sulfates (SO₄²⁻)..... | 97 |
| 2.3. Détermination des principaux faciès chimiques des eaux du lac Tonga..... | 98 |
| 2.4. Aptitude des eaux du lac Tonga à l'irrigation..... | 100 |
| 2.5. Etude statistique des sols du lac Tonga | 102 |
| 2.5.1. Analyse en composantes principales (ACP)..... | 102 |
| 2.5.2. Etude des variables..... | 102 |
| 2.5.3. Représentation graphique de l'ACP des variables..... | 103 |
| 3 .Rapports caractéristiques..... | 105 |
| 3.1. Relation Na⁺- Cl⁻..... | 105 |
| 3.2. Relation Ca²⁺- Cl⁻ | 105 |
| 3.3. Relation Mg²⁺- Cl⁻..... | 106 |
| 4. Discussion | 108 |
| Conclusion..... | 112 |
| 5. Influence de la qualité des eaux sur les sols..... | 113 |
| Conclusion générale..... | 115 |

Références bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

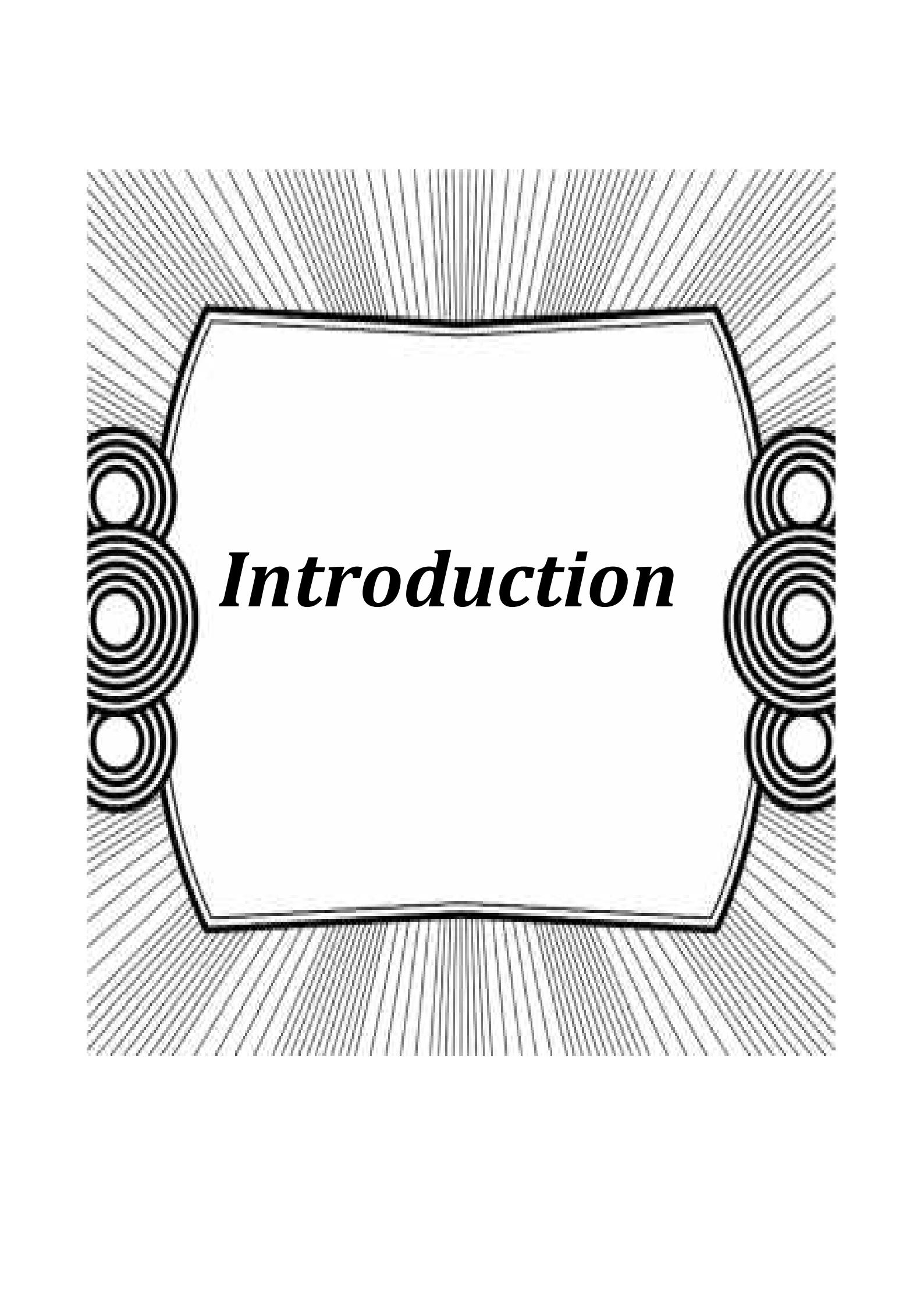
| Tableaux | Titres | Pages |
|-----------------|---|--------------|
| 1 | Principaux cours d'eau du Parc National d'El-Kala. | 12 |
| 2 | Moyennes des températures mensuelles de la région d'El Kala (1995-2012) | 16 |
| 3 | Moyennes des précipitations mensuelles de la région d'El Kala (1995–2012) | 17 |
| 4 | Moyennes hygrométriques mensuelles de la région d'El Kala (1995–2012) | 17 |
| 5 | Moyennes mensuelles la vitesse des vents de la région d'El-Kala (1995-2012) | 18 |
| 6 | Le patrimoine faunistique du PNEK | 21 |
| 7 | Caractéristiques des stations de prélèvement | 32 |
| 8 | Echelle d'interprétation du pourcentage de la porosité des sols | 39 |
| 9 | Composition granulométrique des sols du lac Oubeïra. | 40 |
| 10 | Variations des pH des sols du lac Oubeïra. | 42 |
| 11 | Echelle d'interprétation du taux de la matière organique | 46 |
| 12 | Résultats des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Oubeïra. | 47 |
| 13 | Variance des cinq premiers axes (Oubeïra) | 50 |
| 14 | Corrélation des variables aux principaux axes (Oubeïra) | 51 |
| 15 | Composition granulométrique des sols du lac Tonga | 55 |
| 16 | Ecart entre le pH _{Heau} et le pH _{KCl} des sols du lac Tonga | 58 |
| 17 | Résultats des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Tonga | 60 |
| 18 | Variance des cinq premiers axes (Tonga) | 63 |
| 19 | Corrélation des variables aux principaux axes (Tonga) | 64 |
| 20 | Variations des paramètres physiques des eaux du lac Oubeïra | 70 |
| 21 | Teneurs en cations (mg/l) des eaux du lac Oubeïra | 74 |
| 22 | Teneurs en anions (mg/l) des eaux du lac Oubeïra | 78 |
| 23 | Variance des cinq premiers axes (Oubeïra) | 85 |
| 24 | Corrélation des variables aux principaux axes (Oubeïra) | 86 |
| 25 | Variations des paramètres physiques des eaux du lac Tonga | 89 |
| 26 | Teneurs en cations (mg/l) des eaux du lac Tonga | 92 |
| 27 | Teneurs en anions (mg/l) des eaux du lac Tonga. | 96 |
| 28 | Variance des cinq premiers axes (Tonga) | 102 |
| 29 | Corrélation des variables aux principaux axes (Tonga) | 103 |

Liste des figures

| Figures | Titres | Pages |
|----------------|---|--------------|
| 1 | Localisation du Parc National d'El Kala | 06 |
| 2 | Carte topographique de la région du Parc National d'El Kala | 09 |
| 3 | Réseau hydrographique du Parc National d'El-Kala | 13 |
| 4 | Diagramme pluvio-thermique de la région d'El-Kala (1995-2012) | 19 |
| 5 | Etage bioclimatique de la région d'El-Kala selon le climagramme d'Emberger (1995-2012) | 20 |
| 6 | Bassin versant des lacs Oubeïra et Tonga | 24 |
| 7 | Réseau hydrographique du bassin versant du lac Oubeïra (1/50 000 ^e) | 25 |
| 8 | Réseau hydrographique du bassin versant du lac Tonga (1/50 000 ^e) | 28 |
| 9 | Direction d'écoulement des eaux des bassins versant des lacs Oubeïra et Tonga | 28 |
| 10 | Localisation des zones d'étude dans le PNEK | 33 |
| 11 | Localisation des points de prélèvements du lac Oubeïra | 34 |
| 12 | Localisation des points de prélèvements du lac Tonga | 34 |
| 13 | Variations de la densité apparente des sols du lac Oubeïra. | 38 |
| 14 | Variations de la densité réelle des sols du lac Oubeïra. | 39 |
| 15 | Variations de la porosité des sols du lac Oubeïra. | 40 |
| 16 | Composition granulométrique des sols du lac Oubeïra | 41 |
| 17 | Texture des sols du lac Oubeïra | 41 |
| 18 | Variations spatio-temporelles du pH _{Heau} des solutions de sols du lac Oubeïra. | 43 |
| 19 | Variations spatio-temporelles du pH _{KCl} des solutions de sols du lac Oubeïra. | 43 |
| 20 | Variations de la conductivité électrique dans les sols du lac Oubeïra | 44 |
| 21 | Evolution spatio-temporelle du carbone organique dans les sols du lac Oubera. | 45 |
| 22 | Evolution spatio-temporelle de la matière organique dans les sols du lac Oubeïra. | 46 |
| 23 | Evolution spatio-temporelle des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Oubeïra. | 49 |
| 24 | ACP des sols du lac Oubeïra selon le plan des dimensions (1X2) | 52 |
| 25 | Variations de la densité apparente des sols du lac Tonga. | 53 |
| 26 | Variations de la densité réelle des sols du lac Tonga. | 53 |
| 27 | Variations de la porosité totale des sols du lac Tonga. | 54 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 28 | Composition granulométrique des sols du lac Tonga. | 55 |
| 29 | Texture des sols du lac Tonga. | 56 |
| 30 | Variations spatio-temporelles du pH _{Heau} des solutions de sols du lac Tonga. | 57 |
| 31 | Variations spatio-temporelles du pH _{KCl} des solutions de sols du lac Tonga. | 57 |
| 32 | Variations de la conductivité électrique dans les sols du lac Tonga. | 58 |
| 33 | Evolution spatio-temporelle du carbone organique dans les sols du lac Tonga. | 59 |
| 34 | Evolution spatio-temporelle de la matière organique dans les sols du lac Tonga. | 59 |
| 35 | Evolution spatio-temporelle des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Tonga. | 62 |
| 36 | ACP des sols du lac Tonga selon le plan des dimensions (1X2) | 65 |
| 37 | Variations de la température des eaux du lac Oubeïra | 71 |
| 38 | Variations du pH des eaux du lac Oubeïra | 72 |
| 39 | Variations du Eh des eaux du lac Oubeïra | 72 |
| 40 | Variations de la conductivité électrique des eaux du lac Oubeïra | 73 |
| 41 | Variations des teneurs en calcium des eaux du lac Oubeïra | 75 |
| 42 | Variations des teneurs en magnésium des eaux du lac Oubeïra | 75 |
| 43 | Variations des teneurs en sodium des eaux du lac Oubeïra | 76 |
| 44 | Variations des teneurs en potassium des eaux du lac Oubeïra | 77 |
| 45 | Variations des teneurs en ammonium des eaux du lac Oubeïra | 78 |
| 46 | Variations des teneurs en chlorures des eaux du lac Oubeïra | 79 |
| 47 | Variations des teneurs en bicarbonates des eaux du lac Oubeïra | 80 |
| 48 | Variations des teneurs en sulfates des eaux du lac Oubeïra | 81 |
| 49 | Diagramme de Piper des eaux du lac Oubeïra (période humide) | 82 |
| 50 | Diagramme de Piper des eaux du lac Oubeïra (période sèche) | 82 |
| 51 | Classification des eaux du lac Oubeïra destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période humide) | 84 |
| 52 | Classification des eaux du lac Oubeïra destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période sèche) | 84 |
| 53 | ACP des eaux du lac Oubeïra selon le plan des dimensions (1X2) | 88 |
| 54 | Variations de la température des eaux du lac Tonga. | 89 |
| 55 | Variations du pH des eaux du lac Tonga. | 90 |
| 56 | Variations de Eh des eaux du lac Tonga. | 91 |
| 57 | Variations de la conductivité électrique des eaux du lac Tonga | 91 |
| 58 | Variations des teneurs en calcium des eaux du lac Tonga | 93 |
| 59 | Variations des teneurs en magnésium des eaux du lac Tonga | 94 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 60 | Variations des teneurs en sodium des eaux du lac Tonga | 94 |
| 61 | Variations des teneurs en potassium des eaux du lac Tonga | 95 |
| 62 | Variations des teneurs en ammonium des eaux du lac Tonga | 95 |
| 63 | Variations des teneurs en chlorures des eaux du lac Tonga | 96 |
| 64 | Variations des teneurs en bicarbonates des eaux du lac Tonga | 97 |
| 65 | Variations des teneurs en sulfates des eaux du lac Tonga | 98 |
| 66 | Diagramme de Piper des eaux du lac Tonga (période humide) | 99 |
| 67 | Diagramme de Piper des eaux du lac Tonga (période sèche) | 99 |
| 68 | Classification des eaux du lac Tonga destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période humide) | 101 |
| 69 | Classification des eaux du lac Tonga destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période sèche) | 101 |
| 70 | ACP des eaux du lac Tonga selon le plan des dimensions (1X2) | 104 |
| 71 | Relations Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} avec Cl^- des eaux du lac Oubeïra | 106 |
| 72 | Relations Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} avec Cl^- des eaux du lac Tonga | 107 |



Introduction

Introduction

Les zones humides constituées le plus souvent par des marécages, lacs, oueds, estuaires, deltas, chotts, guelta, garât ou dayet ..., sont des écosystèmes qui contribuent à la conservation de la biodiversité de la planète, ils représentent les milieux les plus productifs au monde. Elles sont caractérisées par une forte productivité biologique qui est à l'origine d'une importante production agricole traditionnelle (pâturage, élevage, rizières, exploitation forestière, roseaux...), piscicole (pêches, piscicultures)... leur importance repose aussi sur leur rôle dans la régulation des ressources en eau, au niveau de la recharge de la nappe phréatique, et la protection contre les inondations. Leur fonctionnement hydrodynamique offre une très forte sensibilité au changement du milieu, ce qui fait des zones humides de bons indicateurs des changements climatiques (**Alibou, 2002**). De plus, leurs valeurs éducatives et culturelles sont considérables, elles sont aussi les milieux les plus menacés de la planète, ces écosystèmes sont très sensibles et leur dégradation est irréversible. De nombreuses espèces végétales et animales y sont inféodées, la déperdition de ces ressources peut être la conséquence de leur disparition dans ces milieux.

Les eaux de surface occupent la plus grande partie du globe terrestre. Environ 98% de ces eaux sont des eaux marines. Les 2% restant constituent les eaux continentales représentées par les rivières, les lacs, les étangs. A cause de leur utilisation multiple, ces eaux continentales sont d'une très grande importance pour les activités humaines (domestiques, loisirs, agricoles, halieutiques et industrielles). Les milieux aquatiques continentaux procurent une variété de biens et de services à l'homme, ce qui leur confère une valeur économique irremplaçable (**Gleick, 1993 ; Costanza et al., 1997**). L'eau est également un élément indispensable utilisé par l'irrigation agricole, la production d'énergie et l'industrie.

Les eaux de surface sont aujourd'hui sujettes à une affreuse agression qui est la pollution. En Afrique, la pollution des plans d'eau est d'actualité et le traitement des eaux usées n'est pas toujours une préoccupation (**Lamizana-Diallo et al., 2008**). Les rejets d'eaux usées domestiques et agricoles même industrielle n'en demeurent pas non plus négligeables. Cette pollution induit entre autres l'eutrophisation du système complet avec pour conséquences la mortalité des poissons et le développement de micro-organismes pathogènes néfastes pour l'environnement (**Scheren et al., 2004**).

La qualité des eaux d'un hydrosystème dépend de nombreux facteurs et processus environnementaux. Elle est définie plus particulièrement par les caractéristiques géomorphologiques (altitude, pente ...), pédologiques, géologiques (origine et nature des terrains) et anthropiques (degré d'urbanisation, activités industrielles, agricoles ...) du bassin versant. Celui ci constitue un espace délimité par une ligne de partage des eaux et possédant son propre réseau hydrographique. Les versants du bassin collectent les eaux d'origine atmosphérique et les concentrent vers les éléments constitutifs du réseau (**Amoros et Petts, 1993 in Barour, 2015**). Au cours de leur transfert à la surface du sol et/ou en profondeur (ruissellement, infiltration ...) puis de leur circulation dans l'hydrosystème, les eaux sont soumises à des processus physico-chimiques et biologiques qui conditionnent leur composition. Celle-ci définira ce qui est communément appelé la « qualité de l'eau » (**Thurman, 1985 ; Madigou, 2005**).

Le sol constitue une composante fondamentale dans l'étude des écosystèmes. Il présente le point de rencontre entre le monde minéral et le monde du vivant. Il constitue en fait, le siège d'interactions physico-chimiques dont les produits finaux sont les sels minéraux qui sont vitaux pour la biocénose. Le sol est plus ou moins développé suivant la nature de la rochemère, la topographie du site et les caractéristiques du climat, parmi ces derniers l'eau joue un rôle prédominant (**Duchaufour, 1977**).

Le sol est certainement la composante de l'environnement la plus mal connue alors qu'il constitue le support direct de la plupart des activités humaines. Ce n'est que récemment, et souvent à la suite de la mise en évidence de la pollution des sols par les activités industrielles ou agricoles (**Mc Bride, 1994 ; Saltiène et al., 2002 ; Chapman et al., 2003**), que l'on prend conscience de l'importance des fonctions du sol et de la nécessité de le sauvegarder. En effet le sol joue un rôle essentiel comme interface de l'environnement vis-à-vis des principales pollutions provoquées par l'homme (**Calvet, 2003**). Un sol est considéré pollué lorsque la dégradation de sa qualité par l'apport antrophique d'élément toxique peut porter atteinte à la santé humaine ou/et à l'environnement (**Promeyrat, 2001**). La présence d'un polluant dans le sol n'est pas en soit un danger (**Chaussod, 1996**). Le risque apparaît dès que ce polluant peut être mobilisé et agit sur l'environnement (faune, flore) ou sur l'homme (**Garrett, 2000 ; Sánchez-Martin et al., 2000 ; Lee et al., 2006**). Les outils actuellement utilisés reposent sur des propriétés physiques et chimiques du sol (**Viard-La Rocca, 2004**), alors que les paramètres biologiques intègrent l'ensemble de stress environnementaux (pollution chimique,

état physique du sol, variations climatiques, modifications biologiques ...) renseignant ainsi sur l'état global du sol.

Les sols des zones humides sont souvent assez saturés en eau. En conséquence, tout l'espace poral du sol disponible initialement pour l'air est remplacé par l'eau, et les échanges gazeux sont limités entre le sol et l'atmosphère. Ce sont principalement les échanges d'oxygène qui sont alors restreints, et un sol engorgé d'eau est donc un sol appauvri en oxygène, on parle alors de milieu anoxique. La présence d'eau dans le sol modifie les propriétés physiques de ce dernier. La structure se dégrade plus facilement et est moins cohérente (**Benslama, 2007**). La couverture pédologique de la région du PNEK se caractérise par une distribution des chaînes de sol en fonction de la topographie, de la végétation et de la roche-mère (**Benslama, 1993**).

En Algérie, la gestion de l'eau et les zones humides du Parc National d'El-Kala, constitue un enjeu de préservation. Ce qui impressionne le visiteur qui découvre la région d'El-Kala, c'est son apparente abondance en eau. Le spectacle de ses lacs et cours d'eau contraste fortement avec l'aridité qui distingue généralement l'Afrique du Nord. Le Parc National d'El-Kala est constitué d'une importante mosaïque hydrographique composée essentiellement de lacs, oueds et sources. Dans la partie extrême du Nord Est d'Algérie, ce Parc National s'étend sur une superficie de 78 000 Ha soit 26% de la surface de la wilaya d'El-Tarf. Ses écosystèmes très variés l'ont fait classer parmi les sites protégés mondialement. Ce complexe est à l'origine même de la diversité biologique et de la richesse faunistique et floristique du PNEK. Mais il est à déplorer l'inexistence d'études sur le volume de la ressource en eau, son exploitation, ainsi que la part de l'utilisation qui en est faite dans cette région. Celles qui existent, sont incomplètes ou inachevées (**Samraoui et de Belair, 1998 ; Mebarki, 2005**).

Le lacs Tonga et Oubeïra sont des écosystèmes aquatiques qui appartiennent à un ensemble biogéographique, exceptionnel par sa diversité biologique. Les sites étudiés sont des écosystèmes aquatiques répertoriés dans le registre très élaboré des zones humides. Les lacs du fait qu'ils constituent le réceptacle des eaux de pluie qui lessivent leurs bassins versants et des eaux usées des populations riveraines, ont suscité un intérêt particulier quant à la relation entre les niveaux d'eutrophisation et les diverses activités qui se développent tout autour. Ces lacs sont en effet, la principale ressource pour l'irrigation des cultures ; les terres agricoles sont irriguées avec de l'eau du réseau hydrographique. L'accroissement et l'extension des activités agricoles entraînent à terme une baisse des quantités d'eau qui vont vers le lacs. De

la même manière, la qualité des eaux est subordonnée au volume des fertilisants employés par les agriculteurs. La fertilisation est utilisée pour les arachides et les cultures maraîchères, qui sont parmi les principales spéculations agricoles de la région.

Des études ont été réalisées sur le complexe eau-sol des zones humides du PNEK, à savoir celles de Benslama (2007) et Bendjema (2014) qui ont expliqué la qualité hydrochimique des eaux de la région d'El-Kala, par le suivi de certains paramètres physico-chimiques appuyés par une étude pédologique.

Le principal objectif de ce travail est de contribuer d'une part, à la compréhension du chimisme des sols et la dégradation de la qualité des eaux de deux plans d'eau du Parc National d'El-Kala (Tonga et Oubeïra) qui constituent des milieux complexes où se déroulent de nombreuses réactions biogéochimiques et physico-chimiques, c'est une zone de contact entre le sol et les eaux de surface ; d'autre part, il est question de déterminer l'influence spatio-temporelle entre la qualité hydrochimique des eaux et la nature du sol des sites étudiés.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous suivrons au niveau du manuscrit la démarche suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques générales de la région d'étude du Parc National d'El-Kala (géologie, géomorphologie, topographie, pédologie, hydrographie, climatologie, biodiversité)
- Le deuxième chapitre est essentiellement réservé à la présentation des sites d'étude ainsi que la description du matériel et méthodes utilisés pour les analyses des eaux et sols échantillonnés et les différents outils de traitement des données.
- Le chapitre trois est consacré aux résultats obtenus et leur discussion. Dans la première partie, l'étude pédologique pour lac Oubeïra et lac Tonga. Dans la deuxième partie, présente une étude hydrochimique des eaux des deux lacs et son impact sur le sol.
- Enfin, une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre I.

Cadre général

du Parc

National d'El

Kala

Chapitre I : Cadre général du Parc National d'El Kala

1. Description générale et situation géographique

Le Parc National d'El-Kala (PNEK) est l'un des plus grands parcs nationaux d'Algérie et de Méditerranée occidentale. Il est situé à l'extrême Nord-Est algérien, il représente l'Est de la wilaya d'El-Taref, avec 6 des 24 communes sont entièrement incluses dans le PNEK et 2 autres en partie seulement (wilaya issue du découpage administratif de l'année 1985). La wilaya est frontalière avec la Tunisie sur 100 Km et possède une façade maritime de 90 Km (Fig.1). Cette réserve intégrale s'étend sur une superficie de 76 438 ha, soit 26 % de l'espace de la wilaya. Ses coordonnées géographiques vont de 36° 43' N à 36° 57' N et de 7° 43' E à 8° 37' E (**Loukkas, 2006**).

Le Parc National d'El-Kala est limité :

- Au Nord, par la mer Méditerranée.
- Au Sud, par les contreforts des monts de la Medjerda.
- A l'Est, par la frontière algéro-tunisienne.
- A l'Ouest, par l'extrémité de la plaine alluviale d'Annaba.

Cette situation présente un intérêt écologique remarquable pour trois raisons principales, sa grande diversité de milieux naturels, sa position originale en Méditerranée centrale (à la croisée des grands biomes tempérés, tropicaux, atlantiques et orientaux) et sa situation au sein d'un Maghreb isolé entre mer et désert (**Roche et Yavercovski, 1990**).

2. Géologie et géomorphologie

Selon **Joleaud (1936)**, le substratum géologique de la région présente essentiellement des terrains datant du Tertiaire et Quaternaire.

2. 1. Formations secondaires

Elles sont schisteuses plus ou moins argileuses de couleur bleue ardoise avec des passages calcaires et une microfaune d'âge Sénonien supérieur. Ces formations affleurent en plusieurs endroits surtout dans la forêt d'El-Ghorra (Menzel Beldi), au niveau du Cap Rosa, sur la rive Ouest du lac Tonga au lieu-dit (Daia Zitouna) et à El-Ayoune au lieu dit Oued Djenane (**Benyacoub et al., 1998**).

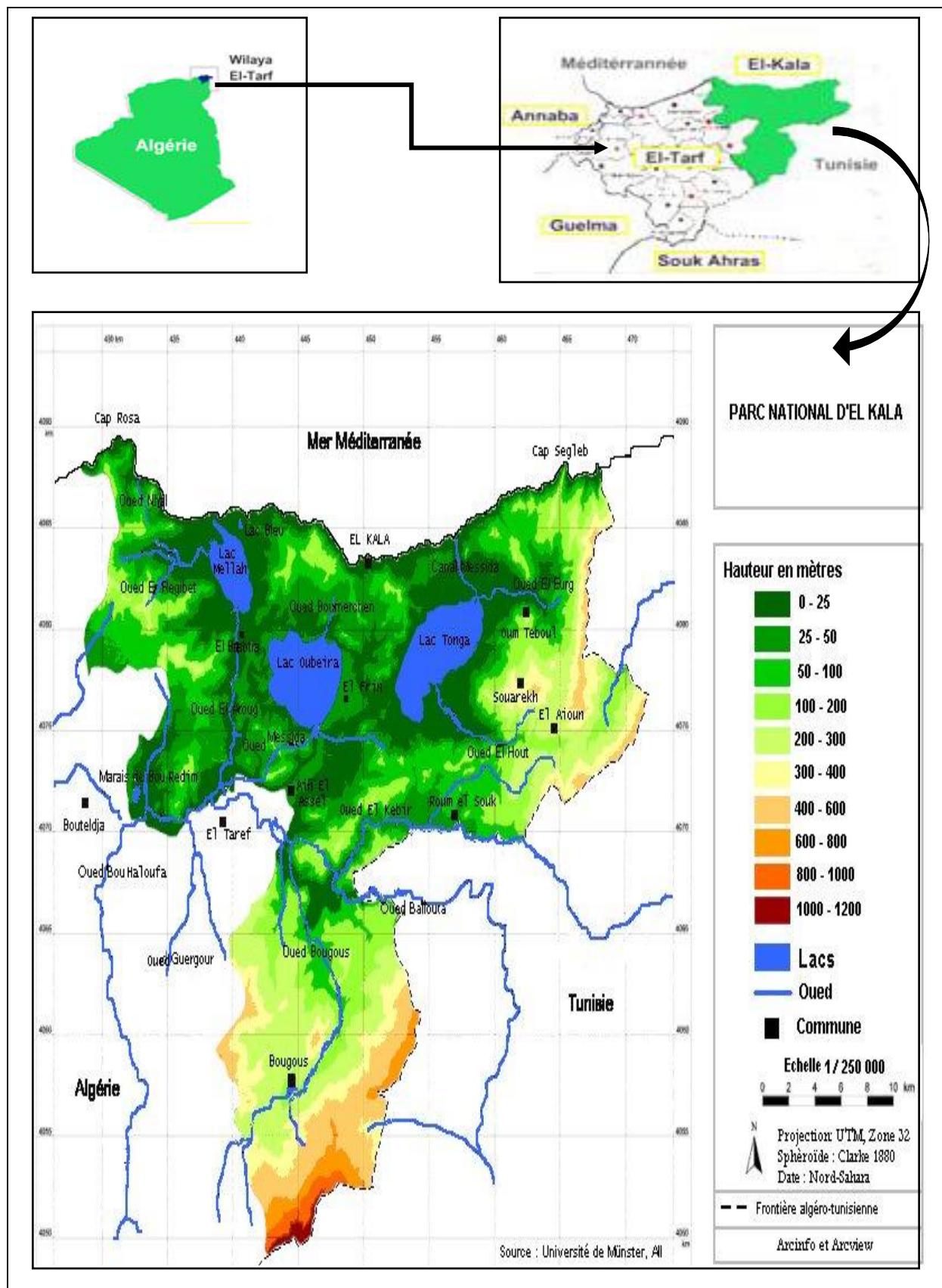


Figure 1 : Localisation du Parc National d'El Kala (in Hamouda, 2013)

2.2. Formations tertiaires

Elles sont surtout représentées par les éléments de l'Eocène moyen qui est caractérisé par les argiles de Numidie sur une épaisseur de 300 m environ. Ces argiles occupent les fonds de vallées, les bordures de plaines, par l'Eocène supérieur qui est caractérisé par les grès de Numidie qui se déposent sur les argiles sur 150 m d'épaisseur. Présents au niveau des monts d'El-Kala, ils sont généralement couverts de forêts de chêne-liège, et enfin par le Miocène qui est caractérisé par les sables, conglomérats, argiles rouges ou grises, localisés particulièrement dans la région Sud-Est (**Benyacoub et al., 1998**).

2.3. Formations quaternaires

Elles sont constituées pour la plupart de dépôts marins et fluviaux. Les limons, sables et galets sont des dépôts fluviatiles déposés par les oueds Kébir, Mellila et Bougous. Les dépôts marins éolisés sont des amas dunaires issus de l'érosion par la mer des falaises gréseuses, alors que les dépôts actuels sont des alluvions formant le fond des oueds (**Benyacoub et al., 1998**).

3. Topographie

Le relief du Parc National d'El-Kala se compose d'une série de dépressions, dont certaines sont occupées par des formations lacustres ou palustres, et des hautes collines aux formes variées. On y observe des dômes, des escarpements et des alignements de crêtes généralement couverts par une végétation dense (**de Belair, 1990**). Du nord au sud, on distingue:

- Un cordon dunaire littoral qui s'étend d'Ouest en Est sur une longueur de 40 km et se prolonge vers le Sud jusqu'au pied du Djebel Segleb. Il est formé essentiellement de sables quaternaires. En se dirigeant de la mer vers l'intérieur des terres, quatre degrés de formations dunaires peuvent être identifiés (**Joleaud, 1936**), la plage à sable blanc et dunes littorales dans la partie occidentale, les dunes sub-littorales à sable gris à l'Est et enfin les dunes intérieures à sable rougi par les dépôts d'oxyde de fer plus à l'Est. On reconstitue en fait, de la mer vers l'intérieur des terres, un gradient de degrés de fixation ou de fossilisation des dunes (Fig.2).

- Les dunes mortes sont les plus anciennes, donc les plus éloignées de la mer. Elles sont colonisées par une végétation dense (Chêne Kermès). Bien stabilisées même en cas de destruction du couvert végétal par le feu, elles sont remises en mouvement lorsque l'homme y intervient par l'exploitation immodérée du sable et la destruction de tout le chevelu racinaire

qui constitue son principal élément de cohésion (**Benyacoub, 1993**). Les principales dunes sont celles du Cap Rosa, Mezira, et la Messida.

- Les plaines sublittorales présentent un relief plat, ondulé marqué surtout par les dépressions lacustres et marécageuses (Lacs Tonga, Mellah, Oubeïra). L'altitude n'y dépasse guère 600 m.

- Les montagnes telliennes à ce niveau, s'élève une partie du versant Nord de la chaîne de la Medjerda dont l'altitude moyenne est de 1100 m. Le point culminant est le Djebel Ghorra à 1202 m. Les monts de la Medjerda, dont les lignes de crête sont approximativement orientées Ouest-Sud-Ouest et Est-Nord-Est, ont subi des phénomènes de torsion qui ont brutalement incurvé leur direction générale vers le Nord-Est. On observe des prolongements vers la mer de ce mouvement du relief en deux points particuliers, le Cap Rosa et le Cap Segleb (Fig.2). Par ailleurs, le relief de la région se caractérise par un pendage important. En effet, 9 % des pentes faibles, 11 % des pentes moyennes et 80 % de pentes fortes à très fortes, constituent un trait majeur de la physionomie d'un paysage que l'on qualifiera de montagneux (**Benyacoub et al., 1998**).

4. Les sols

4.1. Définition

Le sol est la partie supérieure de la croûte terrestre. Il est l'interface entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et les organismes vivants. Il est composé d'une fraction minérale (sable, limon et argile) et d'une fraction organique (tissus végétaux, résidus d'organismes) : la pédogenèse résulte de l'altération d'un substrat minéral par des phénomènes physiques, chimiques et biologiques. Au cours de cette transformation, le substrat minéral est colonisé par des organismes qui composent peu à peu la matière organique. Cette matière organique s'associera ainsi au minéral pour former entre autres des complexes organo-minéraux (**Quenea, 2004**).

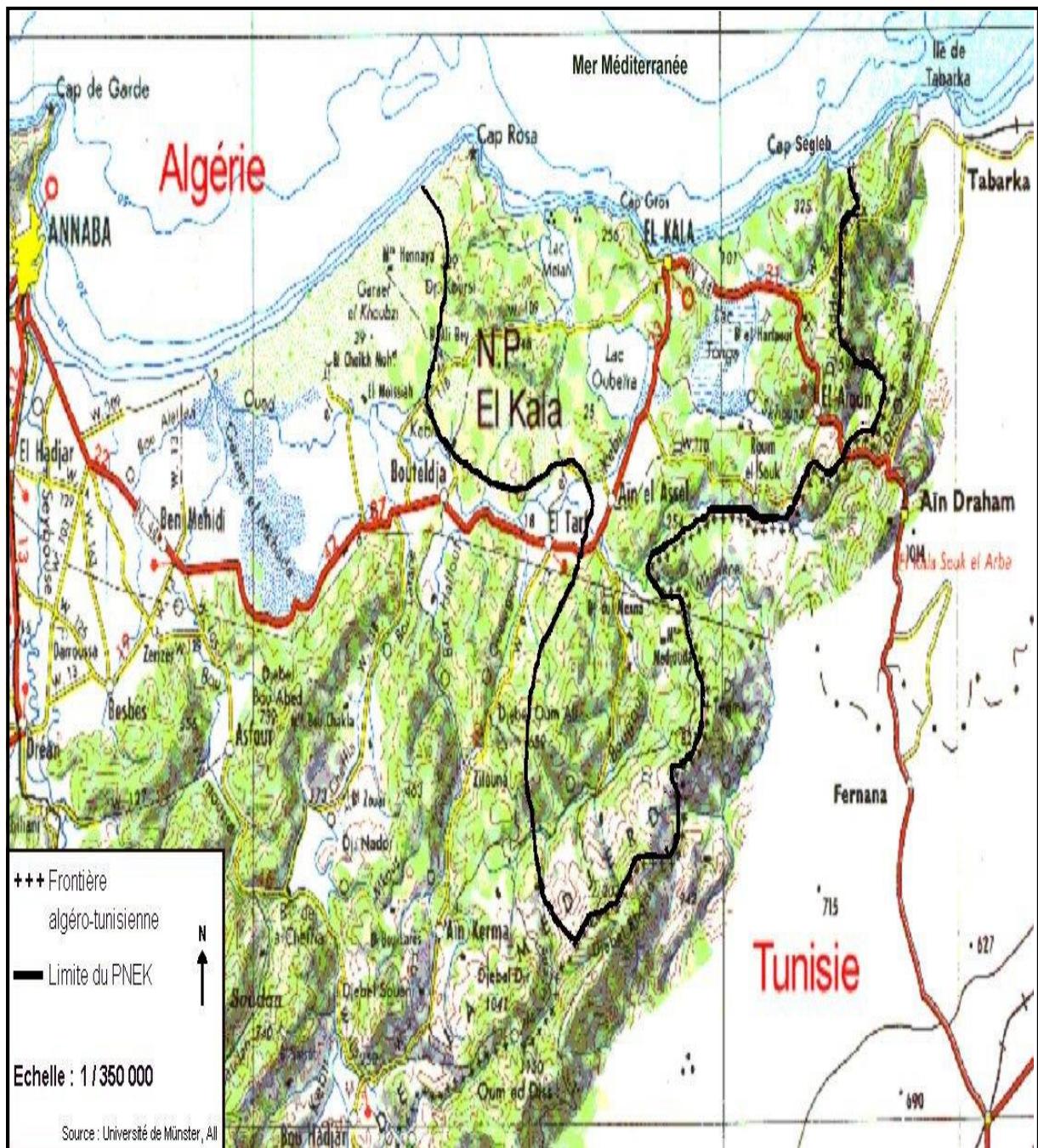


Figure 2 : Carte topographique de la région du Parc National d'El Kala (*in Hamouda, 2013*)

4.2. Les différentes fonctions du sol

Le sol a de nombreuses fonctions. Il est un milieu biologique dans/et sur lequel se développent des êtres vivants. Ce développement va dépendre de la qualité de ce sol ou fertilité (quantité de carbone, d'azote, capacité d'échange cationique, etc...). Il est aussi un acteur déterminant du cycle de l'eau (stockage et régulation) et de la qualité de cette eau

(source de pollution, capacité de rétention des polluants mais aussi biodégradation de ceux-ci) (**Quenea, 2004**).

D'après Gobat et *al.*, 2003, le sol peut être considéré comme :

- Un support pour les êtres vivants. Le sol est le milieu de vie des êtres vivants terrestres et par cette fonction, il assure le maintien de leur réserve génétique (notamment au niveau des microorganismes du sol),
- Un réservoir de matières organiques et minérales. Le sol est la ressource primordiale en éléments nutritifs des êtres vivants terrestres, Il faut aussi noter que les sols cultivés contiennent des stocks de matières organiques sensiblement plus faibles que ceux des sols sous forêts ou sous prairies, et que ces stocks peuvent varier considérablement selon les systèmes de cultures pratiqués (**Chenu et Balabane, 2001 in Laboubée, 2007**).
- Un lieu de transformation de la matière organique. Cette fonction du sol est principalement due à l'abondance et à la diversité des microorganismes du sol.
- Un système épurateur de substances polluantes. Le sol par ses propriétés de rétention et de transformation permet de limiter la dispersion de substances polluantes comme les pesticides, les nitrates ou les éléments traces métalliques aux autres milieux de l'écosystème terrestre (comme les nappes phréatiques du sous sol ou les cours d'eau et le milieu marin).

4.3. La couverture pédologique du PNEK

La couverture pédologique de la région du Parc National d'El Kala se caractérise par une distribution des chaînes de sol en fonction de la topographie, la végétation et la roche mère (**Benslama, 1993**).

La différentiation des sols du PNEK est fonction de la nature du substrat géologique, du climat et de la présence ou de l'absence d'une hydromorphie, qu'elle soit permanente ou temporaire. La combinaison de ces facteurs permet de distinguer :

4.3.1. Les sols dunaires

- Sur la partie littorale, où le sol est dénudé de couvert végétal, le profil est proche des régosols avec un pH élevé et une teneur en matière organique faible.
- Sous les formations cocciférales, le sol devient acide du fait du lessivage des ions calcium avec apparition d'une litière correspondant aux sols peu évolués et lessivés.

- Sur les dépressions et les parties inondées (hydromorphie permanente ou temporaire), le sol se caractérise par un pH faible et une faible minéralisation de la matière organique qui s'accumule sous forme de sédiment tourbeux caractéristiques des histosols atteignant dans certains endroits plusieurs mètres de profondeur.

4.3.2. Les sols inter-collinaires

Le profil présente un horizon B, cendreux et très lessivé, qui peut atteindre quelques mètres dans certains endroits, avec un pH acide.

4.3.3. Les sols des milieux forestiers

Sous bonne couverture végétale, le profil présente un pH acide avec une bonne humification des horizons supérieurs se rapprochant ainsi des caractéristiques des sols bruns forestiers. Ces formations pédologiques se rencontrent sous les forêts de chêne liège et de chêne zeen.

5. Hydrographie

Sur le plan hydrogéologique, on distingue :

- ❖ **Les Sources** : de nombreuses sources existent sur le territoire du parc, les plus importantes sont celles de Bouglez, Bouredim et El-Bhaim qui totalisent un débit de 150 l/s soit un débit de 12.700m³/j. Nous pouvons citer également Ain Boumalek, Boulif, Ain Darrdara, Khanguet-Aoun, El-Hammam, Ain-Laiche, Ain-Melloul, Ain Sidi-Boutribicha (**Samraoui et de Belair, 1997**).
- ❖ **Les Lacs** : ces écosystèmes sont constitués par le complexe des zones humides qui sont représentées essentiellement par lacs Tonga, Oubeïra et Mellah.
- ❖ **Le réseau hydrographique** : la configuration topographique de la région permet de constater trois systèmes (Tab. 1) :

Tableau 1 : Principaux cours d'eau du Parc National d'El-Kala.

| Principaux oueds | Longueur (Km) | Exutoires |
|------------------|---------------|--------------------|
| Oued Reguibet | 8 | Mellah |
| Oued N'hal | 3.5 | Plage Cap Rosa |
| Oued Mellah | 7 | Mellah |
| Oued El-Aroug | 5 | Mellah |
| Demat Rihane | 1.5 | Oubeira |
| Boumerchen | 2 | Oubeira |
| Dai El-Graa | 5 | Oubeira |
| El-Aroug | 10 | Tonga |
| El-Hout | 14 | Tonga |
| Bougous | 24 | Mexa |
| Sbaa | 4 | Oued El-Kebir |
| Bouredim | 5 | Bouredim |
| Messida | 10 | Oubeira - El Kebir |
| El-Kebir | 35 | Mafrag |

- **La partie Sud-Est** : drainée par trois oueds : Bougous, Ballouta et El-Kébir. Ce dernier constitue le collecteur principal (apports de 245 Hm³/an) ; il alimente les nappes alluviales et dunaires et lors des crues, on assiste à la mise en eau des dépressions inter-dunaires ;
- **La partie Est** où s'écoule la majorité des cours d'eau à faible débit alimentant la plaine d'Oum-T'boul et le lac Tonga ;
- **La partie Ouest**, parcourue par de nombreux oueds permanents dont El-Aroug, Mellah, Reguibet, Boumerchen, Dey L'Graa..., qui se déversent pour la plupart dans les lacs Mellah et Oubeïra (Fig.3)

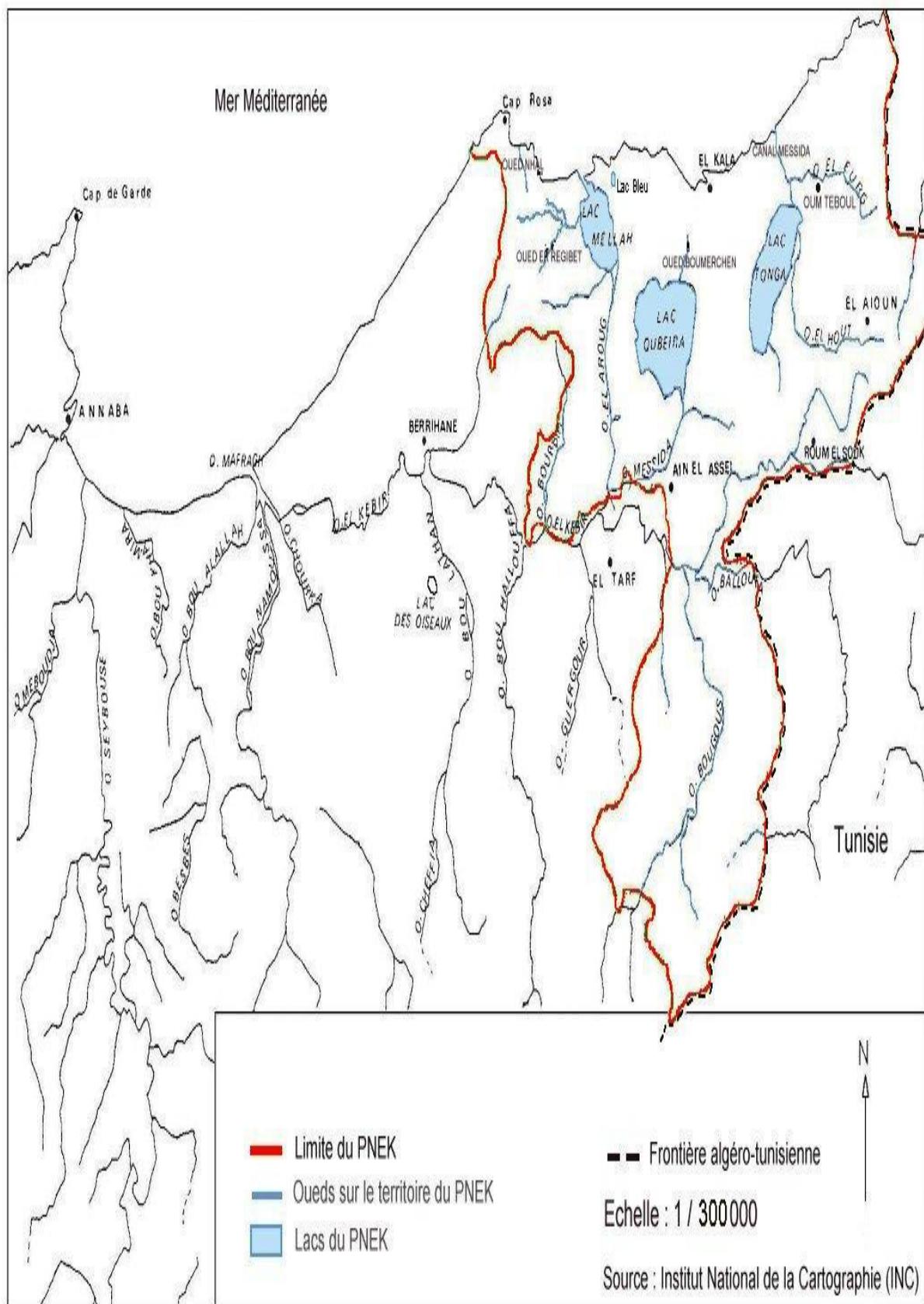


Figure 3 : Réseau hydrographique du Parc National d'El-Kala

6. Description des différents habitats du Parc National d'El-Kala

Le Parc National d'El Kala présente six habitats principaux (**Benyacoub et al., 1998**) :

6.1. Les tourbières

Conséquence d'une pluviométrie ancienne élevée, les tourbières sont des marécages acides où se forment des sols tourbeux. Les principaux éléments arborés (Saule, Aulne, ...) sont en mélange avec des magnocariçaies à *Cyperus*, *Scirpes* et *Carex*. Cet écosystème unique présente une grande diversité d'espèces végétales. Avec environ 80 espèces dont une dizaine sont rares et/ou confinées à la seule région d'El-Kala. Les principales tourbières recensées au niveau du Parc se situent au Nord-Est de l'Oubeïra à Demet Rihane (5 ha), Bou Merchen (30 ha), Ain Khiar (20 ha), lac Tonga (35 ha), lac Mellah (20 ha), lac Bleu (0.5 ha) et lac Noir (5 ha).

6.2. La cocciféraie

La cocciféraie s'étend sur plus de 1500 ha dans le cordon dunaire. Ce groupement est préférentiellement confiné aux expositions Nord (lac Mellah, forêt du Tonga) et compte essentiellement des espèces psamophiles. L'intérêt du Chêne Kermès est fondamental pour le maintien du cordon dunaire.

6.3. Les ripisylves

Les ripisylves diffèrent des zones humides d'une part par leur forme linéaire et d'autre part par leur topographie tourmentée, souvent bouleversée par les crues. Cette hétérogénéité spatio-temporelle leur confère une remarquable diversité, tant spécifique que fonctionnelle (**Décamps, 2003**). Les ripisylves constituent un type de milieu caractéristique du Parc National d'El-Kala. D'une composition botanique marquée par la présence des essences arborées à feuilles caduques, c'est le seul habitat caducifolié de plaine où l'on observe l'Aulne glutineux, le Frêne et le Peuplier (**Bensettiti et Lacoste, 1999**). Leur exigence en humidité trahie les contours du réseau hydrographique permanent de la région. Cet habitat, caractérisé par la diversité des ressources qu'il recèle, offre à une faune variée et dense des conditions de milieu particulièrement favorables (**Bouloumat, 2001**).

6.4. Les milieux rocheux et plages

Les habitats rocheux côtiers et les plages forment un habitat particulier en ce sens qu'il constitue le support terrestre d'une faune et d'une flore essentiellement influencées par le milieu marin et ses ressources.

6.5. Le milieu marin

Le milieu marin concerne essentiellement le domaine aquatique infra-littoral. Le Parc possède une quarantaine de kilomètres de côtes. La qualité de cet habitat est intéressante particulièrement pour de nombreuses espèces piscicoles. La flore est surtout caractérisée par la présence de nombreux herbiers à *Posidonia oceanica*, particulièrement favorables à la présence de nombreux invertébrés et poissons qui les utilisent comme abri et frayère. De plus, les stations de nidification spécifique (falaises rocheuses, corniches, îlots rocheux...etc.) semblent insuffisantes pour autoriser l'installation d'un plus grand nombre d'espèces ou d'individus.

6.6. Les zones humides

La région d'El-Kala a la particularité d'abriter le complexe de zones humides le plus important du Maghreb. Très intéressant par ses dimensions et par la diversité des conditions de profondeur et de salinité, il favorise une richesse biologique particulièrement importante. Les principales zones humides de la région sont les lacs Mellah (860 ha), Oubeïra (2200 ha) et Tonga (400 ha). A cela, il faut ajouter le marais de la Mekhada (8900 ha), le Lac des Oiseaux (40 ha), le Lac bleu, le marais de Bourdim et le lac du barrage Mexa. Ces zones humides constituent des stations privilégiées de reproduction d'espèces animales d'un grand intérêt pour la biodiversité régionale voire nationale, telles les Odonates, Amphibiens et Reptiles (**Rouag, 1999**), les Oiseaux (**Chalabi, 1990 ; Belhadj, 1996 ; Boulehbali, 1999 ; Ziane, 1999** ; **Benyacoub et al, 2000 ; Boukheroufa, 2001 ; Rizi, 2001**). Par ailleurs, elles constituent des stations d'accueil pour de nombreux oiseaux migrateurs et hivernants tels que les Anatidés (**Ziane, 1999**), les Limicoles (**Boukhroufa, 2001**). Elles renferment une flore riche et diversifiée comprenant de nombreuses espèces rares, tels que *Trapa natans* au niveau du lac Oubeïra, *Marsillea diffusa* dans le lac Tonga (**Kadid, 1989**).

7. Etude climatique

Pour analyser les conditions climatiques de la région d'El-Kala, on dispose de données relatives aux paramètres pluviométriques, thermiques, hygrométriques et orographiques pour une période allant de 1995 à 2012. Ce sont ces données relevées durant 18 ans que nous analyserons en détail.

7.1. Températures

La température est un facteur qui agit sur la répartition géographique des espèces (**Dreux, 1980**). Ce paramètre est fonction de l'altitude, de la distance par rapport à la mer et varie également en fonction des saisons (**Ozenda, 1982**).

Les paramètres thermiques mensuels portant sur les températures minimales (m), les températures maximales (M), les températures moyennes $(M+m)/2$ et l'amplitude thermique $(M - m)$ sont mentionnés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Moyennes des températures mensuelles de la région d'El Kala (1995-2012)
(O.N.M., 2013)

| Mois | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T Min (°C) | 8.76 | 8.6 | 10.07 | 12.31 | 15.65 | 18.99 | 21.74 | 22.64 | 21 | 16.96 | 12.95 | 10.28 |
| T Max (°C) | 17.48 | 17.76 | 19.33 | 21.88 | 25.74 | 28.78 | 32.43 | 33.08 | 30.07 | 27.08 | 21.78 | 17.58 |
| T Moy. (°C) | 13.12 | 13.18 | 14.7 | 17.09 | 20.69 | 23.88 | 27.08 | 27.86 | 25.53 | 22.02 | 17.36 | 13.93 |
| T (M-m) (°C) | 8.72 | 9.16 | 9.26 | 9.57 | 10.09 | 9.79 | 10.69 | 10.24 | 9.07 | 10.12 | 8.83 | 7.3 |

Nous constatons que le mois le plus chaud est Août avec une température moyenne de 27, 86°C et le mois le plus froid est Janvier avec une température moyenne de 13.12 °C (Tab. 2). L'amplitude thermique est définie comme étant la différence entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid et renseigne sur l'importance de l'évaporation, de la continentalité et l'humidité atmosphérique. Pour notre zone d'étude, l'amplitude est de l'ordre de 9.40 °C, elle est considérée comme relativement élevée pour un climat méditerranéen.

7.2. Pluviométrie

La pluviométrie constitue un facteur écologique d'importance fondamentale qui intervient non seulement dans le fonctionnement des écosystèmes mais également dans leur répartition.

Tableau 3 : Moyennes des précipitations mensuelles de la région d'El Kala (1995–2012)

(O.N.M., 2013)

| Mois | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Année |
|--------|--------|-------|-------|------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| P (mm) | 112.65 | 62.76 | 75.42 | 59.1 | 40.77 | 21.47 | 4.1 | 11.08 | 62.51 | 73.19 | 105.53 | 111.95 | 740.53 |

L'analyse du tableau 3 montrent que le mois le plus pluvieux est Janvier avec un total de 112,65 mm, par contre pour les données **Seltzer (1946)**, il s'agit de Décembre avec 156 mm.

7.3. Hygrométrie

La seule appellation de “complexe de zones humides” peut donner une idée sur le degré hygrométrique de la région d'El-Kala et son Parc National.

Mesurée en pourcentage, l'humidité de l'air est relativement constante sur toute l'année, allant de 72 à 78 %, ceci est dû principalement à l'action régulatrice de la mer et des plans d'eau qui contribuent au maintien d'une hygrométrie élevée en été modérant la durée et l'intensité de la sécheresse estivale (**Semadi, 1989**).

Cette humidité de l'air, élevée même en période estivale, n'est autre qu'une véritable “compensation occulte” pour les végétaux ne bénéficiant d'aucune précipitation durant l'été (**de Bélier, 1990**).

Les valeurs de l'humidité relative de l'air enregistrées au niveau de la région d'El-Kala sont consignées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Moyennes hygrométriques mensuelles de la région d'El Kala (1995–2012)

(O.N.M., 2013)

| Mois | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Moy. Année |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|------------|
| H (%) | 78.8 | 77.39 | 74.54 | 76.53 | 75.16 | 73.64 | 71.17 | 71.59 | 71.93 | 73 | 73.96 | 76.73 | 74.54 |

Les moyennes mensuelles de l'hygrométrie pour la période allant de 1995 à 2012, présentent un maximum enregistré pour le mois de Janvier avec 78.8%, c'est généralement le mois le plus pluvieux (Tab. 4).

7.4. Vents

Les vents favorisent l'évaporation et interviennent aussi sur l'humidité grâce à leur fréquence, direction et vitesse. La vitesse des vents dans la région d'El-Kala est plus ou moins constante et ce depuis le Quaternaire (**Joleaud, 1936**).

Pendant la saison froide, les vents de direction N-W prédominent, alors qu'en saison chaude, ce sont les vents du N-E qui soufflent entraînant une brise de mer importante (**Seltzer, 1946**).

Le vent du Sud-Est nommé sirocco est chaud et sec. Son maximum de fréquences s'observe en Août. Ce vent peut avoir des effets destructeurs sur la végétation, lorsqu'il se combine à un état de déficit hydrique. Il favorise en effet de violents incendies de forêts.

Les moyennes mensuelles de la force des vents pour la période 1995 à 2012 de la région d'El-Kala sont portées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Moyennes mensuelles la vitesse des vents de la région d'El-Kala (1995-2012)
(O.N.M., 2013)

| Mois | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| Vitesse (m/s) | 4.38 | 4.27 | 4.16 | 3.88 | 3.17 | 3.26 | 3.05 | 3.04 | 3.7 | 3.78 | 4.15 | 4.29 |

La fréquence des vents de la région d'El-Kala est variable pendant la saison froide; c'est en effet durant cette même période de Novembre à Mars que la vitesse du vent est la plus élevée. Durant la saison chaude, la force des vents devient faible et accuse une constante nette d'Avril à Octobre (Tab.5).

7.5. Synthèse des données climatiques de la région d'étude

7.5.1. Diagramme pluvio-thermique de Gaussen

Le diagramme pluvio-thermique proposé par Bagnouls et Gaussen est établi à partir des courbes des moyennes mensuelles des températures et des précipitations ; l'échelle des précipitations étant doublée par rapport à celle des températures. Il permet de définir la période de sécheresse intervenant lorsque la courbe des précipitations descend en dessous de celle des températures, P étant égale à $2T$ ($P = 2T$). Sa durée est délimitée par les points d'intersection des deux courbes. Son intensité est proportionnelle à la surface comprise entre les courbes (**Bagnouls et Gaussen, 1953**).

Le diagramme construit à partir des données de la station météorologique d'El-Kala montre que l'année se compose de deux périodes, l'une sèche s'étendant de Mai à Août et l'autre humide s'étalant sur 8 mois de Septembre à Avril. Ainsi Juillet est le mois le plus sec, Novembre le plus humide, Janvier le plus froid et Août le plus chaud (Fig. 4).

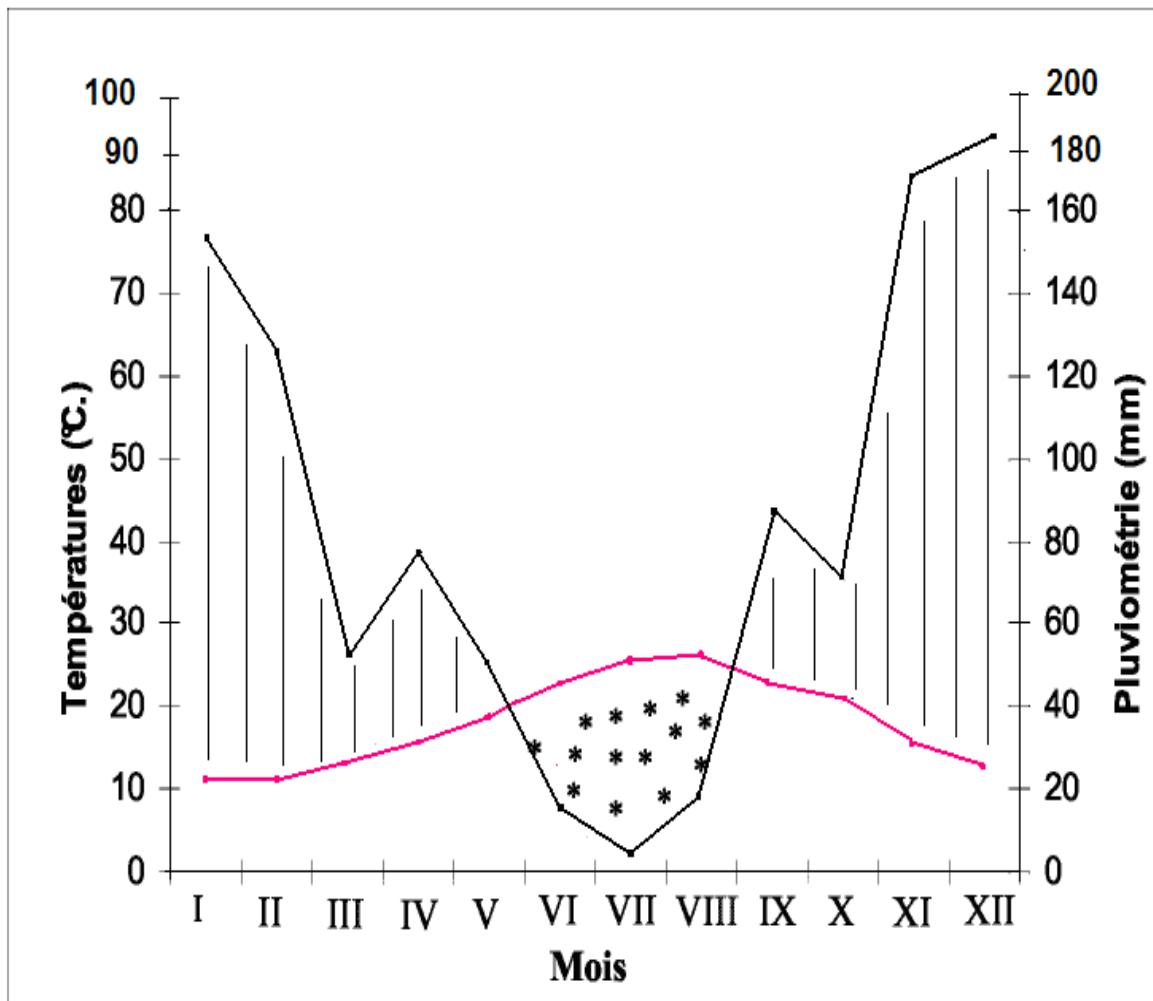


Figure 4 : Diagramme pluvio-thermique de la région d'El-Kala (1995-2012)

7.5.2. Climagramme d'Emberger

Pour les régions méditerranéennes, Emberger (1930) a proposé également un quotient pluvio-thermique plus précis faisant intervenir en plus du total des précipitations (P), la moyenne des maxima du mois le plus chaud (M) et la moyenne des minima du mois le plus froid (m), $(M-m)$ étant l'amplitude extrême rendant compte de l'évaporation. Ainsi, le quotient pluvio-thermique d'Emberger est calculé grâce à la formule suivante:

$$Q_1 = \frac{P \times 100}{(M + m) (M - m)}$$

Le quotient calculé pour la région d'El-Kala pour la période (1995/2012) est égale à 105 en rapportant cette valeur sur le climagramme d'Emberger, on constate que la région d'étude se situe dans l'étage bioclimatique méditerranéen sub-humide à hiver chaud (Fig. 5).

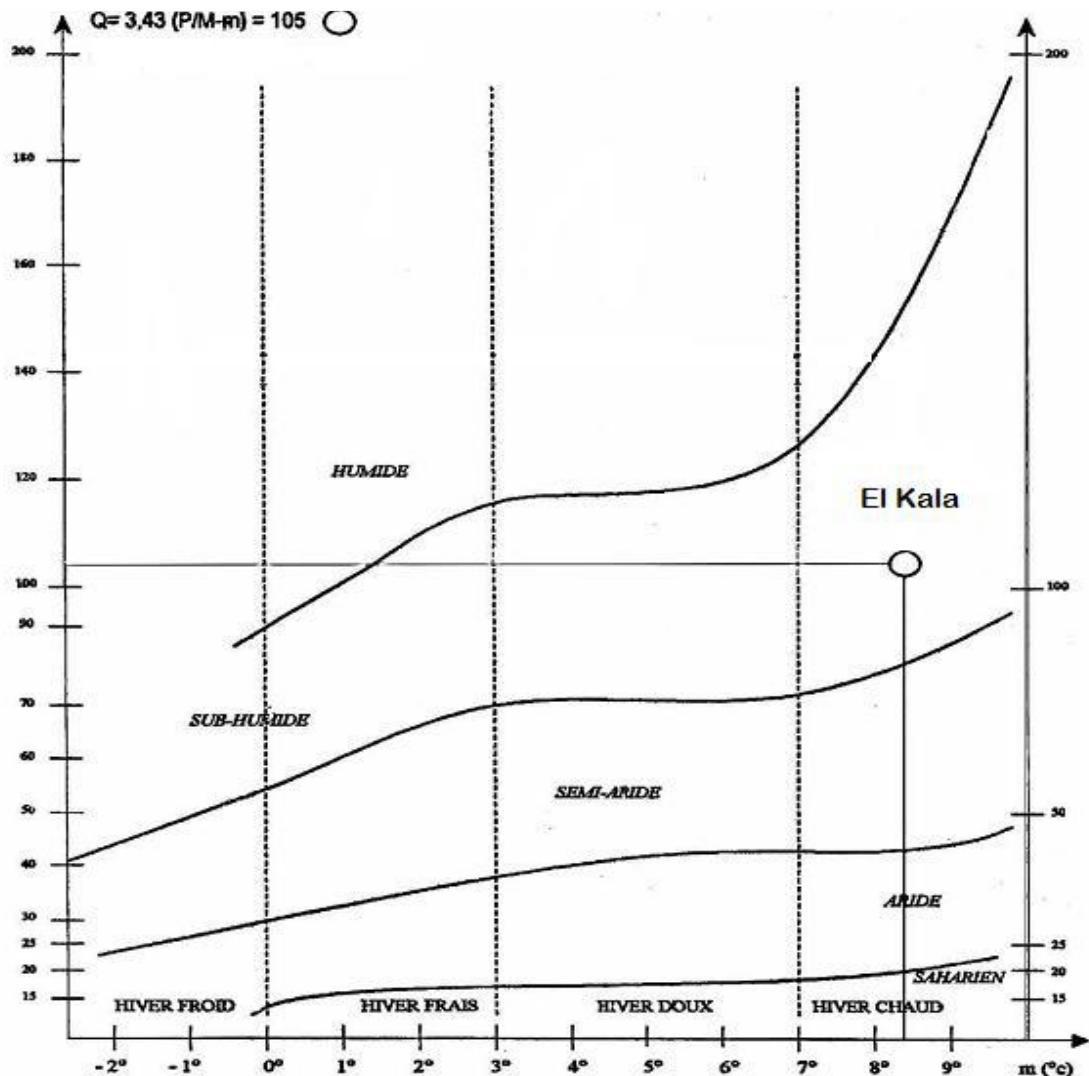


Figure 5 : Etage bioclimatique de la région d'El-Kala selon le climagramme d'Emberger (1995-2012)

8. Biodiversité

Le Parc National d'El-Kala est constitué de plusieurs écosystèmes qui lui attribuent une grande richesse spécifique. Ils sont composés de milieux littoraux, dunaires, lacustres, ripicoles, rupicoles, agricoles, forestiers etc... Ces écosystèmes sont eux-mêmes composés de plusieurs habitats qui offrent autant de niches écologiques aux animaux et plantes.

Belhadj (1996) identifie vingt deux (22) milieux différents dans le Parc National d'El-Kala.

Les milieux les plus représentés sont entre autres les maquis à strate arborée dense, les subéraies, les maquis. Par la richesse exceptionnelle de sa flore et de sa faune, il constitue une véritable "bibliothèque" (Côte, 2006).

8.1. La faune

La diversité des habits rencontrés au sein du parc a pour conséquence la présence d'une faune particulièrement riche et diversifiée. En effet, les principaux groupes systématiques y sont rencontrés, à savoir les mammifères et les oiseaux (Tab. 6).

Les espèces qui y hivernent ou qui y nichent sont en général rares et protégées. Le cerf de Barbarie constitue le mammifère le plus précieux de la région.

La particularité du Parc National d'El-Kala est la population d'oiseaux d'eau hivernante et nicheuse ; une bonne partie des espèces est protégée et même en voie de disparition. Les zones humides d'El-Kala constituent le dernier sanctuaire pour la survie de ces espèces. La diversité aviaire du parc est de 195 espèces dont 71 protégées par décret (M.A.T.E, 2003).

Tableau 6 : Le patrimoine faunistique du PNEK (Source : PNEK 2007)

| Classification | Patrimoine national | Patrimoine PNEK | Taux |
|----------------|---------------------|-----------------|------|
| Mammifères | 107 | 39 | 35% |
| Oiseaux | 336 | 195 | 60% |

8.2. La flore

Riche d'environ 840 espèces, la flore se caractérise par un taux particulièrement élevé d'espèces endémiques, rares et très rares (de Belair, 1990). Avec 231 espèces rares et très rares, appartenant à 62 familles et représentant plus du quart (27 %) de la flore du Parc.

Le Parc National d'El-Kala abrite ainsi le tiers de l'ensemble de la flore d'Algérie. Elle est représentée par les deux grands groupes du règne végétal qui sont les cryptogames et les phanérogames. Le premier groupe est représenté par une trentaine de fougères, 98 espèces de champignons et 114 espèces lichéniques ; le deuxième groupe est représenté par 780 espèces soit environ 30% des spermaphytes de l'Algérie (Ouelmouhoub, 2005).

La végétation du PNEK est divisée en cinq séries principales réparties comme suit :

1- La série du Chêne liège : c'est la série la plus importante du PNEK (48,75 % de sa surface forestière), elle s'étend de zéro jusqu'à 900m d'altitude sur les versants Nord et Nord-Est. La

végétation qui l'accompagne est composée essentiellement du cortège suivant : *Erica arborea*, *Pistacia lentiscus*, *Phillyrea angustifolia*, *Cytisus triflorus*, *Callycotome villosa*.

2- La série du Chêne zeen : cette série est limitée au niveau des stations fraîches et humides, elle se trouve entre 900 et 1202 m d'altitude. Rencontrée surtout dans le massif du Ghorra, elle est essentiellement composée de : *Ilex aquifolium*, *Erica arborea*, *Cytisus triflorus*, *Crateagus manogyna*, *Myrtus communis*, *Laurus nobilis* (**Toubal, 1986**).

3- La série du Chêne kermès : cette série occupe surtout les dunes littorales qui s'étendent de cap Rosa au Cap Segleb. Le Chêne kermès joue un rôle important dans la fixation des dunes. Son cortège floristique est caractérisé par la présence de *Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*, *Halimium halimifolium*, *Chamaerops humilis*.

4- La série du Pin maritime : elle occupe les collines sub-littorales et les basses montagnes. Le Pin constitue une essence de reboisement de la région. Les incendies favorisent sa propagation par libération et dispersion des propagules. Il est souvent accompagné de *Quercus suber*, *Erica arborea*, *Myrtus communis*, *Phillyrea angustifolia*, *Cistus salvifolius*, *Arbutus unedo* (**Toubal, 1986**).

5- La ripisylve : elle s'étend le long des berges, des lacs et des oueds. Elle est constituée par des Aulnaies plus au moins riches en Saules, Frênes, Peupliers et Ormes (**Kadid, 1989 in Farsi, 1996**) souligne l'importance de la végétation aquatique des différents sites humides du Parc.

Chapitre II.

Matériel

&

Méthodes

Chapitre II : Matériel et méthodes

1. Sites d'étude

1.1. Le lac Oubeïra

1.1.1. Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant du lac Oubeïra, d'une superficie de 9728 ha, fait partie de la zone lacustre d'El-Kala. Le plan d'eau couvre une superficie de 2120 ha, soit un peu plus du 1/5 de la surface totale du bassin versant et représente environ 22% de la superficie totale du bassin versant.

Le seuil qui sépare le lac Oubeïra du lac Mellah est de 44 m. Il n'y a pas de traces d'un ancien écoulement sur ce versant. Le seuil de 40 m séparant le lac Tonga du lac Oubeïra est drainé par un petit ravin : Chabet Fedj El-Alleg.

Le lac Oubeïra fonctionne de manière endoréique, il est alimenté par une dizaine d'oueds. En hiver, à l'occasion des fortes précipitations, les eaux de l'oued El-Kébir parviennent au lac principalement par l'oued Messida qui prend naissance au Sud. En été, quand le niveau de l'oued El-Kébir est au plus bas niveau, le système hydrologique fonctionne en sens inverse, la Messida ayant la particularité de couler dans les deux sens.

Le domaine agricole est constitué par les parcelles de terres travaillées par les riverains, mais également par la jachère. Il s'étend sur une superficie de 1541 ha, soit 16 % de la surface totale du bassin versant. Les cultures pratiquées sont le maraîchage, l'arboriculture, mais surtout les arachides notamment dans la plaine d'El-Frin.

1.1.2. Paramètres de forme

Le bassin versant du lac Oubeïra s'étend sur une superficie de 9728 ha. Sa limite nord s'étend d'Est en Ouest d'altitude 170 m à 182 m, suit la ligne de partage des eaux qui est la ligne de crête qui passe au Nord par le Kef Trébiche à 256 m et qui marque aussi la limite avec le bassin versant du lac Mellah. La bordure Ouest longe les sommets du Djebel Oubeïra (100 m) jusqu'à Fedj Zana (91 m) avant d'être relayée dans la partie Sud par les Djebels Ach Lahmar (138 m) et Hellilif (189 m) qui constituent les bords Sud-Ouest du bassin versant. A l'Est, le bassin versant est formé d'une bordure plane qui s'étale au pied du Djebel Bou Merchène (184 m) au Nord-Est (Fig. 6)

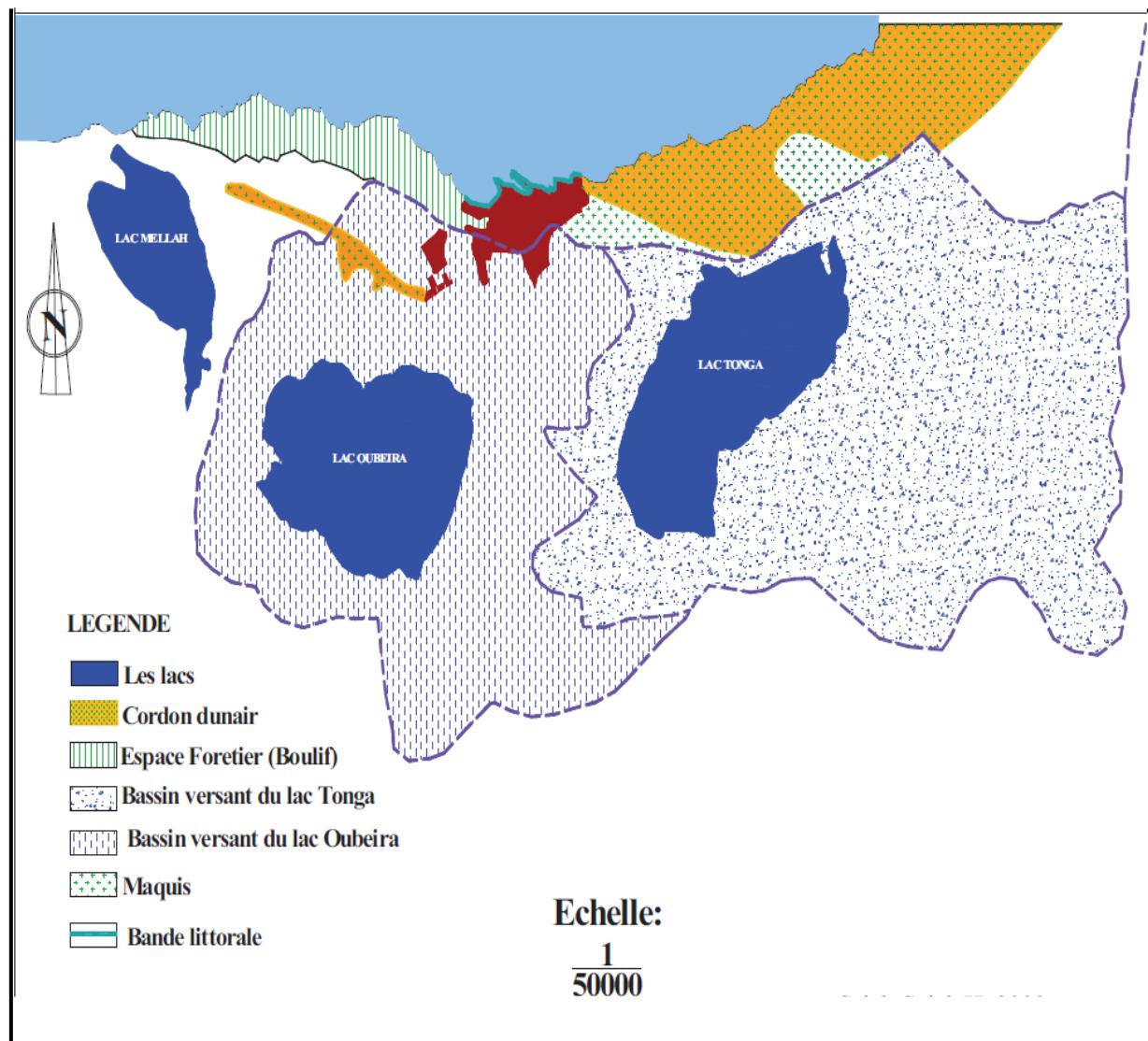


Figure 6: Bassin versant des lacs Oubeïra et Tonga

1.1.3. Le réseau hydrographique

Le bassin du lac Oubeïra est drainé par quatre principaux cours d'eau qui sont à écoulement pérenne. Les débits sont importants en saison humide mais ils baissent et se réduisent à l'étiage sans pour autant que les oueds s'assèchent totalement. On trouve:

- Les oueds Demet Rihana et Boumerchène au Nord.
- L'oued Dey El-Garaâ au Nord-Est.
- L'oued Bouhchicha au Sud (Fig.7).

On rencontre aussi une multitude de petits cours d'eau à écoulement temporaire venant des reliefs du Sud-Ouest pour se jeter dans les eaux du lac. Il faut encore noter le cas particulier de l'oued Messida qui est l'exutoire naturel du bassin versant à l'étiage mais qui coule vers le lac lors des crues hivernales de l'oued El-Kébir (Fig.9).

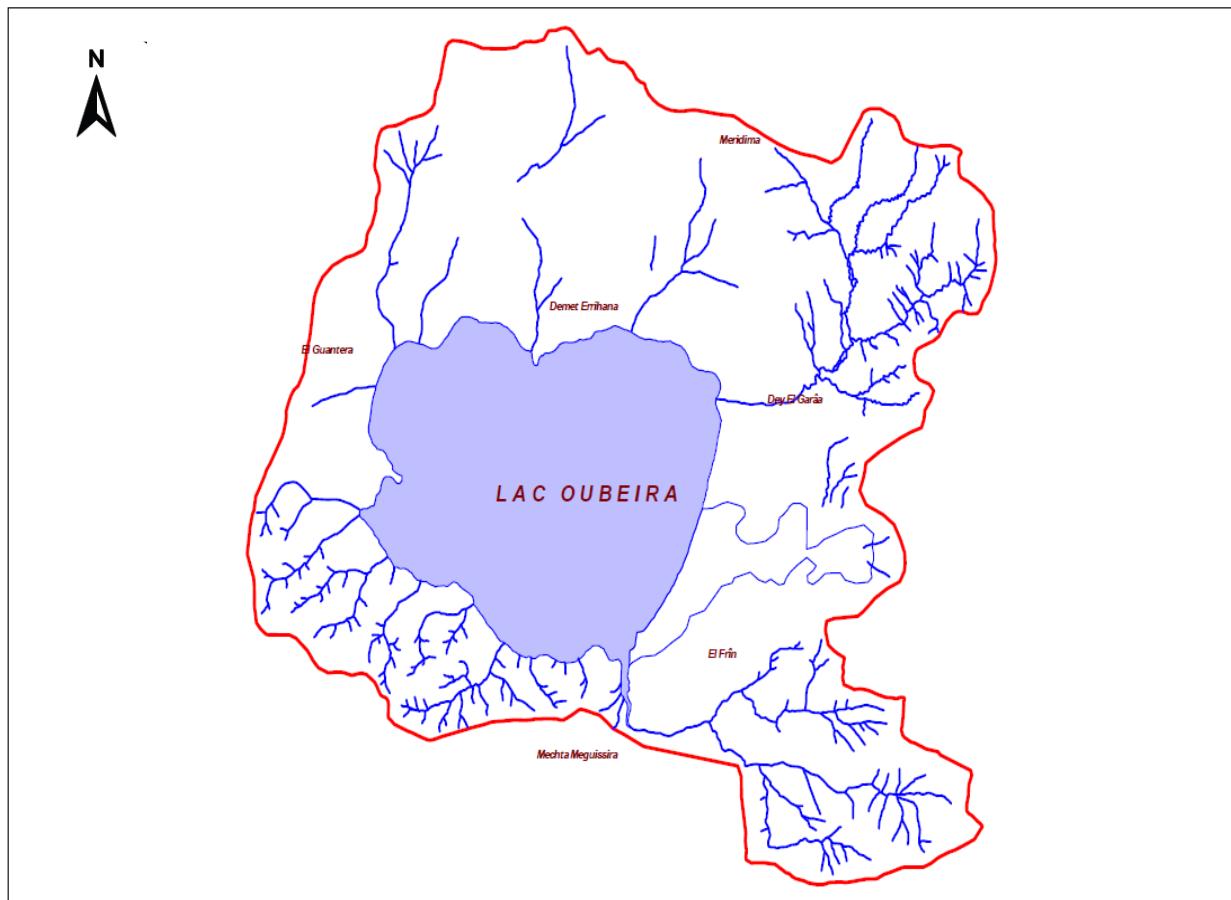


Figure 7: Réseau hydrographique du bassin versant du lac Oubeïra (1/50 000^e) (BNEDER, 2004)

1.1.4. Caractéristiques morphométriques du lac Oubeïra

1.1.4.1. Localisation

Le lac Oubeïra est un plan d'eau de type «étang» c'est-à-dire de moins de 6 m de profondeur, localisée à 5 km au Sud-Ouest de la ville d'El-Kala et 54 km à l'Est et Sud-Est de la ville d'Annaba.

Ses coordonnées géographiques au centre sont 36° 50' 695 N, 8° 23' 272 E, de ce fait il est localisé à 2,3 km au Sud-Est du lac Mellah.

1.1.4.2. Dimensions

- De forme grossièrement carrée, sa longueur selon un axe Nord-Sud passant par le milieu est de 4,20 km.
- La largeur selon un axe Est-Ouest passant par le milieu est de 5,22 km.
- Le périmètre est égal à 19,80 km.
- La superficie totale mesurée est de 2257 ha environ.

1.1.4.3. Bathymétrie

Les mesures bathymétriques font ressortir que le lac Oubeïra est un plan d'eau peu profond. La profondeur maximale est de 2,50 m en situation de pleine eau et ne représente que 0,3 % de la superficie, la profondeur moyenne est égale à 2,15 m.

L'examen de la carte bathymétrique du lac Oubeïra révèle donc que la topographie est très homogène. En effet, dans les 67% de la superficie, la profondeur ne varie que d'une quarantaine de cm. Les variations de profondeur sont relativement importantes au niveau de l'ensemble des berges. En revanche, la zone centrale du lac, présente une homogénéité remarquable de la bathymétrie ; faisant assimiler le lac Oubeïra à une grande cuvette à fond plat et aux bords légèrement relevés.

1.1.4.4. Volume

Le volume total du lac $V_t = 45.277.076 \text{ m}^3$, soit un peu plus de 45 millions de mètres- cubes en situation de hautes eaux. Le caractère endoréique du lac Oubeïra l'expose à des variations sensibles de son volume d'eau. L'intense évaporation estivale retire un volume d'eau important.

1.1.5. Les menaces sur l'eau

1.1.5.1. Pompage de l'eau

Le pompage de l'eau est courant durant les périodes hivernale et estivale. Il est pratiqué au niveau des rives Nord et Est ; une partie de la rive Sud et une partie de la rive Ouest. C'est surtout le dérangement et la pollution qu'il induit qui sont préoccupants. La faible superficie agricole autour de l'Oubeïra n'étant pas trop grande consommatrice d'eau ; mis à part le secteur de l'oued Messida dont il faudra évaluer le volume prélevé.

1.1.5.2. Pollution de l'eau

Phénomène nouveau de pollution des zones humides (lacs et oueds) dû à l'extension des zones urbaines et à leurs rejets d'eaux usées ; mais également localement par les écoulements d'hydrocarbures des motopompes. Actuellement, la tendance la plus menaçante de ce point de vue est sans conteste liée à l'extension du quartier de Mridima. Il est à redouter à terme, une nette augmentation de l'eutrophisation du lac par rejets de polluants divers et ses conséquences incalculables sur la faune et la flore aquatique.

1.2. Le lac Tonga

1.2.1. Caractéristiques du bassin versant

Le lac Tonga est situé à l'extrême Nord-Est du Parc National d'El-Kala où il fait frontière avec la Tunisie. Le bassin versant du Tonga est limité à l'Ouest et au Sud par les contreforts des monts de la Kroumirie, au Nord-Ouest par des collines sableuses qui le séparent du lac Oubeïra et au Nord par les dunes qui le séparent de la mer.

Il est relié à la mer par le canal artificiel de la Messida. Le lac Tonga est sur le territoire des communes d'El-Kala à l'Ouest, Souarekh (Om Teboul) à l'Est, El Aïoun au Sud-Est et Raml Souk au Sud-Ouest. Il est relativement plus peuplé que les bassins de l'Oubeïra et du Mellah. Les activités sont identiques, agriculture et élevage extensif, mais plus intenses.

C'est une zone humide d'importance internationale inscrite sur la liste Ramsar et une réserve intégrale du Parc National d'El-Kala.

1.2.2. Paramètres de forme

Le bassin versant du lac Tonga, s'étend sur 16 390 ha, son altitude moyenne est comprise entre 10 et 550 m. Sa limite à l'Est, suit le tracé de la frontière algérienne selon une ligne Nord-Sud qui va du Kef Redjela (550 m) au Nord du Babarik (572 m) jusqu'au Kef El Hammam (551 m) au Sud en suivant les hauteurs du Djebel Hadada et du Djebel Kourima (518 m). Son plan d'eau de 2300 ha, correspond à 12% de l'ensemble, il est le réceptacle de deux oueds qui ont édifié les cônes de déjection qui forment les plaines d'oued El Hout (225 ha) et d'Oum Teboul (200 ha) (Fig.6).

1.2.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin du lac Tonga présente une densité peu commune. Le plan d'eau reçoit ses eaux de deux principaux oueds pérennes mais dont le débit se réduit considérablement en période estivale par les effets conjugués de l'étiage et des nombreux prélèvements qui sont effectués le long de leur parcours notamment en franges alluviales et dans les deltas que forment leurs vastes cônes de déjection au Nord de oued El Hout et à l'Ouest de Om Teboul.

-L'oued El-Eurg draine la zone montagneuse au Nord et Nord-Est du bassin.

- L'oued El-Hout proprement dit prend ses sources dans les massifs autour d'El Aïoun et draine la partie montagneuse au Sud du bassin (Fig.8).

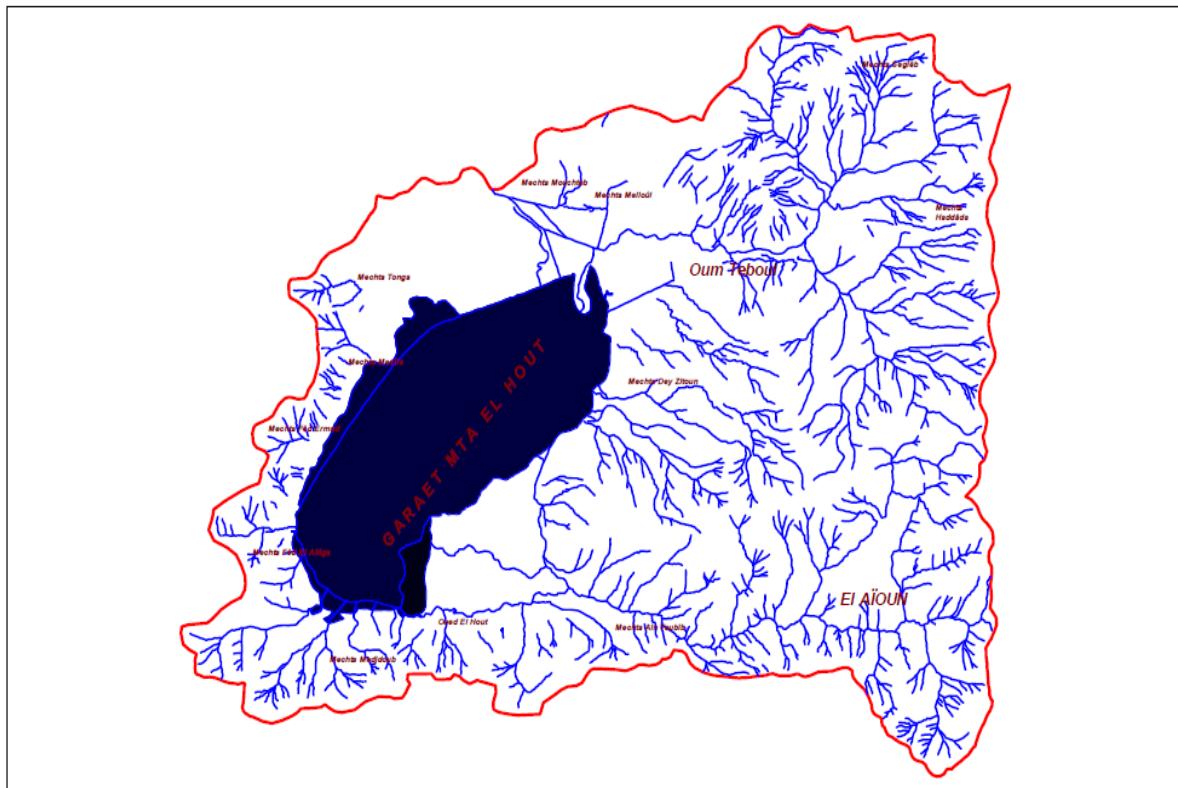


Figure 8: Réseau hydrographique du bassin versant du lac Tonga (1/50 000^e) (BNEDER, 2004)

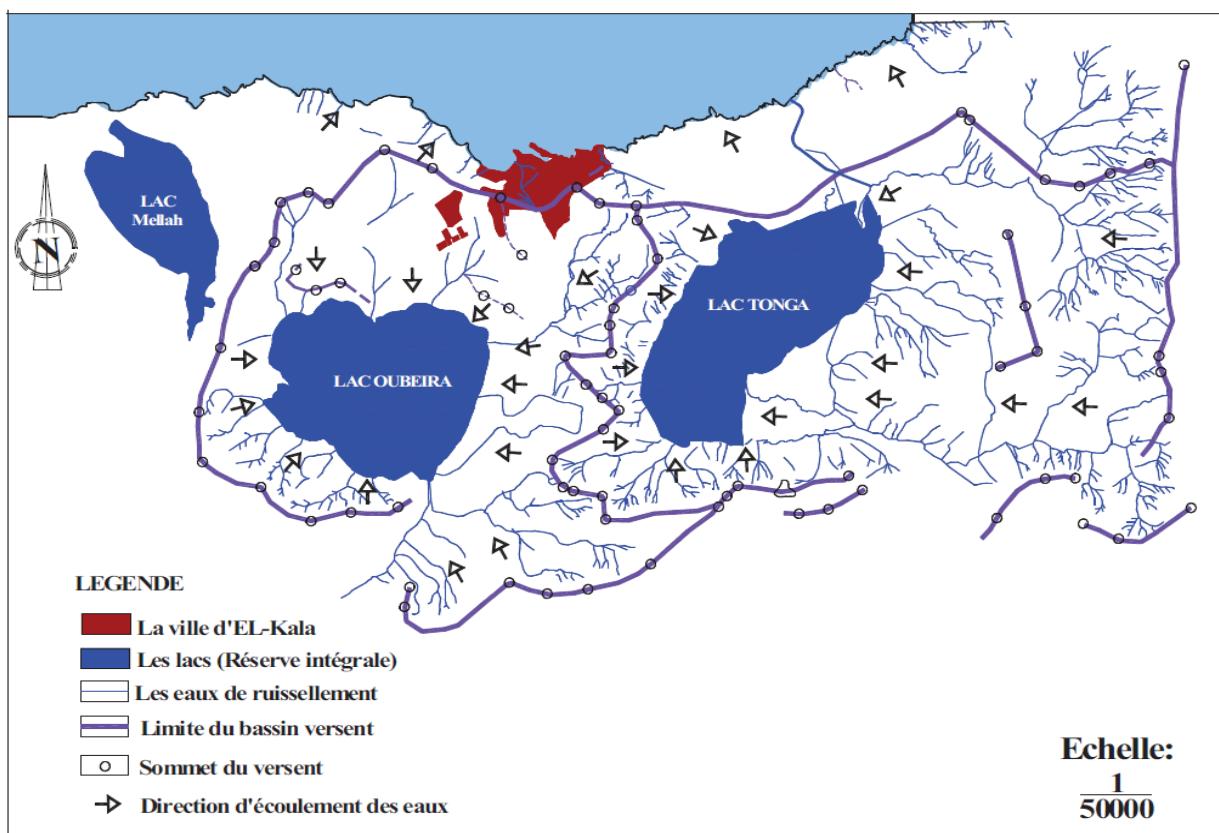


Figure 9: Direction d'écoulement des eaux des bassins versant des lacs Oubeïra et Tonga

1.2.4. Caractéristiques morphométriques du lac Tonga

1.2.4.1. Localisation

Le Lac Tonga est un plan d'eau de type «étang» c'est-à-dire de moins de 6 m de profondeur, localisée à 5 km au Sud-Est de la ville d'El-Kala et 65 km à l'Est et Sud-Est de la ville d'Annaba. Ses coordonnées géographiques au centre sont 36°51'511 N et 8°30'100 E.

1.2.4.2. Dimensions

De forme allongée, on peut définir des axes d'allongement remarquables.

- Sa longueur, selon un axe Nord-Est, Sud-Ouest, est de 7.1 km.
- La largeur selon un axe Est-Ouest passant par le centre est de 3,5 km en moyenne.
- Le périmètre est égal à 22 km environ.

La superficie en situation de pleine eau est égale à 2300 ha environ. Elle est sensiblement réduite en été du fait de l'évaporation. Les zones exondées sont localisées à l'Ouest et à l'ensemble de la partie sud du lac.

1.2.4.3. Bathymétrie

Les mesures bathymétriques font ressortir que le lac Tonga est un plan d'eau peu profond. La profondeur maximale à l'étiage est de 1.80 m. La profondeur moyenne est de 1.20 m. En situation de pleine eau la profondeur peu atteindre 3.00 m. A l'instar du lac Oubeïra, on retiendra que le lac Tonga se caractérise par une variation relativement faible de la profondeur au niveau des rives. Dans sa majeure partie, la topographie du fond du lac peut être considérée comme très homogène.

1.2.4.4. Volume

On peut estimer le volume du lac Tonga, à partir de la profondeur moyenne qui donne une valeur de 28.000.000 m³ environ en période de pré-étiage. Cette valeur doit être sensiblement supérieure en période de pleine eau. Le caractère endoréique du lac Tonga l'expose à des variations sensibles de son volume et de sa surface en eau. L'intense évaporation estivale peu retirer un volume d'eau important, supérieur à 25 % du volume maximale.

Le lac Tonga, qui est une zone marécageuse, est un site particulier. Son plan d'eau n'a pas de forme précise qui permette de mesurer un volume global et les fluctuations du niveau de l'eau comme celui du lac Oubeïra.

1.2.5. Les menaces sur l'eau

1.2.5.1. Drainage et irrigation

Il peut résulter d'une opération définitive d'assèchement pour des aménagements (route, logements, usines...) ou de pratiques temporaires mais régulières d'irrigation. Si l'irrigation est pratiquée tôt dans la saison, elle peut avoir une incidence suffisante sur les niveaux d'eau pour compromettre un processus de reproduction des oiseaux d'eau dans les zones humides peu profondes, donc les plus sensibles. Ce phénomène est visible au niveau de la rive Ouest, Sud-Ouest, Sud, Sud-Est. Il est directement associé aux exploitations agricoles riveraines qui pratiquent systématiquement l'irrigation pré-estivale et estivale.

1.2.5.2. Pollution de l'eau

Phénomène nouveau de pollution des zones humides (lacs et oueds) dû à l'extension des zones urbaines et à leurs rejets d'eaux usées ; mais également localement par les écoulements d'hydrocarbures des motopompes. Actuellement la tendance la plus menaçante de ce point de vue est sans conteste liée à l'extension du village d'Oued El-Hout au Sud-Est du lac. La démographie de ce village s'accompagne d'une nette augmentation de la quantité d'eaux usées. Une partie d'entre-elles est collectée et relativement traitée avant d'être libérée dans un petit cours d'eau limitrophe au Nord du village. L'habitat non raccordé au réseau d'assainissement, a ses eaux usées déversées dans les fosses septiques, qui rejoignent obligatoirement le lac par écoulement en surface ou souterrain. Cette pollution aura à terme une réelle incidence sur l'état sanitaire des eaux du lac et amplifiera l'eutrophisation, qu'il subit déjà naturellement, avec des conséquences négatives sur la diversité botanique du site.

2. Objectif de l'étude

L'objectif de notre étude est l'influence de la qualité des eaux sur les sols des principaux lacs du Parc National d'El-Kala. Pour atteindre cet objectif, notre étude s'est basée sur les points suivants:

- Première partie : l'étude pédologique par l'analyse de certains paramètres physiques et physico-chimiques sur les pourtours des lac Oubeïra et Tonga
- Deuxième partie : l'étude de la qualité de l'eau par l'analyse des paramètres physico-chimiques sur deux lacs (Oubeïra et Tonga) ;
- Troisième partie : l'influence de la qualité des eaux sur les sols.

3. Echantillonnage

Deux campagnes de prélèvements d'échantillons ont été effectuées durant une année pour mettre en évidence la caractérisation physique et physico-chimique des eaux et des sols des lacs Oubeïra et Tonga

- ❖ **Première campagne** : durant la fin de la période pluvieuse au mois de Mai (03 Mai 2016)
- ❖ **Deuxième campagne** : durant la fin de la période sèche au mois de Septembre (09 septembre 2016).

L'échantillonnage a été effectué de la façon suivante (Tab.7) :

- **Lac Oubeïra** : Six (06) stations d'échantillonnage d'eau et de sol réparties sur la périphérie du lac et surtout au niveau de l'embouchure des principaux cours d'eau pendant chaque campagne (mai et septembre 2016) (Fig.11).
- **Lac Tonga** : Pour chaque campagne, sept (07) stations d'échantillonnage d'eau et de sol ont été sélectionnées aux pourtours du lac et qui couvrent la totalité du plan d'eau (Fig.12) Pour réaliser notre étude, 52 prélèvements d'eau et de sol ont été effectués durant l'année 2016.

4. Protocole du prélèvement des échantillons

4.1. Sol

Les échantillons de sol ont été collectés en même temps, aux mêmes emplacements et aux mêmes dates de prélèvements d'eaux. Le prélèvement des échantillons a concerné la couche superficielle dans l'horizon 0-30cm à l'aide d'une tarière ensuite puis placés dans des sachets en plastique. Les échantillons de sol ont été séchés à l'air libre (3 à 8 jours), selon les conditions ambiantes puis broyés et tamisés à l'aide d'un tamis à 2 mm de diamètre. Le tamisat obtenu est soumis à une série d'analyses.

4.2. Eau

Au cours de l'année 2016, les prélèvements des échantillons d'eau des lacs Oubeïra et Tonga ont été réalisés dans des flacons en polyéthylène propres d'une capacité de 1,5 litre rincées 3 fois avec l'échantillon lors du prélèvement et à environ 40 cm de profondeur, assez loin des

Chapitre II. Matériel et méthodes

rives ou des bords. Ces flacons étiquetés (lac, site, lieu, date) ont été conservés dans une glacière à une température (2 à 4°C), et retournés au laboratoire. Les échantillons d'eau ont été filtrés sur membranes de 0.45µm de diamètre des pores pour subir les analyses appropriées 24 heures après les prélèvements.

Tableau 7 : Caractéristiques des stations de prélèvement

| N° Sites | Points de prélèvement | Nombre de prélèvements | Saisons d'échantillonnage |
|--------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Lac Oubeïra | | | |
| Site 1 (S1) | Embouchure d'oued Messida | Eau : 12 Sol : 12 | Saisons sèche et humide |
| Site 2 (S2) | El Frine | Eau : 12 Sol : 12 | Saisons sèche et humide |
| Site 3 (S3) | Embouchure du Dey L'Graa | Eau : 12 Sol : 12 | Saisons sèche et humide |
| Site 4 (S4) | Embouchure de Boumerchene | Eau : 12 Sol : 12 | Saisons sèche et humide |
| Site 5 (S5) | Embouchure de Demnet rihana | Eau : 12 Sol : 12 | Saisons sèche et humide |
| Site 6 (S6) | Nord-Ouest du lac Oubeïra | Eau : 12 Sol : 12 | Saisons sèche et humide |
| Lac Tonga | | | |
| Site 1 (S1) | Les vannes | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |
| Site 2 (S2) | Nord du lac Tonga | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |
| Site 3 (S3) | Nord-Ouest du lac Tonga | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |
| Site 4 (S4) | Sud-Ouest du lac Tonga | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |
| Site 5 (S5) | Sud du lac Tonga | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |
| Site 6 (S6) | Sud-Est du lac Tonga | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |
| Site 7 (S7) | Oued El-Hout | Eau : 14 Sol : 14 | Saisons sèche et humide |

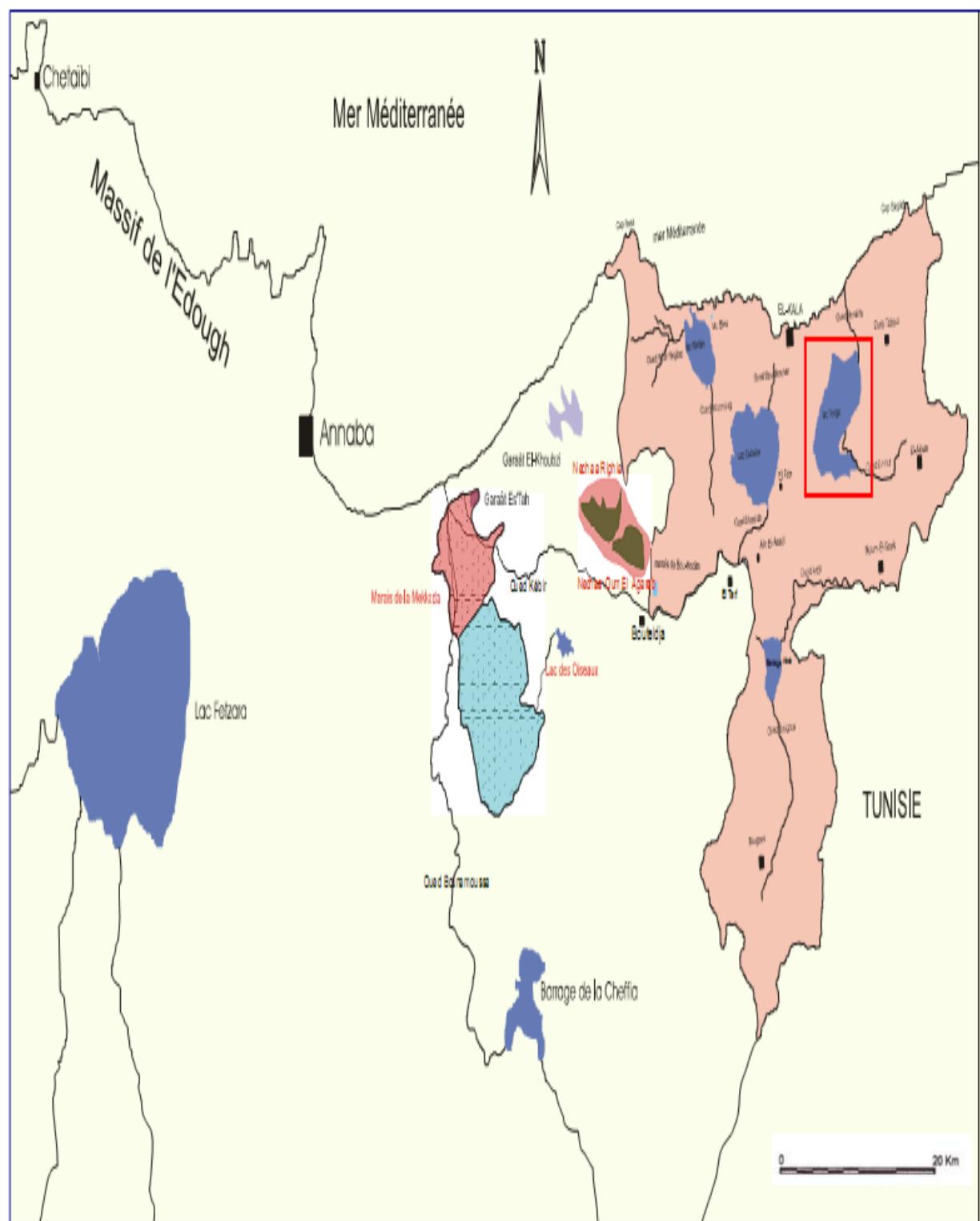


Figure 10 : Localisation des zones d'étude dans le PNEK

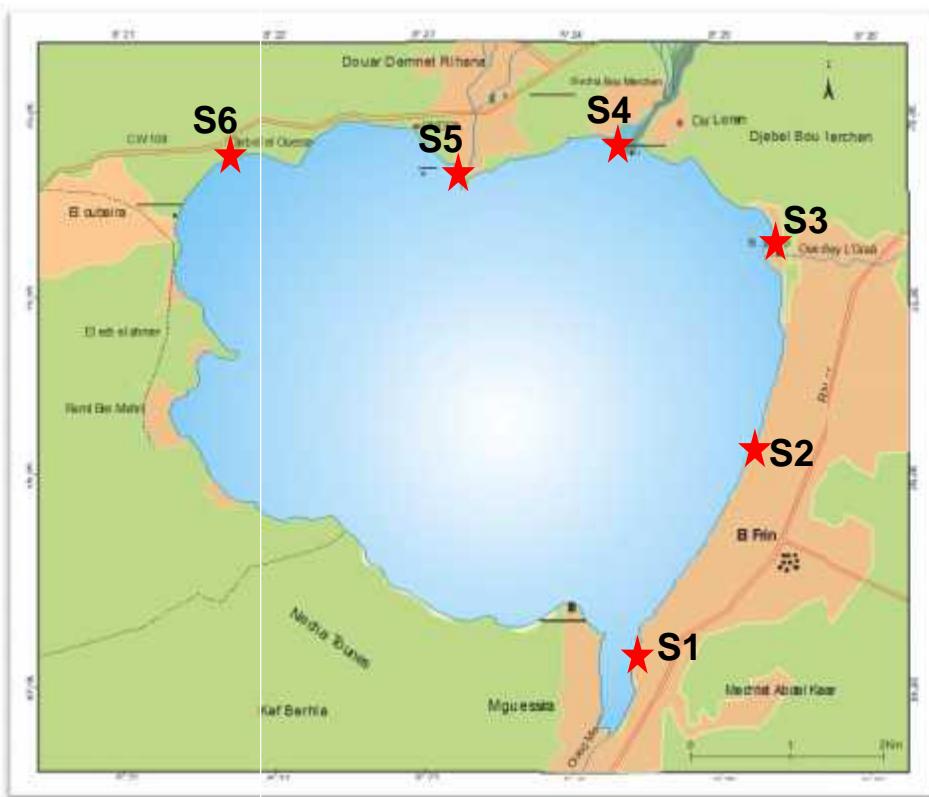


Figure 11 : Localisation des points de prélèvements du lac Oubeïra

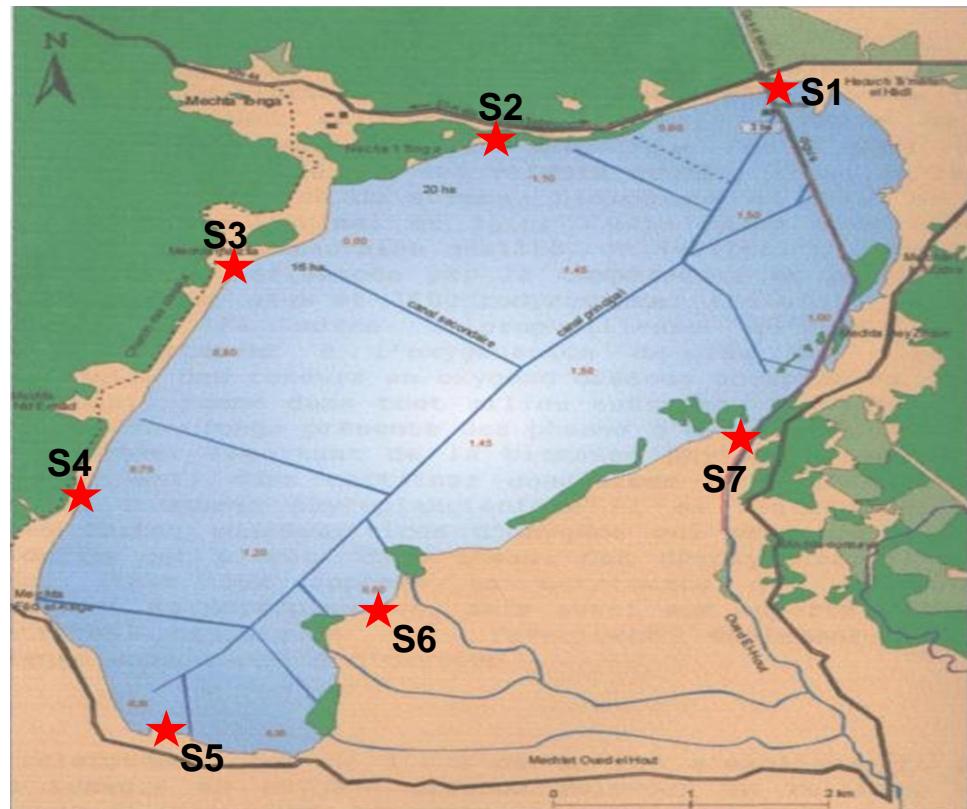


Figure 12 : Localisation des points de prélèvements du lac Tonga

5. Méthodes d'analyses au laboratoire

5.1. Analyse des paramètres physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques de sols ont été réalisées sur la terre fine, broyée et tamisé à 2mm. Les méthodes d'analyses sont les suivantes :

Détermination du pH (eau et KCl)

Mesure électrométrique dans une suspension de terre (1/5) dans l'eau distillée et dans une solution normale de KCl après une agitation pendant 1 heure. Le pH est mesuré par un pH-mètre de paillasse (Hanna 209).

Détermination de la conductivité électrique (CE)

Elle a été mesurée par un conductimètre étalonné (Hanna HI, 8733) selon un rapport sol/solution (1/5), dans de l'eau distillée après une agitation pendant 2 heures. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Détermination de la granulométrie

L'analyse granulométrique a été effectuée selon le protocole standardisé des fractionnements granulométriques en utilisant la technique de la pipette de Robinson.

Détermination de la densité réelle (Dr)

Par la méthode du pycnomètre par le calcul de la densité d'une fraction broyée et pesée du sol. C'est la densité de la fraction solide indépendante des pores.

Détermination de la densité apparente (Da)

La densité apparente est déterminée dans l'eau sur mottes consolidées d'agrégats de sol préalablement recouverts de paraffine, par la méthode de la poussée d'Archimète. C'est la densité de la fraction solide dépendante des pores.

Détermination de la porosité (P)

La porosité (P%) d'un échantillon est égale au rapport exprimé en pourcent, du volume des vides au volume total. A partir des résultats des deux densités, on calcule la porosité totale par la formule suivante :

$$P \% = \frac{Dr - Da}{Dr} \times 100$$

Détermination de la teneur en carbone organique et en matière organique (MO)

La teneur en carbone organique est déterminée par la méthode d'Anne modifiée (Guy, 1978) afin de déterminer la matière organique intervenant dans l'approvisionnement d'éléments nutritifs et ayant une action sur la stabilité structurale des sols et sur la fixation des éléments nutritifs. Dans la méthode d'Anne, 0.5 à 1.5 g de l'échantillon sont oxydés par un excès de bichromate de potassium (10 ml $K_2Cr_2O_7$, 1 N) en présence d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) (20 ml) pendant 30 minutes. On admet que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone que l'on veut doser. L'excès de bichromate inutilisé dans la réaction est dosé par le sel de Mohr. La teneur en matière organique dans le sol est estimée à partir du taux de carbone organique (C) en utilisant la relation suivante:

$$MO \% = C \% \times 1,724$$

Les bases échangeables

Le calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) sont dosés par complexométrie ; le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) par spectrophotométrie à flamme après saturation à l'acétate d'ammonium et extraction au KCl .

Détermination de la teneur en azote ammoniacal

La détermination de la teneur en ammonium est réalisée avec la méthode du réactif Nessler par spectrophotométrie ($\lambda = 425\text{nm}$).

5.2. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux

Les analyses effectuées sur les 26 échantillons d'eaux de surfaces des deux lacs durant les deux campagnes ont porté sur :

*a)- Mesures *in situ* :*

Quatre paramètres physico-chimiques (température, pH, potentiel de redox et la conductivité électrique) ont été mesurés *in situ*, à l'aide d'une valise multi-paramètres de terrain.

b)- Analyses des éléments chimiques :

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire selon les techniques standards (Rodier et al., 2009)

- **Dosages des anions** : Les bicarbonates (HCO_3^-) ont été dosés par titrimétrie par l'acide sulfurique, les chlorures (Cl^-) par titrimétrie (méthode de Mohr) et les sulfates (SO_4^{2-}) par gravimétrie au BaCl_2 .
- **Dosages des cations** : Le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) sont dosés par complexométrie tandis que le sodium (Na^+) et potassium (K^+) par spectrophotométrie à flamme.
- **L'azote ammoniacal (NH_4^+)** : La détermination de la teneur en ammonium est réalisée avec la méthode du réactif Nessler par spectrophotométrie ($\lambda = 425\text{nm}$).

6. Signification des faciès chimiques

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. Dans notre étude, la représentation graphiques qui a été retenue et utilisée c'est le diagramme de Piper.

Le diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles. Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée.

7. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données.

L'ACP est utilisée dans de nombreux domaines pour mettre en évidence les corrélations entre les individus et/ou les variables (**Weening et Erikson, 1994**). L'analyse en composantes principales (ACP) a été également utilisée par de nombreux chercheurs dans le domaine hydrologique et les influences saisonnières et anthropiques (**Da Silva et al., 2001 ; Petersen et al., 2001 ; Brodanjk-Voncina et al., 2002**). L'ACP a été effectuée sur une matrice de données constituée de 12 variables qui caractérisent la qualité physico-chimique des eaux et 11 variables pour les sols des lacs Oubeïra et Tonga sur l'ensemble de 52 individus (soit 26 individus eaux et 26 individus sols pour chaque lac) répartis selon deux périodes.



Chapitre III.

Résultats

&

Discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

Partie 1: Etude pédologique

1. Le lac Oubeïra

1. 1. Caractéristiques physiques des sols du lac Oubeïra

1.1.1. La densité apparente (Da)

La densité apparente d'un sol, correspond à son poids par unité de volume du sol sec en place. Elle permet de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines et la réserve en eau du sol (**Yoro et Godo, 1990**). Les valeurs de la densité apparente sont proches les unes des autres et sont comprise entre 0,60 g/cm³ et 1.88 g/cm³ avec une moyenne de 1.60 g/cm³ (Fig.13).

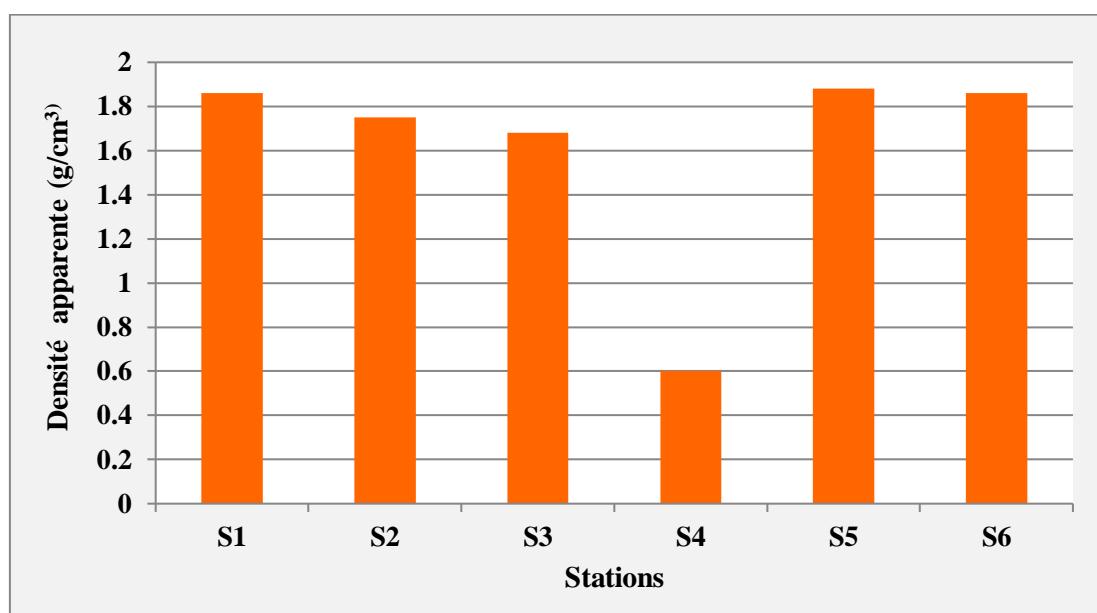


Figure 13: Variations de la densité apparente des sols du lac Oubeïra.

1.1.2. La densité réelle (Dr)

Elle exprime la densité des éléments constituant la phase solide du sol. La densité réelle est toujours supérieure à celle de la densité apparente, elle oscille entre 1.40 et 2.62 g/cm³ avec une moyenne de 2.19 g/cm³ (Fig.14).

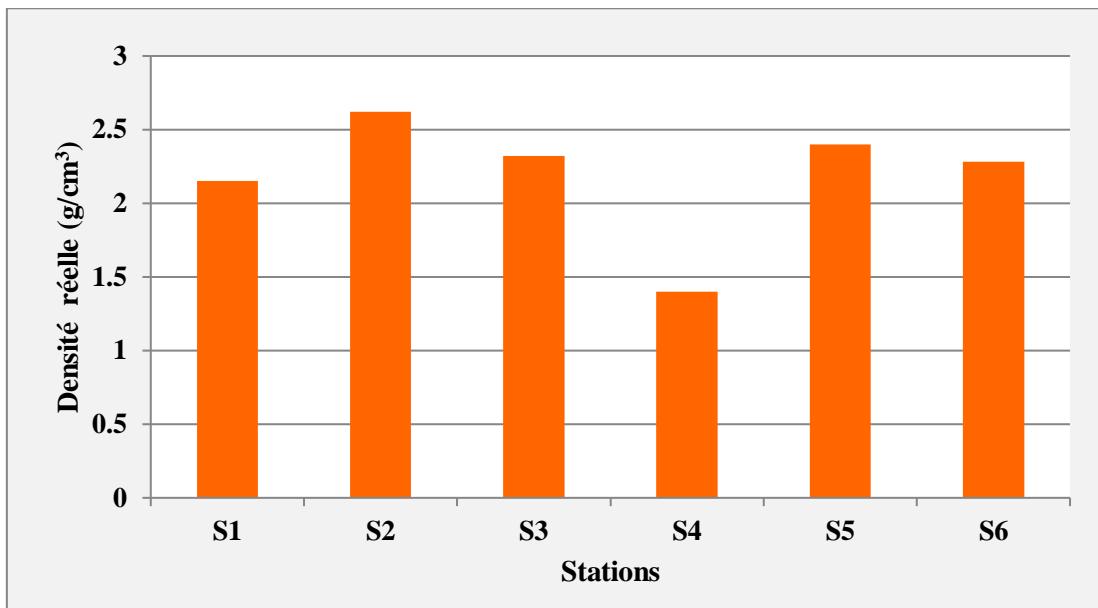


Figure 14: Variations de la densité réelle des sols du lac Oubeïra.

1.1.3. La porosité (P%)

La connaissance des densités réelle et apparente nous permet de calculer la porosité des sols. D'après les résultats obtenus, nous observons que la porosité totale des sols varie entre 13.48% et 57.14% avec une moyenne de 28.58% (Fig.15). Si l'on se réfère à l'échelle proposée par **Cadet** (*in Benmeziane, 2015*), la porosité totale des sols varie entre les classes des sols poreux à très poreux (Tab. 8).

Tableau 8: Echelle d'interprétation du pourcentage de la porosité des sols d'après **Cadot (2005)** (*in Benmeziane, 2015*)

| Porosité (%) | Appréciation agronomique |
|----------------------|--------------------------|
| 2% < Porosité < 5% | Sol peu poreux |
| 5% < Porosité < 15% | Sol moyennement poreux |
| 15% < Porosité < 40% | Sol poreux |
| Porosité > 40% | Sol très poreux |

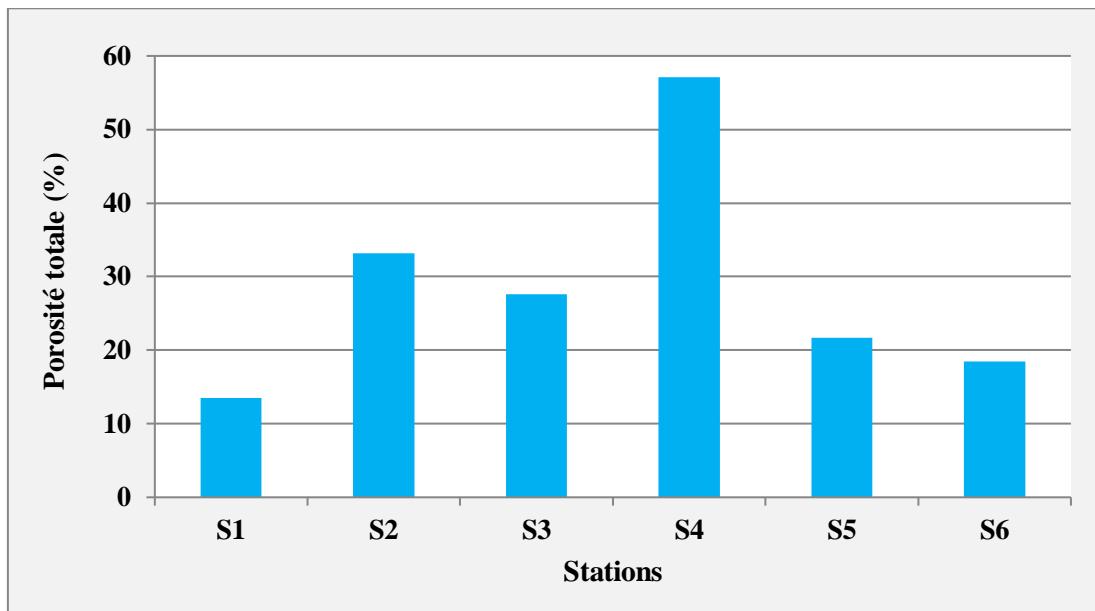


Figure 15: Variations de la porosité des sols du lac Oubeira.

1.1.4. La granulométrie

L'analyse granulométrique réalisée s'est focalisée sur la détermination de trois fractions : sables, limons et argiles à partir des données fournies par l'analyse des échantillons. Ces fractions déterminent la grosseur des pores ou espaces entre les particules de sol et d'air et dans un large mesure, la capacité à retenir l'humidité et les éléments nutritifs.

Les résultats des analyses granulométriques en fonction des classes texturales sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 9).

Tableau 9: Composition granulométrique des sols du lac Oubeïra.

| Sites | Sable % | Limon % | Argile % | Texture |
|-------------|---------|---------|----------|-----------------------|
| S1 | 44.70 | 22.30 | 32.00 | Limono-argilo-sableux |
| S2 | 57.70 | 30.30 | 12.00 | Limono-sableux |
| S3 | 64.40 | 23.60 | 12.00 | Limono-sableux |
| S4 | 89.80 | 10.20 | 0.00 | sableux |
| S5 | 51.85 | 40.15 | 8.00 | Limono-sableux |
| S6 | 37.30 | 54.70 | 8.00 | Limoneux fins |
| Moy. | 57.62 | 30.20 | 12.00 | / |

La classe texturale de l'échantillon analysé y est déterminée en fonction du positionnement des valeurs en argiles, sables et limons totaux, le point d'intersection des trois droites correspondantes aux trois classe détermine alors la classe texturale.

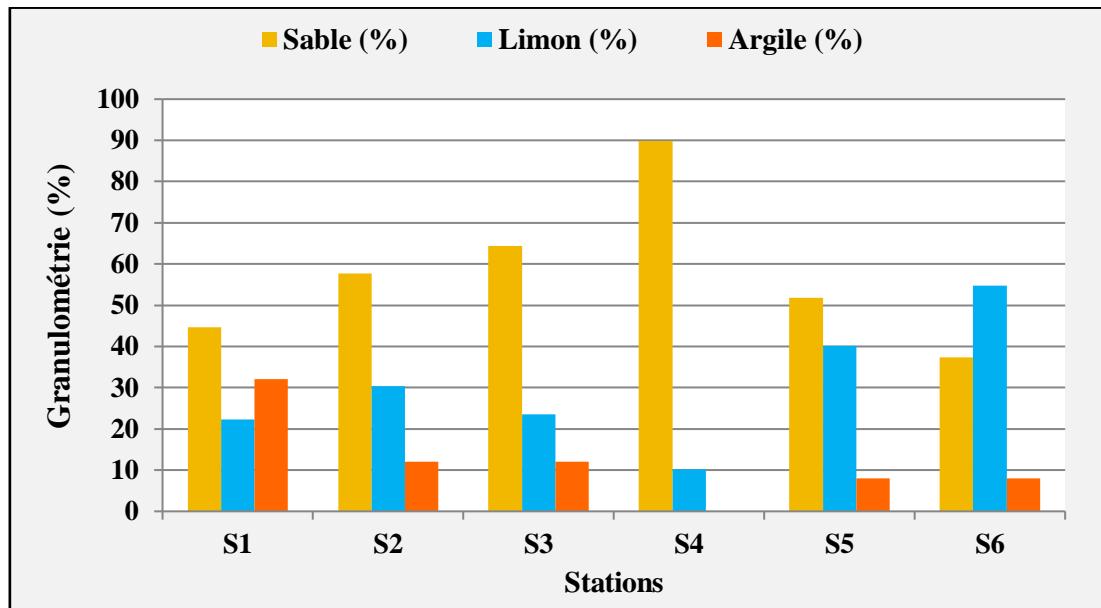


Figure 16: Composition granulométrique des sols du lac Oubeïra.

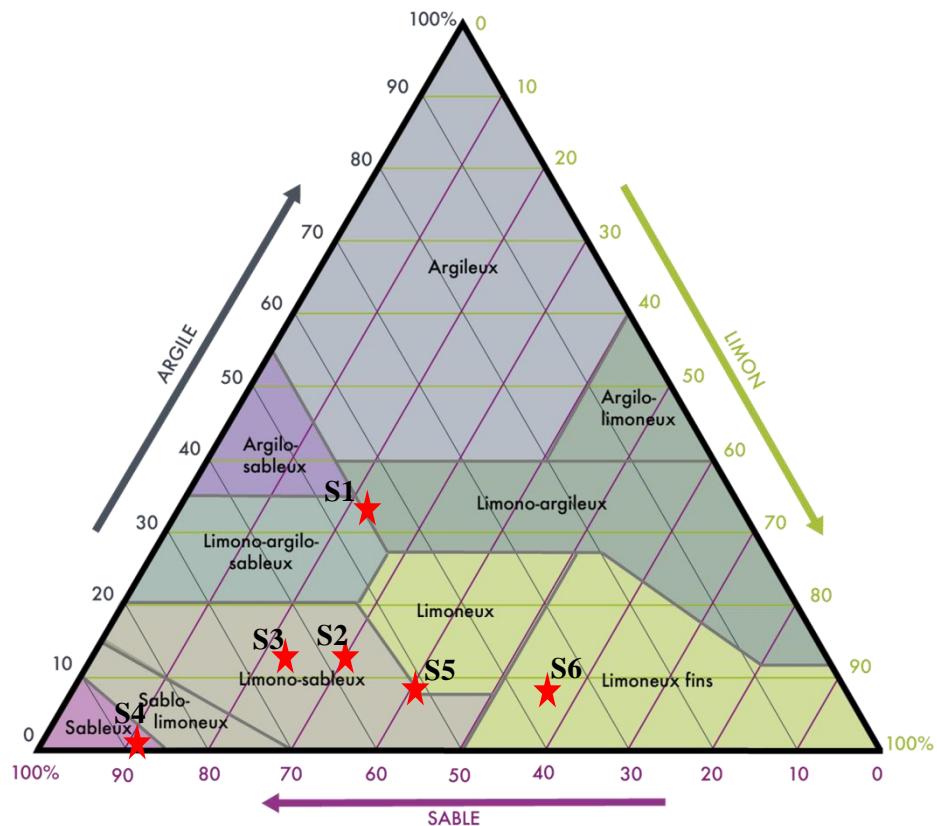


Figure 17: Texture des sols du lac Oubeïra

La représentation des résultats des analyses granulométriques sur le triangle de texture (Fig.17) montre la dominance de la texture limono-sableuse à sableuse dans la majorité des échantillons avec des valeurs moyennes de 57.62 % (sable) et 30.20 % (limon) (Tab. 9). Cette texture est bien aéré, pauvre en réserve d'eau ce qui ne permet pas de retenir les éléments chimiques nutritifs ou toxiques. Alors que la fraction argileuse se présente avec des faibles valeurs, soit une moyenne de 12.00 %.

1. 2. Caractéristiques physico-chimiques des sols du lac Oubeïra

1.2.1. Le pH

L'acidité ou l'alcalinité d'un sol se mesure par un indice appelé pH (potentiel hydrogène). Il exprime la teneur en ions H^+ libres dans une solution du sol, dans l'eau pure ou additionnée de chlorure de potassium (KCl 1 N).

Le pHeau et pH_{KCl} sont d'un grand intérêt pour la majorité des sols hormis les sols neutres et surtout carbonatés, puisque $\Delta pH = pHeau - pH_{KCl}$ révèle l'acidité potentielle ou l'acidité d'échange.

Tableau 10: Variations des pH des sols du lac Oubeïra.

| Campagnes | Mai 2016 | | | Septembre 2016 | | |
|-------------|----------|-------|-------------------|----------------|-------|-------------------|
| | Sites | pHeau | pH _{KCl} | ΔpH | pHeau | pH _{KCl} |
| S1 | 7.15 | 6.84 | 0.31 | 7.12 | 6.60 | 0.52 |
| S2 | 7.50 | 6.93 | 0.57 | 7.19 | 6.39 | 0.8 |
| S3 | 6.53 | 5.99 | 0.54 | 6.53 | 6.16 | 0.37 |
| S4 | 7.91 | 7.41 | 0.50 | 7.16 | 6.42 | 0.74 |
| S5 | 7.43 | 6.84 | 0.59 | 7.00 | 6.41 | 0.59 |
| S6 | 6.92 | 6.55 | 0.37 | 6.94 | 6.50 | 0.44 |
| Moy. | 7.24 | 6.76 | 0.48 | 6.99 | 6.41 | 0.57 |

1.2.1.1. Le pH eau

Il correspond à l'acidité active ou acidité réelle du sol. Durant la première campagne mai 2016, les valeurs du pHeau varient entre 6.53 et 7.91 avec une moyenne de 7.24 (Fig.18). Par contre elles oscillent entre 6.53 et 7.19 avec une moyenne de 6.99 durant la deuxième

campagne septembre 2016. Ces résultats montrent que nous sommes en présence d'un sol neutre à légèrement alcalin (Annexe.1).

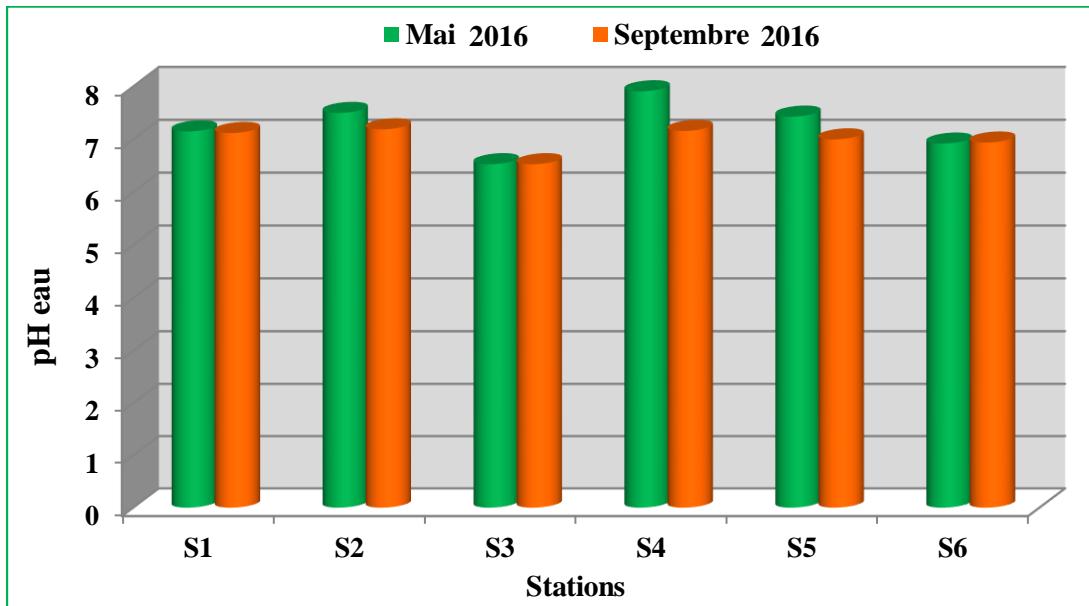


Figure 18: Variations spatio-temporelles du pH_{eau} des solutions de sols du lac Oubeïra.

1.2.1.2. Le pH KCl

Il correspond à la concentration en hydrogène du sol obtenu après ajout de KCl, ce dernier a pour effet de chasser les H⁺ fixés sur le complexe argilo-humique, ce qui permet de déterminer l'acidité totale ou acidité de réserve du sol.

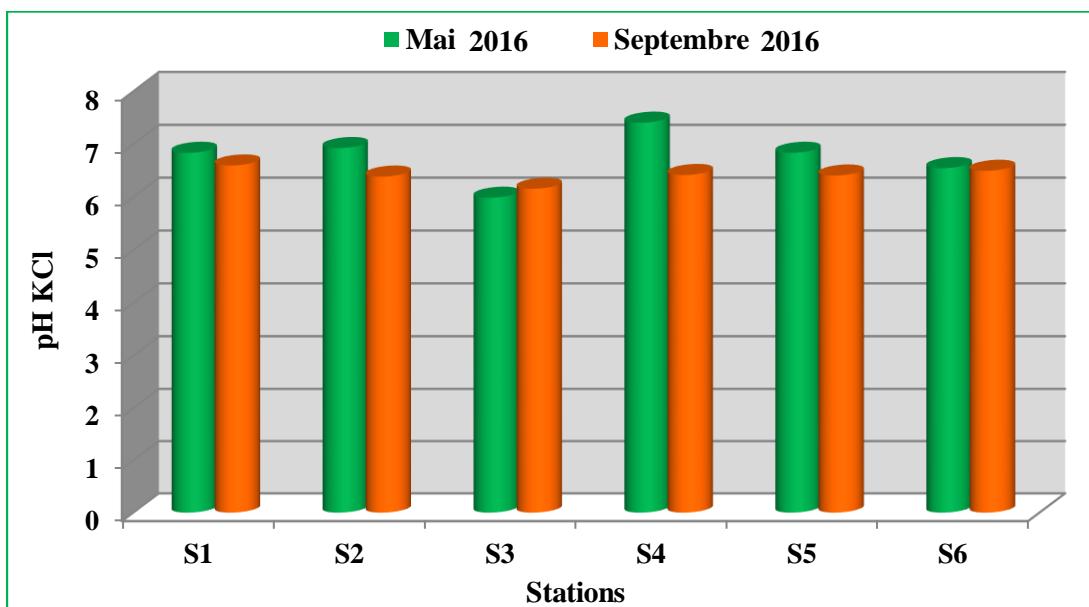


Figure 19: Variations spatio-temporelles du pH_{KCl} des solutions de sols du lac Oubeïra.

Le pH_{KCl} est en effet toujours inférieur au pHeau et l'écart entre les deux valeurs d'un même échantillon traduit l'acidité de réserve du sol.

- Un écart < 0.5 indique une acidité de réserve faible.
- $0.6 < \text{écart} < 1$ indique une acidité de réserve moyenne.
- Un écart > 1 indique une acidité de réserve élevée.

Les valeurs du pH_{KCl} obtenu dans la présente étude varient entre 5.99 et 7.41 avec une moyenne de 6.76 durant la première campagne, et entre 6.16 et 6.60 avec une moyenne de 6.41 durant la deuxième campagne (Fig.19)

Les valeurs de l'écart sont comprises entre 0.31 et 0.59 avec une moyenne de 0.48 durant la campagne de mai 2016, et entre 0.37 et 0.80 avec une moyenne de 0.57 durant la campagne septembre 2016 témoignant d'une faible acidité de réserve.

1.2.2. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est un critère d'évaluation du taux de salinité d'un sol. La conductivité électrique de la solution de sol du lac Oubeïra varie entre 124 et 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 183.08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la campagne mai 2016, et de 162 à 429.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 271.58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la campagne septembre 2016 (Fig.20) ; nous remarquons une augmentation de la conductivité électrique en saison sèche (septembre 2016) qu'en saison humide (mai 2016) dans la majorité des échantillons.

La conductivité électrique des sols du lac Oubeïra à dilution 1/5 est dans la classe non salée (0 à 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Annexe.2).

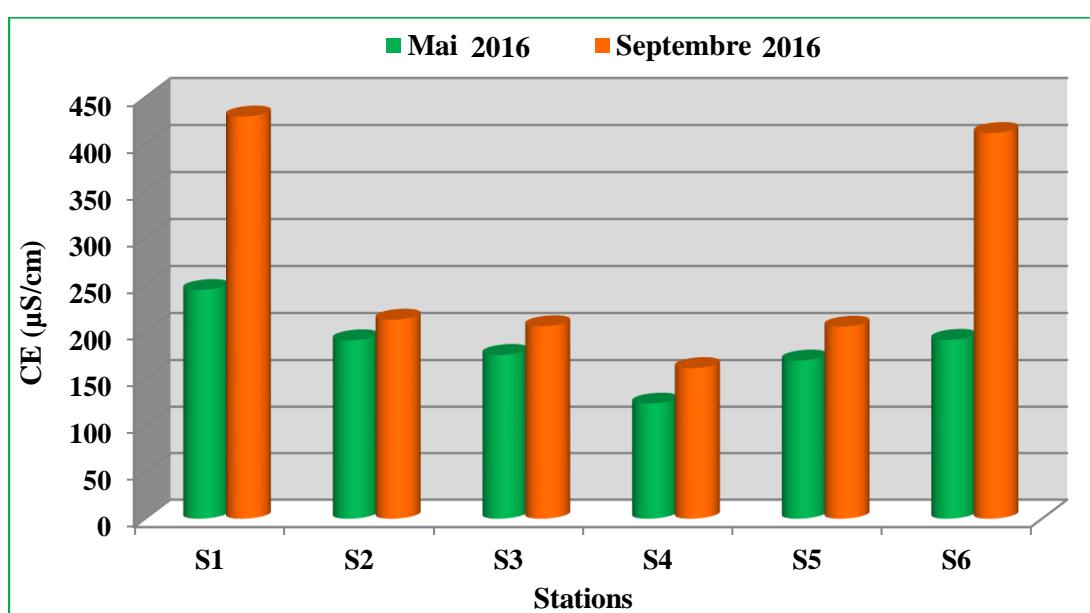


Figure 20: Variations de la conductivité électrique dans les sols du lac Oubeïra.

1.2.3. Le carbone organique (C%)

La détermination du carbone organique total nous permet d'évaluer la quantité de la matière organique présente dans l'échantillon de sol.

Les résultats d'analyse montrent que les teneurs en carbone varient entre 0.29 et 0.99% avec une moyenne de 0.64 % pour la campagne mai 2016, et entre 1.21 et 2.90 % avec une moyenne de 2.24 % pour la campagne septembre 2016 (Fig.21).

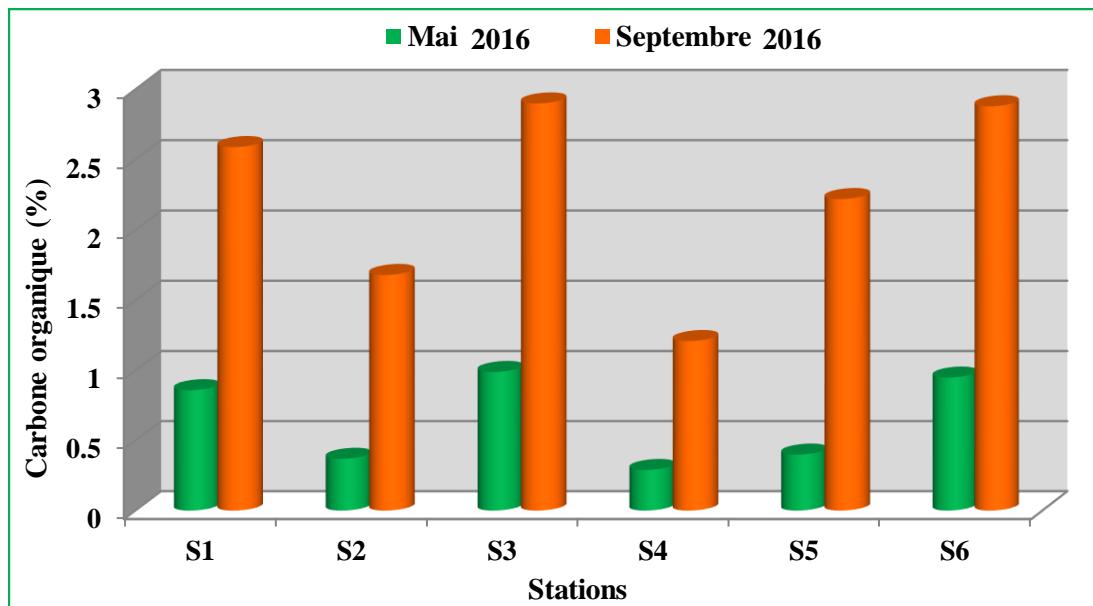


Figure 21: Evolution spatio-temporelle du carbone organique dans les sols du lac Oubeïra.

1.2.4. La matière organique (MO%)

La matière organique joue un rôle important dans les fonctionnements physiques, chimiques et biologiques du sol. Elle améliore la cohérence des éléments structuraux, favorise la rétention en eau utile, participe au stockage réversible des éléments nutritionnels, limite le développement de certains parasites, augmente l'aération du sol. Un sol bien pourvu en matière organique offrira un milieu bien plus favorable au développement des cultures et moins sensible aux aléas climatiques (site : <http://www.lano.asso.fr>).

D'une manière générale, les teneurs en matière organique dans la deuxième campagne septembre 2016 sont supérieures à celles de la première campagne mai 2016. Elles oscillent entre 0.50 % et 1.72 % dans la première et entre 2.08 % et 4.99 % pour la deuxième, avec des moyennes d'ordre de 1.11 % et 3.86 % successivement pour les deux campagnes (Fig.22).

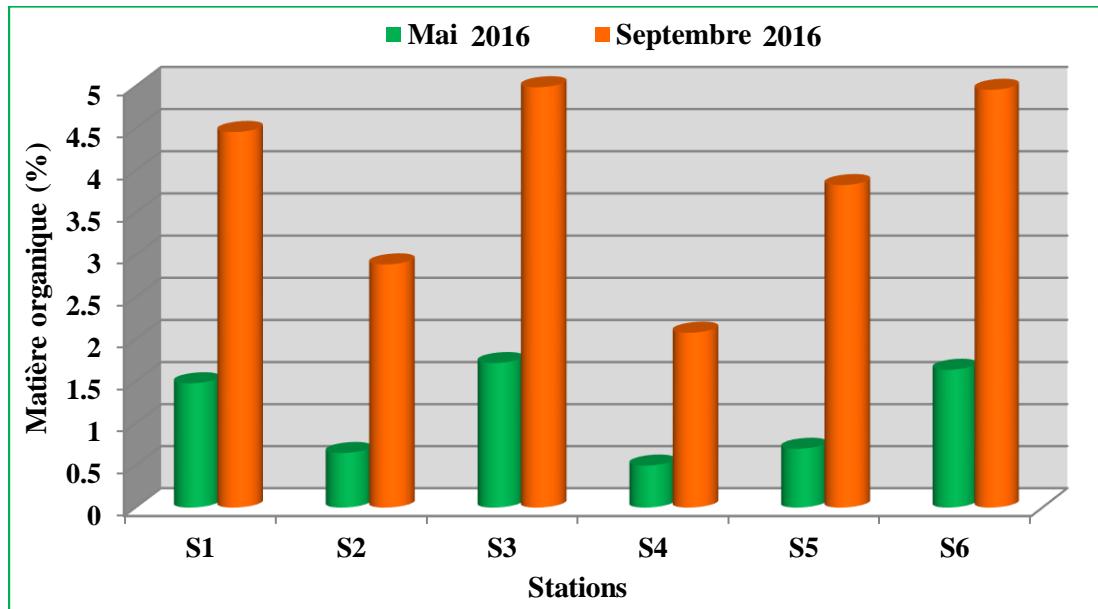


Figure 22: Evolution spatio-temporelle de la matière organique dans les sols du lac Oubeïra.

Tableau 11: Echelle d'interprétation du taux de la matière organique (*in Benmeziane, 2015*)

| Teneurs en matière organique (MO%) | | Interprétation |
|------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| MO < 1.4 % | | Sol très pauvre en MO |
| 1.4 % ≤ MO < 2.0 % | | Sol pauvre en MO |
| 2.0 % ≤ MO < 3.0 % | Argile < 22 % | Sol bien pourvu en MO |
| | 22 % < Argile < 30% | Sol moyennement pourvu en MO |
| 3.0 % ≤ MO < 4.0 % | | Sol bien pourvu en MO |
| MO ≥ 4.0 % | | Teneur élevée en MO |

Si l'on se réfère les teneurs de nos sols avec l'échelle d'interprétation du taux de la matière organique (Tab.11), le taux de MO des sols du lac Oubeïra varie entre sol pauvre en MO durant la période hivernale et sol bien pourvu à élevée en MO durant la période estivale.

1.2.5. Les bases échangeables

Les bases échangeables sont la somme des quantités de cations basiques échangeables, fixés sur le complexe adsorbant à un moment donné. Elles jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'activité biologique générale, et de la structure du sol. Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) sont des nutriments de base, absorbés souvent en quantité élevée par la plante sous la forme de sels solubles. La dynamique de ces sels dans le sol est liée au fonctionnement hydrique et structural des sols, aux conditions hydriques et géochimiques aux limites du profil de sol, soit principalement à l'apport d'eau d'irrigation et aux fluctuations de nappe (Douaoui et al., 2004)

Tableau 12: Résultats des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Oubeïra.

| Campagnes | Mai 2016 | | | | Septembre 2016 | | | |
|--------------------------------------|------------------|------------------|---------------|--------------|------------------|------------------|---------------|--------------|
| | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | K^+ |
| Bases échangeables (meq/100g) | | | | | | | | |
| Min. | 1.17 | 0.82 | 0.04 | 0.13 | 0.87 | 0.99 | 0.38 | 0.13 |
| Max. | 8.60 | 2.20 | 0.89 | 0.23 | 4.02 | 2.63 | 0.90 | 0.39 |
| Moy. | 5.34 | 1.22 | 0.35 | 0.18 | 2.36 | 1.55 | 0.63 | 0.22 |

1.2.5.1. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Les teneurs maximales en calcium sont enregistrées durant la saison hivernale au niveau des stations (S1, S4, S5 et S6) avec une concentration moyenne d'ordre de 5.34 et 2.63 meq/100g respectivement pour la campagne mai 2016 et la campagne septembre 2016 (Fig.23-A).

1.2.5.2. Magnésium (Mg^{2+})

La concentration en magnésium est comprise entre 0.82 et 2.20 meq/100g avec une moyenne de 1.22 meq/100g durant la première campagne mai 2016 et entre 0.99 et 2.63 meq/100g avec une moyenne de 1.55 meq/100g durant la campagne septembre 2016 (Fig.23-B). Les teneurs les plus élevées sont enregistrées durant la période estivale par rapport à la période hivernale surtout au niveau des stations (S1 et S3) cela est due à l'effet de l'irrigation estivale des terres qui entourent ces stations.

1.2.5.3. Sodium (Na^+)

L'évolution temporelle est caractérisée par une supériorité des teneurs de sodium en campagne septembre 2016 qu'en campagne mai 2016 avec des moyennes respectivement de 0.90 meq/100g et 0.59 meq/100g (Fig.23-C) La concentration en sodium échangeable la plus élevée est enregistrée au niveau de la station (S1), atteignant un maximum de 0.90 meq/100g durant la saison estivale correspondant à une teneur en sodium échangeable élevée (Annexe.4).

1.2.5.4. Potassium (K^+)

Le potassium est absorbé par la plante sous sa forme ionique K^+ . Il est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des carbohydrates. Leur variation dépend aux propriétés physico-chimiques du sol.

La concentration en potassium est la plus faible par rapport aux autres bases et ne présente pas de grande variabilité et oscille de 0.13 à 0.23 meq/100g avec une moyenne 0.18 meq/100g durant la campagne mai 2016 et de 0.13 à 0.39 meq/100g avec une moyenne de 0.22 meq/100g durant la campagne septembre 2016 (Tab.12 et fig.23-D).

1.2.5.5. Ammonium (NH_4^+)

L'azote ammoniacal est une forme transitoire. Les ions NH_4^+ , issus de l'ammonification, sont retenus sur le complexe adsorbant. Certains de ces ions sont fixés plus ou moins durablement entre les feuillets d'argile. La plupart sont oxydés par les bactéries nitrifiantes (Nitrobacter, Nitrosomonas) et transformés en nitrates.

D'une manière générale, les teneurs en ammonium dans la première campagne mai 2016 sont supérieures à celles de la deuxième campagne septembre 2016. Elles oscillent entre 0.95 et 4.22 mg/l dans la première et entre 1.28 et 1.43 mg/l pour la deuxième, avec des moyennes d'ordre de 2.69 et 1.36 mg/l successivement pour les deux campagnes (mai et septembre 2016) (Fig.23-E).

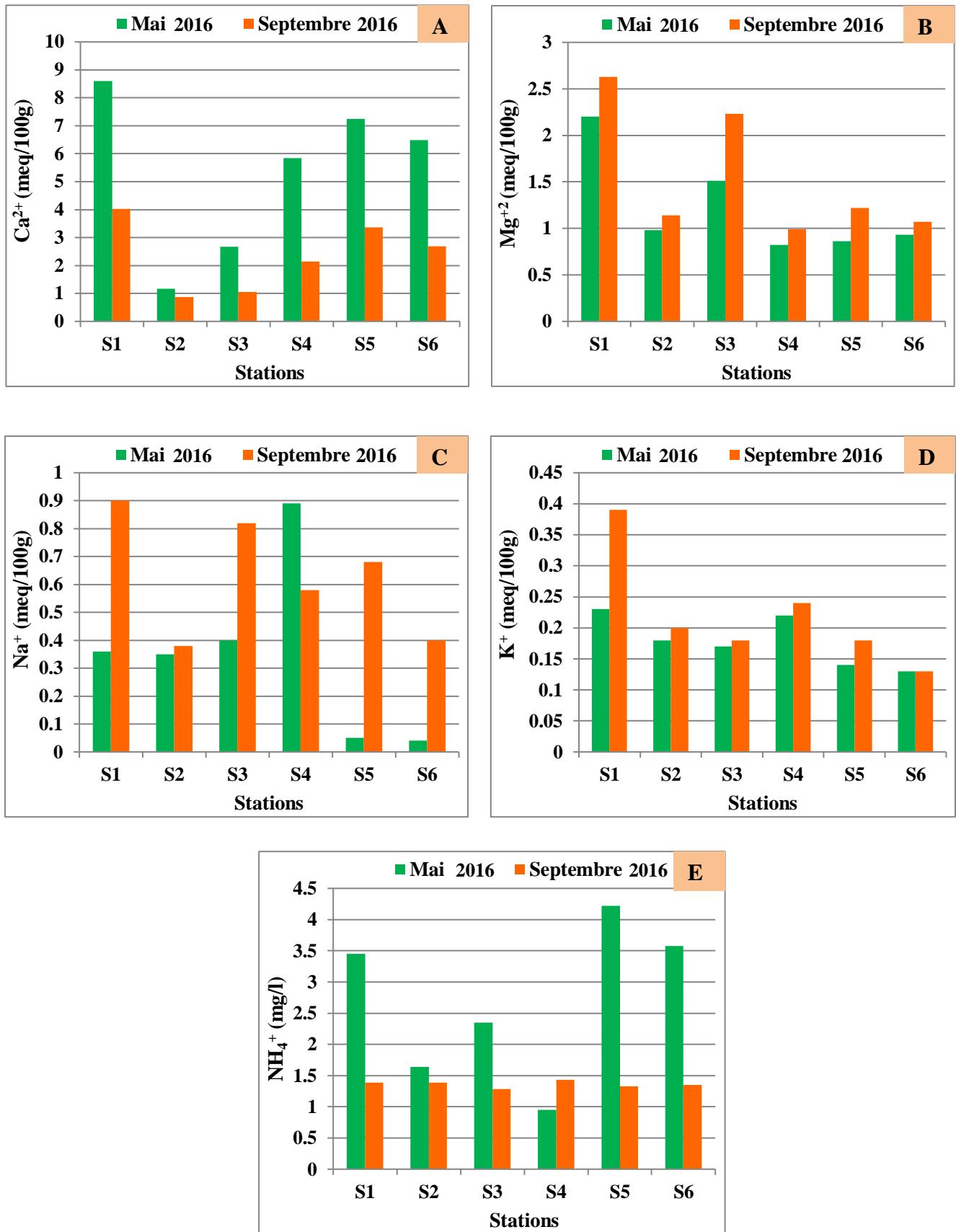


Figure 23: Evolution spatio-temporelle des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Oubeïra.

1.3. Etude statistique des sols du lac Oubeïra

1.3.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Dans le but d'établir une relation entre les différents paramètres étudiés et pour mieux évaluer l'effet des activités anthropiques sur la qualité des sols du lac Oubeïra, un traitement statistique ACP (analyse en composantes principales) a été appliqué à l'ensemble des paramètres en deux campagnes.

Notre ACP a été effectué sur une matrice de données constituée de 11 variables (pH eau, pH KCl, conductivité électrique, calcium, magnésium, sodium, potassium, ammonium, carbone organique, matière organique et porosité), et 12 individus répartis selon deux campagnes (mai et septembre 2016)

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs propres et la variance expliquée par les premiers axes factoriels. Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Le premier axe principal (Dim.1) explique 42.54 % de la variation totale, (Dim.2) explique 18.45% de la variance totale à une valeur propre, le pourcentage cumulé est 60.99 % (Tab.13).

Tableau 13: Variance des cinq premiers axes.

| Axes | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeurs propres | 5.53 | 2.40 | 2.28 | 1.20 | 0.86 |
| % Variance | 42.54 | 18.45 | 17.53 | 9.23 | 6.62 |
| % cumulé | 42.54 | 60.99 | 78.52 | 87.76 | 94.37 |

1.3.2. Etude des variables

Le tableau 14 montre la contribution des variables étudiées sur l'expression des axes (corrélation entre les variables initiales et les axes factoriels).

Les variables (pHeau, pHKCl, CE, Mg²⁺, Na⁺, Carbone et matière organique) sont bien corrélées à l'axe principal Dim.1 et exprime une variabilité de 42.54%. L'axe Dim.2 exprime une variabilité de 18.45% et combine l'expression des variables (K⁺, NH₄⁺ et porosité).

Tableau 14: Corrélation des variables aux principaux axes

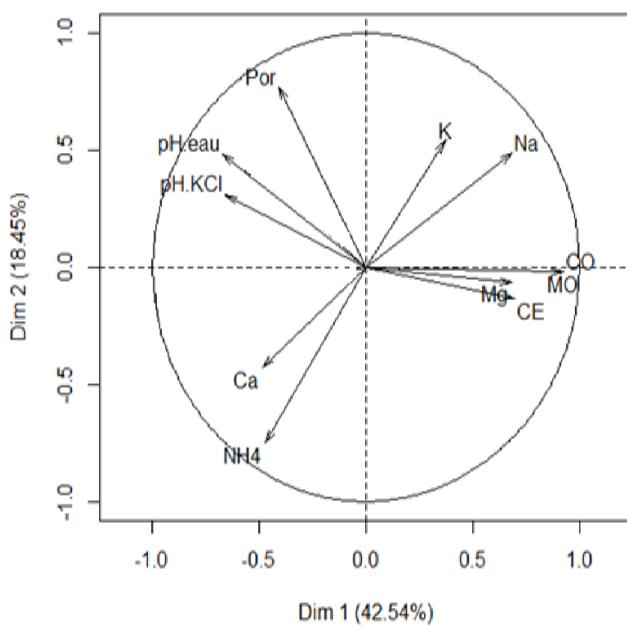
| Variables | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|------------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|
| pHeau | -0.67 | 0.48 | 0.30 | -0.44 | 0.05 |
| pHKCl | -0.66 | 0.31 | 0.46 | -0.46 | 0.08 |
| CE | 0.70 | -0.13 | 0.41 | -0.37 | 0.24 |
| Ca ⁺² | -0.49 | -0.43 | 0.68 | 0.02 | -0.04 |
| Mg ⁺² | 0.68 | -0.07 | 0.56 | 0.21 | -0.30 |
| Na ⁺ | 0.69 | 0.49 | 0.45 | 0.24 | 0.06 |
| K ⁺ | 0.37 | 0.54 | 0.65 | 0.10 | -0.31 |
| NH ₄ ⁺ | -0.47 | -0.75 | 0.28 | 0.24 | -0.11 |
| CO | 0.92 | -0.02 | -0.03 | -0.05 | 0.34 |
| MO | 0.92 | -0.02 | -0.03 | -0.05 | 0.34 |
| P% | -0.41 | 0.77 | -0.38 | 0.12 | -0.05 |

1.3.3. Représentation graphique de l'ACP des variables

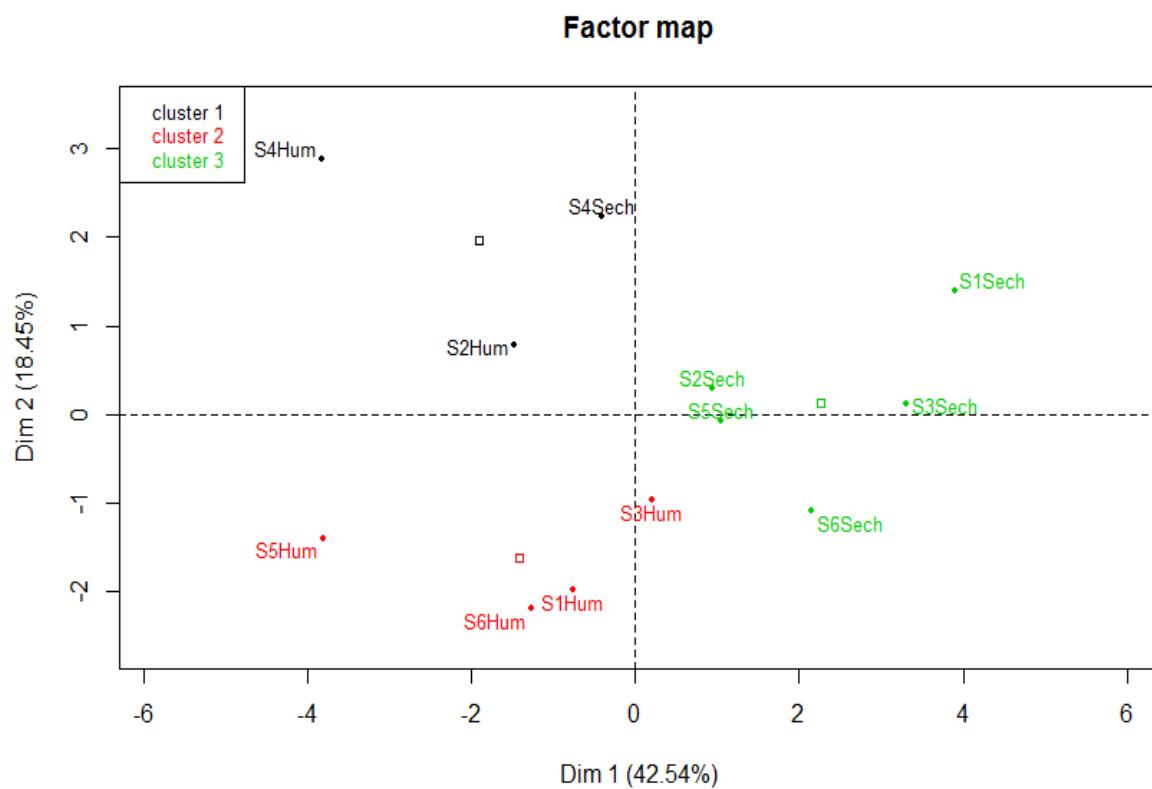
La projection des variables (Fig.24-A), montre un regroupement sur l'axe Dim.1, (42.54% de la variance), représenté par : CE, Na⁺, Mg⁺², Carbone et matière organique avec des valeurs positives qui s'oppose au pHeau, pHKCl, Ca⁺² et NH₄⁺.

La projection des individus sur l'axe Dim.1, montre que les sols de la période sèche (septembre 2016) se caractérisent par des teneurs élevées en carbone et matière organique avec une CE importante. A l'opposé, se trouve les sites de la période humide (mai 2016) qui représente des solutions de sols à caractère basique pour le premier groupe (S2 et S4), et le deuxième groupe représenté par les stations (S1, S3, S5 et S6) caractérise les sols riche en ammonium. Il traduit la pollution organique (Fig.24-B).

L'axe Dim.2, (18.45 % de la variance) est représenté par deux groupes opposés. Le premier groupe avec des valeurs positives est représenté par la porosité (P%) et le K⁺, et le deuxième groupe avec des valeurs négatives est représenté par : Ca⁺² et NH₄⁺. L'axe Dim.2, représente les sols riches en potassium résultant d'une fixation de ce dernier par certains minéraux argileux



A- Projection des variables selon le plan (1X2)



B- Projection des individus selon le plan (1X2)

Figure 24 : ACP des sols du lac Oubeïra selon le plan des dimensions (1X2)

2. Le lac Tonga

2. 1. Caractéristiques physiques des sols du lac Tonga

2.1.1. La densité apparente (Da)

La densité apparente diminue avec la teneur du sol en humus (**Duthil, 1971**), elle oscille entre 0.63 g/cm³ (S7) et 1.86 g/cm³ au niveau du site S4 avec une moyenne de 1.40 g/cm³ (Fig.25).

2.1.2. La densité réelle (Dr)

Les résultats obtenus montrent que la majorité des sols étudiés ont une densité réelle $Dr < 2$ g/cm³, ces sols contiennent beaucoup de matière organique (Fig.26). Elles varient entre 1.33 et 2.62 g/cm³ avec une moyenne de 1.91 g/cm³.

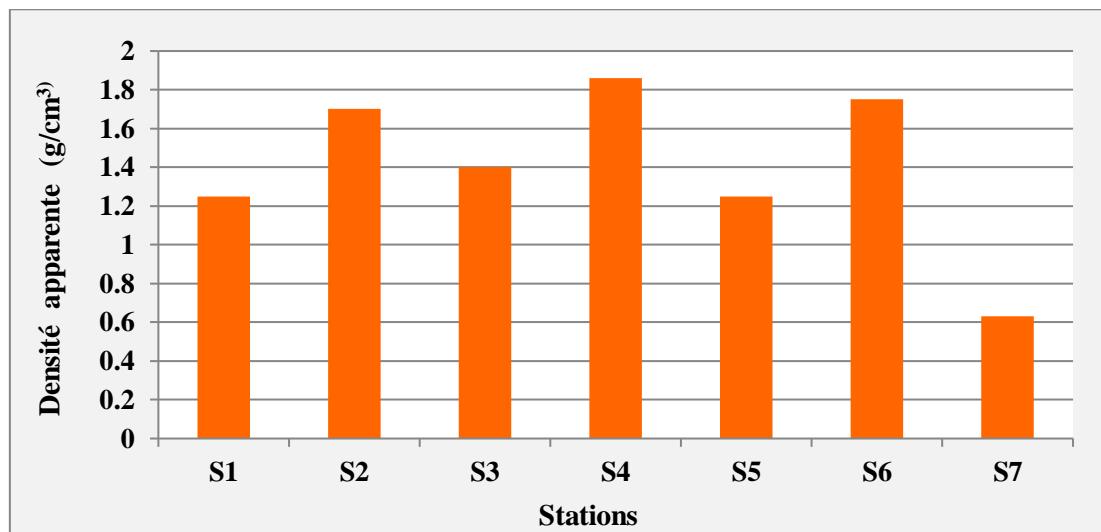


Figure 25: Variations de la densité apparente des sols du lac Tonga.

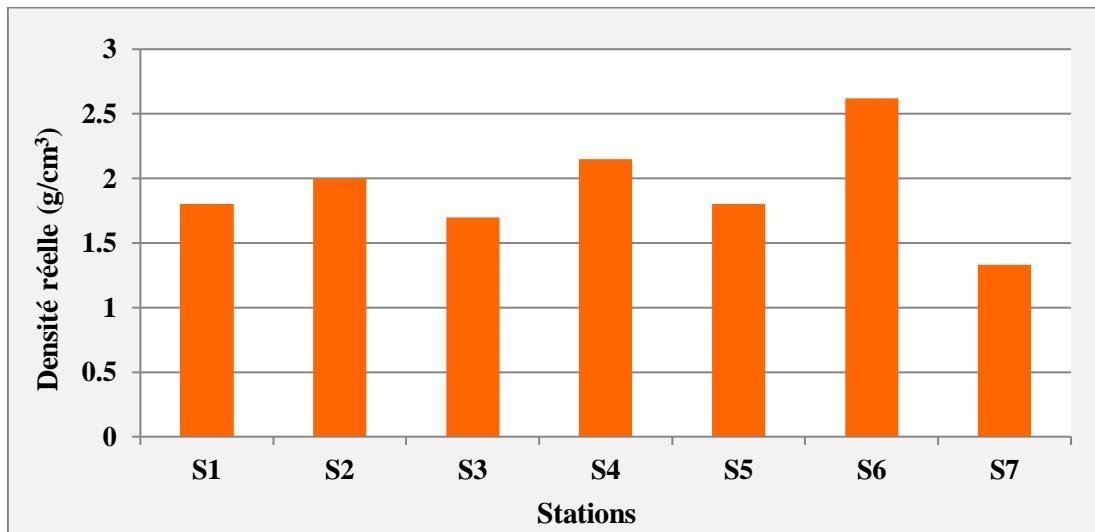


Figure 26: Variations de la densité réelle des sols du lac Tonga.

2.1.3. La porosité (P%)

La porosité du sol, représente le volume des pores d'un sol et leurs dimensions. Elle dépend de la composition granulométrique et de la structure .La majorité des sols ont une porosité forte à assez forte, elle varie entre 15.00 et 52.63% avec une moyenne de 27.57%. La bonne porosité est liée à la présence de la matière organique qui influe sur les propriétés physiques du sol (Fig. 27).

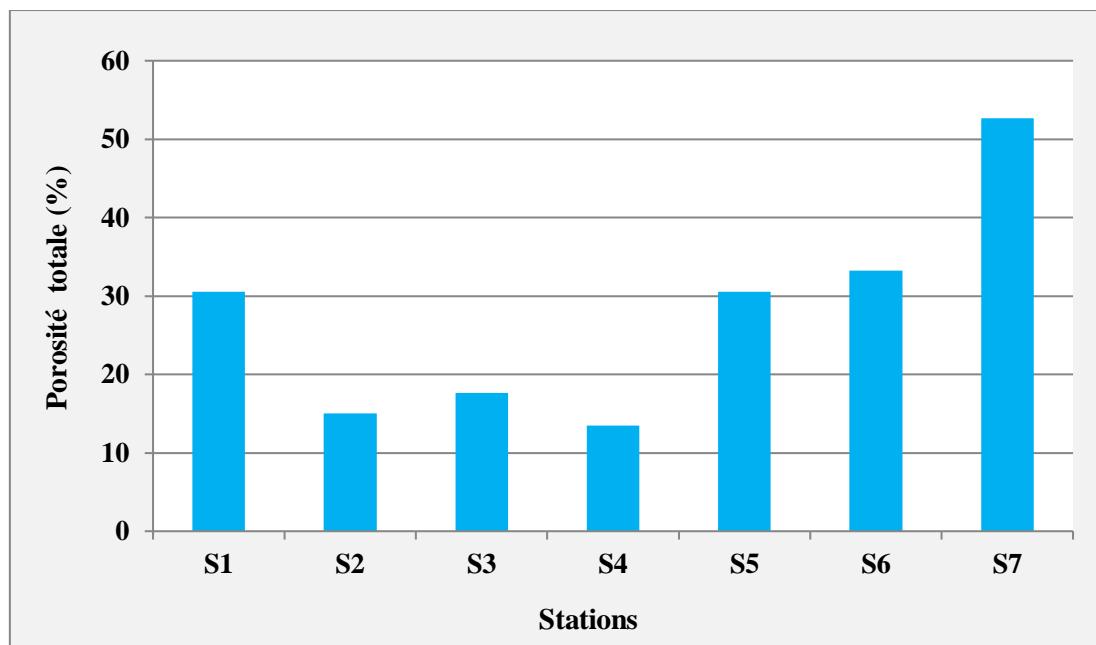


Figure 27: Variations de la porosité totale des sols du lac Tonga.

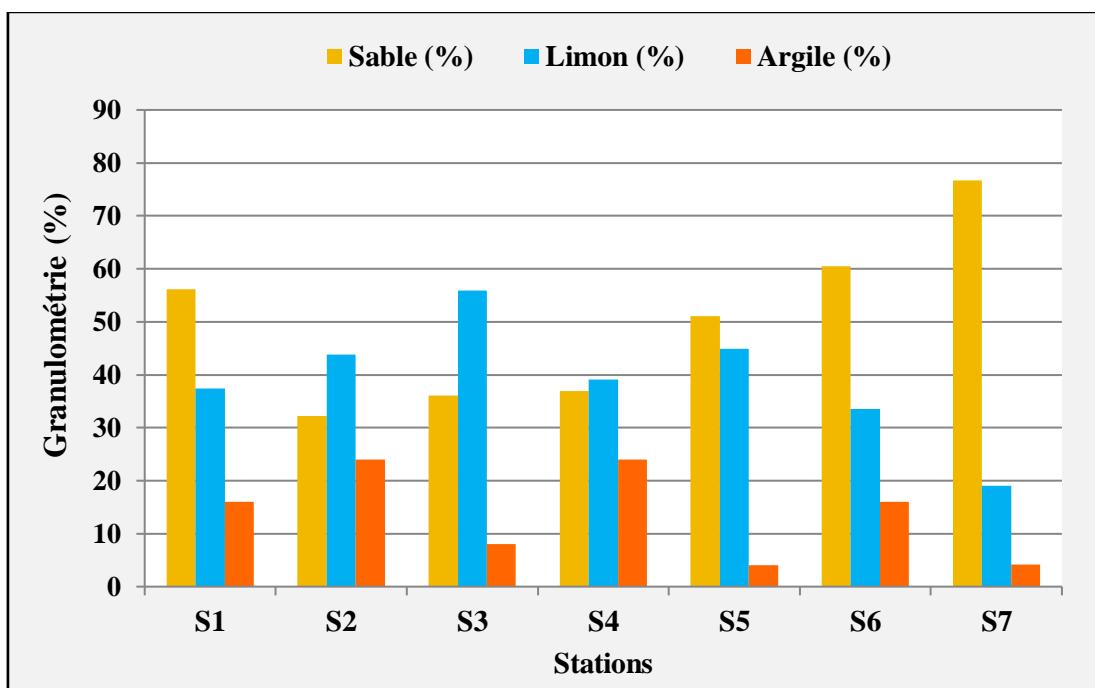
2.1.4. La granulométrie

La détermination de la texture présente un fort intérêt pratique car elle permet de fournir des renseignements sur les propriétés fonctionnelles du sol, soit le rapport du sol et de l'eau, l'aération, le complexe absorbant. (**Duchaufour, 1995**).

Les types de sol rencontrés présentent un équilibre entre les sables et les limons avec des valeurs moyenne d'ordre de 49.96 % et 39.08 % successivement et de faible teneur en argile (Tab.15 et fig.28). Ces valeurs permettent de définir une texture limono-sableuse (Fig.29).

Tableau 15: Composition granulométrique des sols du lac Tonga

| Sites | Sable % | Limon % | Argile % | Texture |
|------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| S1 | 56.17 | 37.83 | 16.00 | Limono-sableux |
| S2 | 32.24 | 43.76 | 24.00 | limoneux |
| S3 | 36.10 | 55.9 | 8.00 | Limoneux fins |
| S4 | 36.95 | 39.05 | 24.00 | limoneux |
| S5 | 51.10 | 44.90 | 4.00 | Limono-sableux |
| S6 | 60.50 | 33.50 | 16.00 | Limono-sableux |
| S7 | 76.72 | 19.08 | 4.20 | Sablo-limoneux |
| Moy | 49.96 | 39.08 | 13.74 | / |


Figure 28: Composition granulométrique des sols du lac Tonga.

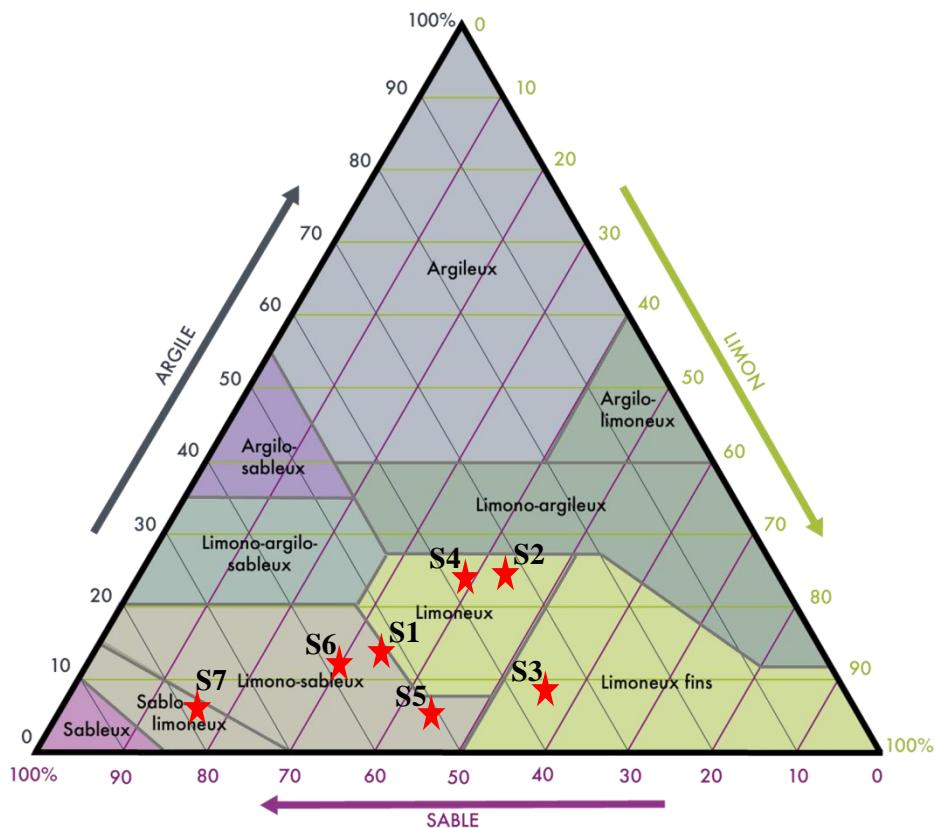


Figure 29: Texture des sols du lac Tonga.

2. 2. Caractéristiques physico-chimiques des sols du lac Tonga

2.2.1. Le pH

2.2.1.1. Le pH eau

Durant la première campagne mai 2016, les valeurs du pHeau varient entre 6.72 et 8.46 ; alors que celle de la deuxième campagne septembre 2016 oscillent entre 6.14 et 7.16 (Fig.30).

Le pH des sols varie entre les classes faiblement acides à légèrement alcalins durant les deux campagnes (Annexe.1).

2.2.1.2. Le pH KCl

L'évolution temporelle est marquée par un léger abaissement du pH_{KCl} de la période sèche (septembre 2016) par rapport à la période humide (mai 2016). Cette variation est due au phénomène de dilution par les précipitations de la période hivernale (Fig.31).

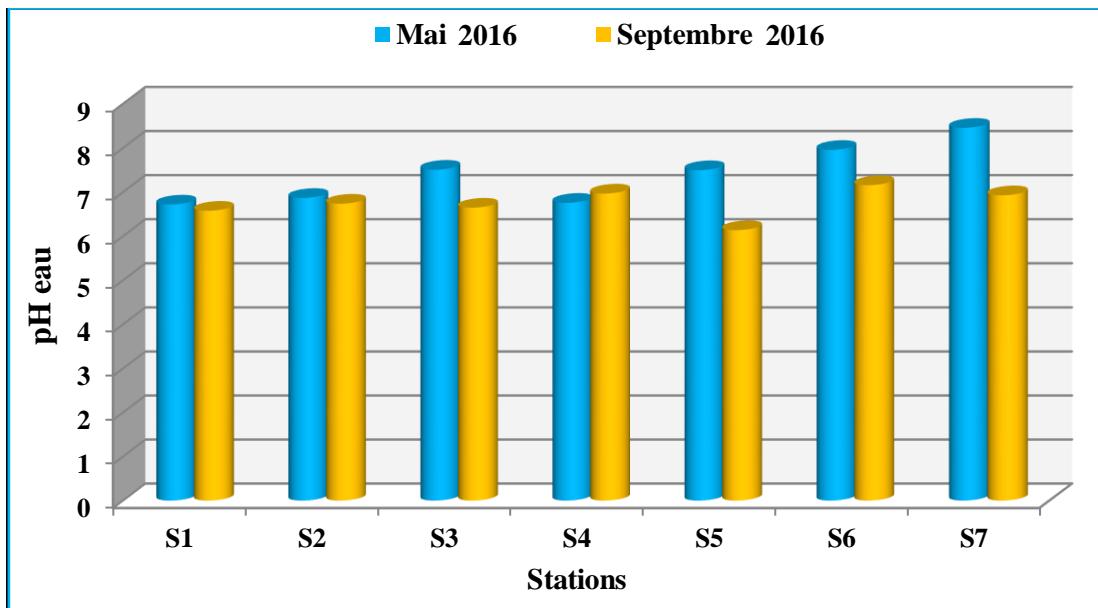


Figure 30: Variations spatio-temporelles du pH_{ea} des solutions de sols du lac Tonga.

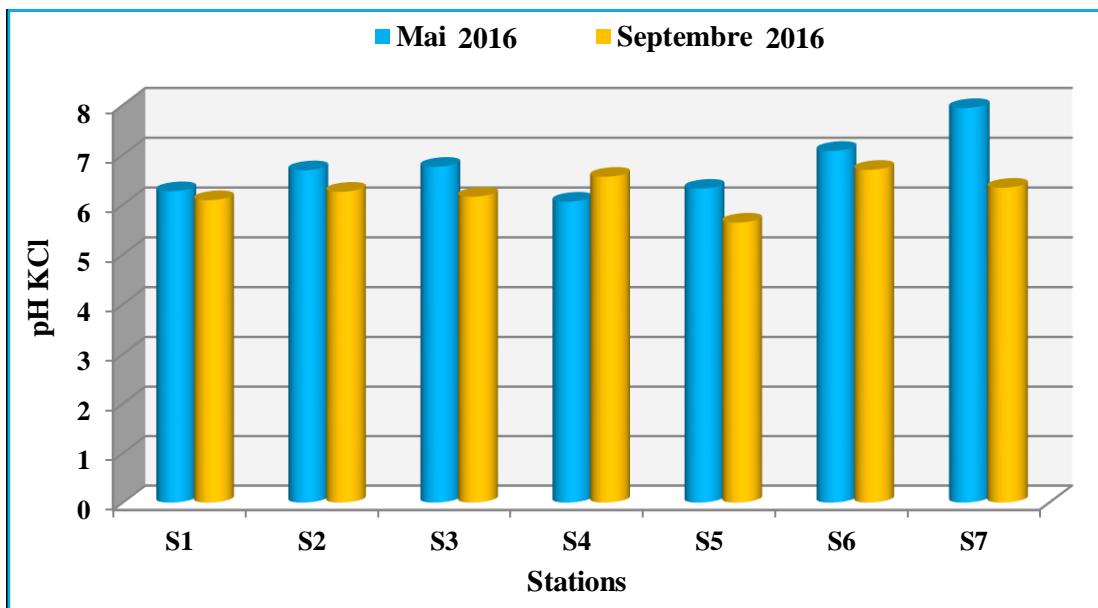


Figure 31: Variations spatio-temporelles du pH_{KCl} des solutions de sols du lac Tonga.

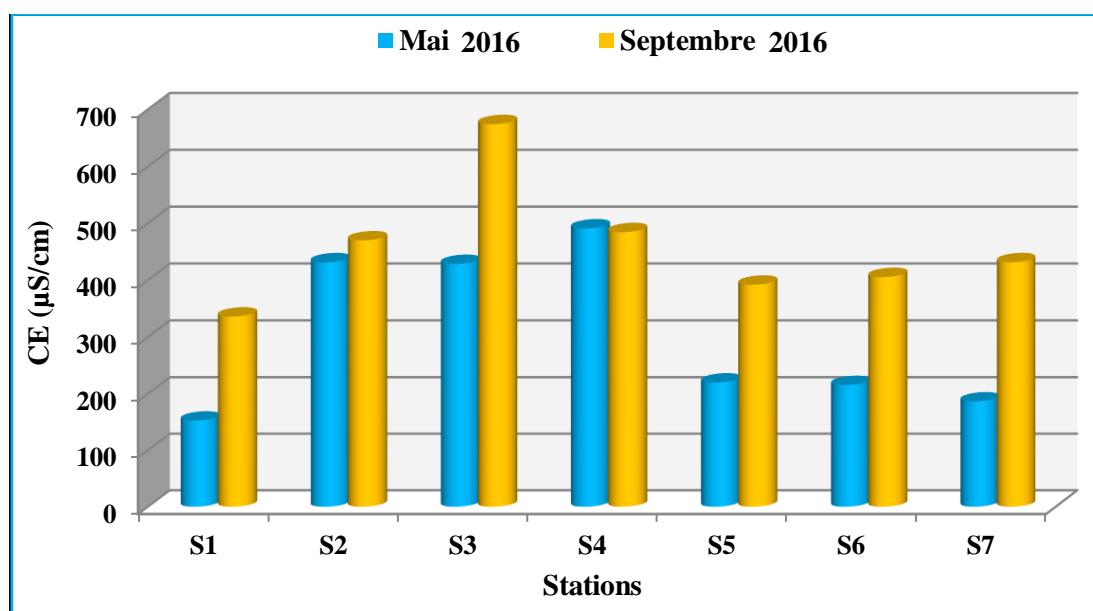
L'écart entre les deux valeurs d'un même échantillon (Tab.16) varie entre 0.18 et 1.18 avec une moyenne de 0.66 durant la campagne mai 2016 témoignant d'une acidité de réserve moyenne et entre 0.41 et 0.59 avec une moyenne de 0.48 durant la campagne septembre 2016 témoignant d'une faible acidité de réserve.

Tableau 16: Ecart entre le pHeau et le pH_{KCl} des sols du lac Tonga

| ΔpH | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | Moy |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Mai 2016 | 0.45 | 0.18 | 0.75 | 0.70 | 1.18 | 0.88 | 0.52 | 0.66 |
| Septembre 2016 | 0.49 | 0.48 | 0.49 | 0.41 | 0.50 | 0.46 | 0.59 | 0.48 |

2.2.2. La conductivité électrique

La conductivité électrique est proportionnelle à la quantité des sels minéraux dissous dans l'eau. Elle varie considérablement entre les deux périodes avec des valeurs plus importantes en été qu'en hiver. La conductivité électrique des sols étudiés du lac Tonga varie entre 152.5 et 491 µS/cm avec une moyenne de 303.64 µS/cm pour la première campagne, et 336 à 674.5 µS/cm avec une moyenne de 456.28 µS/cm pour la deuxième campagne (Fig.32). L'évolution temporelle de la conductivité électrique nous indique que les sols de la région du lac Tonga sont non salés (Annexe.2).


Figure 32: Variations de la conductivité électrique dans les sols du lac Tonga.

2.2.3. Le carbone organique

Dans nos échantillons, le taux de carbone organique est compris entre 0.24% et 1.80 % avec une moyenne de 1.84 % pour la campagne mai 2016, et entre 1.09 et 2.92% avec une moyenne de 2.14 % pour la campagne septembre 2016 (Fig.33), ce qui indique une variation très large de carbone organique dans l'espace et en fonction de la saison.

2.2.4. La matière organique

La comparaison des concentrations saisonnières du taux de MO se révèle plus fortes en période sèche qu'en période humide. Les teneurs varient entre 1.88% (S7) et 5.02% (S1) avec une moyenne de 3.69 % durant la période sèche (septembre 2016) et entre 0.42 % (S7) et 3.10 % (S1) avec une moyenne de 2.55 % lors de la période humide (mai 2016) (Fig.34).

Les taux de MO (>3 %) dans la majorité des échantillons de sol du lac Tonga indiquent un sol riche en MO surtout durant la deuxième campagne septembre 2016.

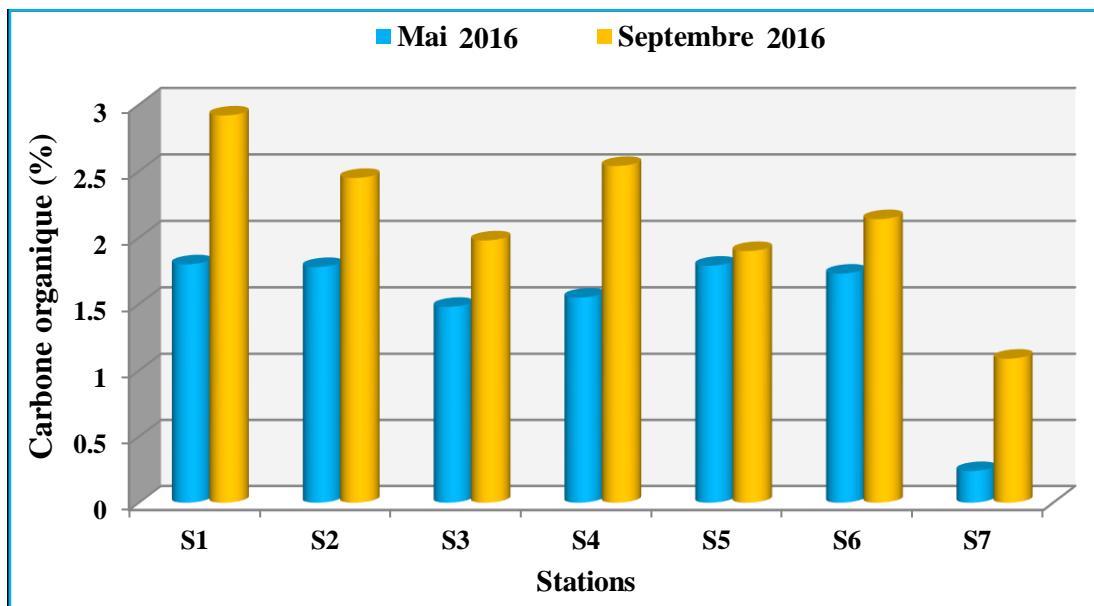


Figure 33: Evolution spatio-temporelle du carbone organique dans les sols du lac Tonga.

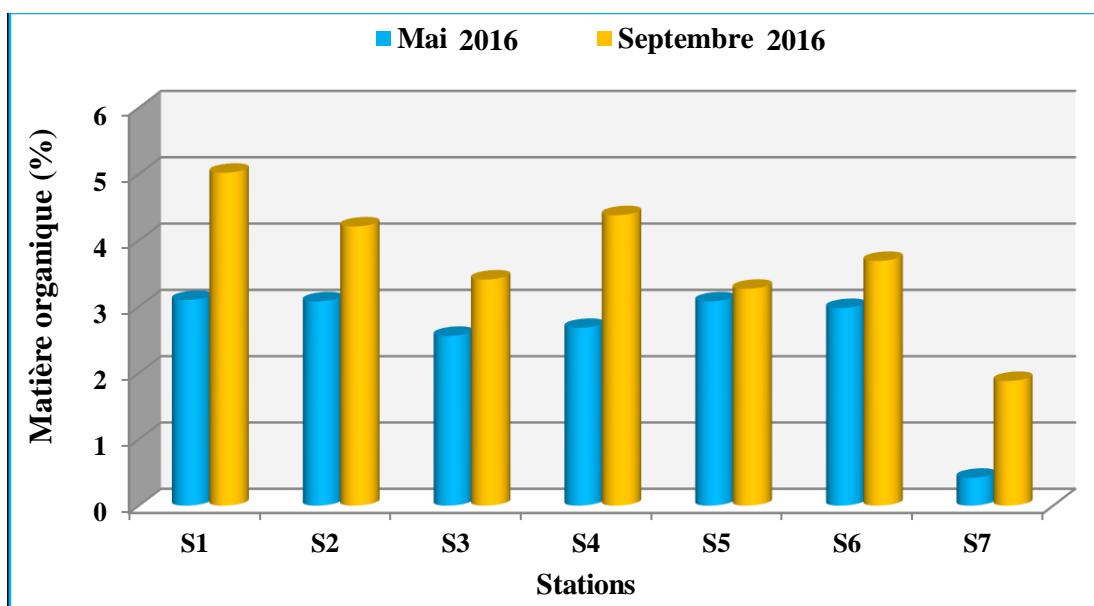


Figure 34: Evolution spatio-temporelle de la matière organique dans les sols du lac Tonga.

2.2.5. Les bases échangeables

Les résultats des bases échangeables mesurés sur une solution de sol sont récapitulés dans le tableau suivant (Tab.17).

Tableau 17: Résultats des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Tonga.

| Campagnes | Bases échangeables | Minimum | Maximum | Moyenne |
|----------------|-----------------------------|---------|---------|---------|
| Mai 2016 | Ca^{2+} (meq/100g) | 7.72 | 13.99 | 11.63 |
| | Mg^{2+} (meq/100g) | 2.25 | 4.35 | 3.39 |
| | Na^+ (meq/100g) | 0.25 | 0.98 | 0.68 |
| | K^+ (meq/100g) | 0.20 | 0.55 | 0.34 |
| | NH_4^+ (mg/l) | 0.36 | 3.39 | 1.68 |
| Septembre 2016 | Ca^{2+} (meq/100g) | 3.51 | 7.55 | 6.08 |
| | Mg^{2+} (meq/100g) | 2.61 | 5.18 | 3.65 |
| | Na^+ (meq/100g) | 0.47 | 1.88 | 1.08 |
| | K^+ (meq/100g) | 0.29 | 0.89 | 0.54 |
| | NH_4^+ (mg/l) | 1.14 | 1.41 | 1.26 |

2.2.5.1. Calcium (Ca^{2+})

Tous les sels de calcium présents dans le sol (carbonates, chlorures, nitrates, phosphates, sulfates, humâtes) peuvent contribuer à la nutrition des plantes en calcium (**Delas, 2000**)

⊕ **Mai 2016 :** au cours de cette campagne, la plupart des concentrations en calcium oscillent entre 7.72 et 13.99 meq/100g avec une moyenne de 11.63 meq/100g (Fig. 35-A). Les teneurs élevées en calcium sont enregistrées durant cette campagne et se localisent aux stations S2, S4, et S7.

⊕ **Septembre 2016 :** Les teneurs en calcium varient entre 3.51 et 7.55 meq/100g avec une moyenne de 6.08 meq/100g (Fig.35-A). Durant cette campagne, nous observons une forte diminution remarquable des concentrations en calcium dans la majorité des échantillons de sol correspondant à la teneur modérée en calcium (Annexe.4).

2.2.5.2. Magnésium

- ⊕ **Mai 2016 :** La variation de la concentration en calcium entre les différents sites est comprise entre 2.55 et 4.35 meq/100g avec une moyenne de 3.39 meq/100g (Fig.35-B). L'évolution temporelle est marquée par une supériorité des teneurs d'un site à l'autre.
- ⊕ **Septembre 2016 :** durant cette période la répartition des concentrations est presque analogue à la période précédente où les teneurs varient entre 2.61 et 5.18 meq/100g avec une moyenne de 3.65 meq/100g (Fig.35-B). Cependant, nous observons une légère diminution des teneurs, particulièrement aux stations S1, S6 et S7.

2.2.5.3. Sodium

- ⊕ **Mai 2016 :** durant cette campagne, une légère variation des teneurs en sodium échangeable est enregistrée dans la majorité de nos sols variant entre 0.25 et 0.98 meq/100g avec une moyenne de 0.68 meq/100g (Fig.35-C). Les faibles concentrations sont enregistrées dans les sites S1 et S7 (à proximité des vannes et de oued El Hout).
- ⊕ **Septembre 2016 :** les teneurs en sodium varient entre 0.47 et 1.88 meq/100g avec une moyenne de 1.08 meq/100g. Elles sont supérieures dans la majorité des stations avec des pics enregistrés au niveau des sites S1 et S4 (Fig.35-C). En effet, il existe une grande supériorité des teneurs en sodium échangeable durant cette campagne par rapport à celle de mai 2016.

2.2.5.4. Potassium

Les teneurs en potassium durant les deux campagnes varient entre 0.20 et 0.55 meq/100g, avec une moyenne de 0.34 meq/100g au mois de mai et de 0.29 à 0.89 meq/100g au mois de septembre 2016 (Fig.35-D). Nous observons une légère augmentation des concentrations dans la majorité des échantillons de sol durant la deuxième campagne, elles sont supérieures à 0.7 meq/100g en S4 dans la région Sud-Ouest du lac Tonga (Annexe.4).

2.2.5.5. Ammonium

Les teneurs enregistrées dans les stations du lac Tonga varient entre une teneur minimale de l'ordre de 0.36 mg/l et une teneur maximale de l'ordre de 3.39 mg/l. Les teneurs les plus élevées sont relevées durant la campagne mai 2016 avec une moyenne de 1.68 mg/l et les plus faibles durant la campagne septembre 2016 avec une moyenne de 1.26 mg/l (Fig.35-E).

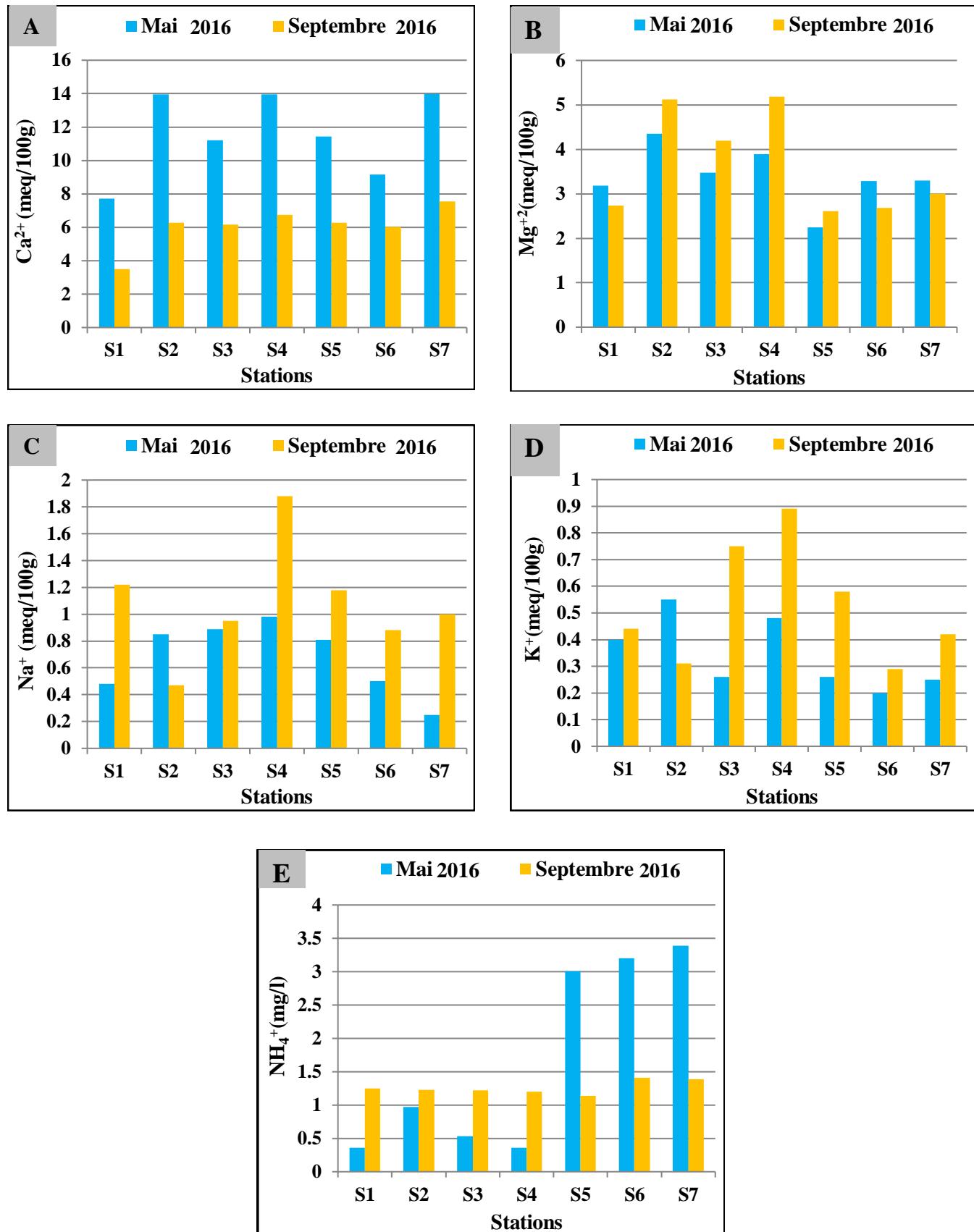


Figure 35: Evolution spatio-temporelle des bases échangeables dans les solutions de sols du lac Tonga.

2.3. Etude statistique des sols du lac Tonga

2.3.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales des sols du lac Tonga a été effectué sur un tableau de données constituée de 11 variables (pH eau, pH KCl, conductivité électrique, calcium, magnésium, sodium, potassium, ammonium, carbone organique, matière organique et porosité), et 14 individus qui se distribuent sur deux campagnes d'échantillonnages, mai et septembre 2016

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs propres et la variance expliquée par les premiers axes factoriels (Tab.18). Il permet de constater que plus de la moitié de l'information (63.18 %) est contenue dans le premier plan factoriel (1X2). plusieurs relations entre les éléments chimiques ont été observées. Pour le traitement, nous avons choisi deux axes qui expriment 63.18 % des renseignements.

Tableau 18: Variance des cinq premiers axes.

| Axes | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeurs propres | 6.13 | 2.08 | 1.64 | 1.07 | 0.87 |
| % Variance | 47.16 | 16.02 | 12.61 | 8.26 | 6.70 |
| % cumulé | 47.16 | 63.18 | 75.78 | 84.04 | 90.73 |

2.3.2. Etude des variables

Le tableau 19 de la corrélation des variables aux principaux axes, montre que les variables sont mieux représentées avec l'axe1 (Dim.1).

On remarque que toutes les variables sont bien corrélées à l'axe principal (Dim.1), à l'exception des variables CE et Mg^{2+} , qui sont corrélées avec le deuxième axe principal (Dim.2).

Tableau 19 : Corrélation des variables aux principaux axes

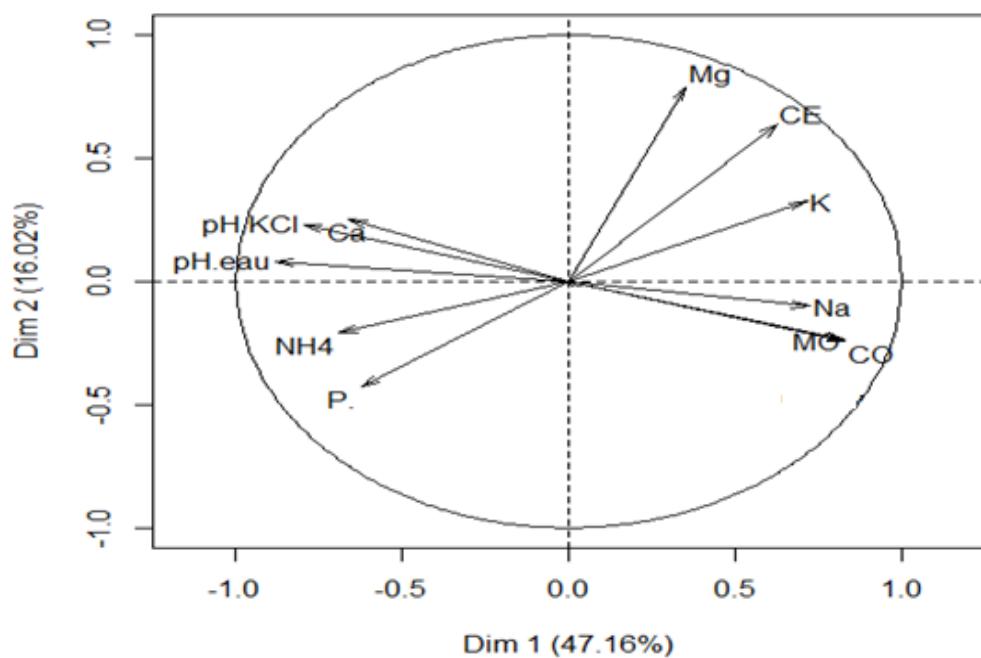
| Variables | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-------|-------|-------|
| pHeau | 0.88 | 0.08 | -0.07 | 0.37 | 0.08 |
| pHKCl | -0.80 | 0.23 | 0.05 | 0.43 | 0.23 |
| CE | 0.62 | 0.64 | 0.20 | -0.10 | -0.21 |
| Ca²⁺ | -0.66 | 0.26 | -0.50 | -0.27 | 0.31 |
| Mg²⁺ | 0.35 | 0.79 | -0.15 | 0.34 | 0.15 |
| Na⁺ | 0.72 | -0.10 | 0.52 | 0.05 | 0.16 |
| K⁺ | 0.72 | 0.33 | 0.24 | 0.04 | 0.45 |
| NH₄⁺ | -0.69 | -0.21 | 0.16 | 0.50 | -0.06 |
| CO | 0.83 | -0.24 | -0.24 | 0.38 | -0.20 |
| MO | 0.83 | -0.24 | -0.24 | 0.38 | -0.20 |
| P% | -0.62 | -0.43 | 0.63 | -0.06 | 0.01 |

2.3.3. Représentation graphique de l'ACP des variables

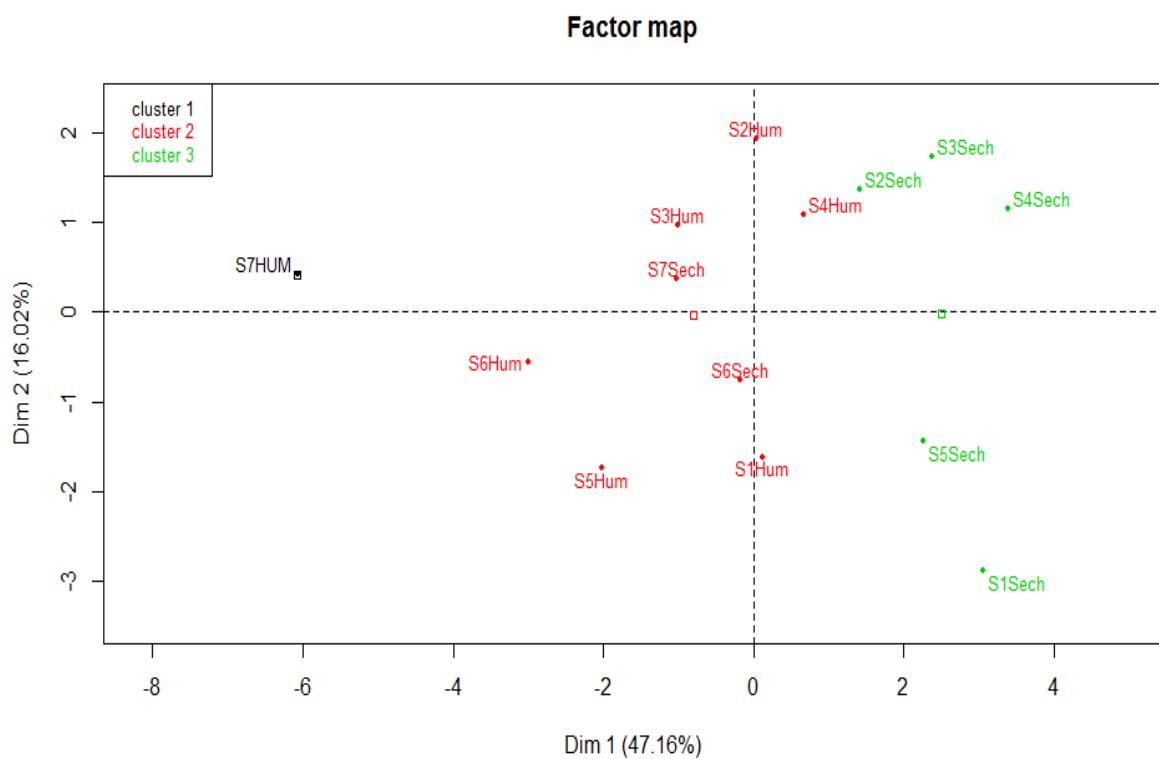
Le cercle de corrélation formé par les dimensions 1 et 2 a donné une inertie totale de 63.18 %. Sur les graphiques issus de l'analyse factorielle (Fig.36-A), la première composante principale Dim.1 (47.16% de la variance totale) indique l'existence de 3 groupes assez distincts :

Le premier est composé des sites S1,S2,S3,S4 et S5 de la période sèche (septembre 2016), qui est caractérisé par des teneurs élevées en bases échangeables (Na⁺, K⁺ et Mg²⁺), carbone et matière organique et des teneurs moins élevées en pHeau, calcium, pHKCl et l'ammonium au contraire du 3^{ème} groupe qui est formé par le site S7 de la période humide. Le second est composé des sites S1, S2, S3, S4, S5 et S6 de la période humide (mai 2016) qui partage les mêmes caractéristiques avec les sols du premier groupe en termes de teneur en différents éléments physico-chimiques.

L'axe Dim.2 (16.02% de la variance totale) montre que les sols représentés par les sites S2, S3 et S4 des deux périodes (humide et sèche) ayant une CE importante et des teneurs élevées en magnésium (Fig.36-B).



A- Projection des variables selon le plan (1X2)



B- Projection des individus selon le plan (1X2)

Figure 36 : ACP des sols du lac Tonga selon le plan des dimensions (1X2)

3. Discussion

Les paramètres physico-chimiques analysés dans ce travail peuvent être considérés comme des indicateurs d'évolution (**Bailey, 1975 et 1981**).

Les paramètres physiques :

La porosité se détermine à partir de la densité apparente et la densité réelle. La densité apparente varie entre 1.00 et 2.00g/cm³ (**Kaouritchev, 1970**), elle diminue avec la teneur du sol en humus (**Duthil, 1971**). Les sols étudiés ont une densité apparente comprise entre 1.25 et 1.88 g/cm³. La densité réelle est généralement comprise entre 2,1 et 2,6 g/cm³. La majorité des sols étudiés ont une densité réelle inférieure à 2.62 g/cm³ ; ces sols contiennent beaucoup de matière organique (**Duthil, 1971**).

La porosité du sol exprime le volume des vides qui peuvent être occupé par l'eau ou l'air afin de constituer un habitat favorable pour la faune du sol. La moyenne de la porosité dans les sites du lac Oubeïra est de 28.58%, elle est considérée comme assez forte. Au niveau du lac Tonga, les valeurs de la porosité varient entre 15 et 52.63% ; elles sont forte à assez forte ; les valeurs de la porosité les plus élevées sont dans les sols à texture sableuse (**Kaouritchev, 1970**).

La texture du sol et la minéralogie des argiles sont des caractéristiques qui vont également largement influencer l'effet de l'apport de la matière organique fraîche (**Kiem et Kandeler, 1997 ; Denef et al., 2001 ; de Gryze et al., 2005 ; Wuddivira et al., 2009**). Les sols du lac Tonga sont des sols de texture limono-sableuse, tandis que les sols du lac Oubeïra sont de textures limono-sableuse à sableuse.

Les paramètres physico-chimiques :

Le pHau indique la concentration en ions H⁺ présents dans l'eau. Les sols étudiés sont neutres (pH 6,75-7,25) (**Mc Bride, 1994**) à légèrement alcalins dans certains sites. Cet intervalle permettant une très bonne biodisponibilité des éléments minéraux (**Cadet, 2005**).

La salinité est une mesure physico-chimique qui donne une idée sur la concentration des électrolytes dans un sol (**Godin, 1984 ; Mc Bride, 1994**). Les résultats de notre analyse montrent que les sols des zones étudiés (lac Oubeïra et Tonga) ont des conductivités électriques faibles à moyennes (< 1000 µs/ cm) dans tous les sites de prélèvement et pendant

les deux périodes (mai 2016 et septembre 2016). Les résultats de salinité montrent que les sols des deux lacs ne sont pas salés (**Godin, 1984 ; Mc Bride, 1994**).

La diminution de la teneur en matière organique des sols a été identifiée comme étant parmi les principales menaces sur les sols cultivés (**European Commission, 2002**). La matière organique contrôle en grande partie les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol et influence en conséquence les propriétés fonctionnelles du sol (**Loveland et Webb, 2003**).

La nature biochimique de la matière organique apportée est un des principaux facteurs d'influence de la décomposition de la matière organique fraîche apportée (**Heal *et al.*, 1997**). Les sols des sites d'études présentent des valeurs variables entre 1.11 et 2.55% pour la campagne mai 2016 et entre 1.88 et 5.02% pour la campagne septembre 2016, ce qui indique que ce sont des sols riches en matière organique en période estivale (**Loveland et Webb, 2003; Abiven *et al.*, 2009**).

Le calcium montre des valeurs très variables d'un site à un autre et d'une saison à l'autre ; les sols des deux lacs sont dominés par le calcium échangeable. Les plus fortes teneurs sont notées au niveau des deux lacs pendant la saison hivernale. Le nombre d'ions calcium adsorbés sur le complexe adsorbant est en relation avec le pH du sol, plus les ions Ca^{2+} adsorbés sont nombreux, plus le pH est élevé (c'est notamment le cas des sols durant la période humide).

Selon les analyses effectuées, les teneurs en magnésium sont fréquentes sur les sols sableux à pH neutre (6.75 – 7.25). Les sols de la zone d'étude possèdent une teneur en magnésium modérée pour lac Oubeïra et élevée pour le lac Tonga (Annexe.3). De ce fait, nous pouvons dire que le magnésium joue un rôle essentiel dans la neutralisation de l'acidité, le maintien de l'activité biologique générale et la détermination de la structure du sol.

La majorité des stations du lac Oubeïra correspondant à une teneur en sodium échangeable modérée. Cette teneur peut être expliquée par le fait, que la texture de la majorité de ses stations est sablonneuse, ce qui facilite le lessivage des éléments minéraux, entre autre le sodium échangeable. Tandis que le lac Tonga correspond à la teneur élevée en sodium échangeable. De ce fait, la teneur en sodium est associée bien à la texture du sol (la capacité de rétention de l'eau augmente avec la teneur en sodium échangeable).

Concernant les teneurs en potassium, les sols à texture fine (argileuse, argilo-limoneuse,...) sont potentiellement plus riches en ce cation que les sols à texture grossière (**Soltner, 2003**).

Les résultats des analyses obtenus correspondent aux hypothèses émises pour le lac Oubeïra qui présente des teneurs faibles en K^+ avec une texture sableuse. Cependant, au niveau du lac Tonga, la teneur en cation alcalin (K^+) est modérée, malgré la texture limoneuse. Cela peut être expliqué par la présence d'une quantité non négligeable d'humus due à la décomposition de la litière présente au niveau de ce lac.

Par ailleurs, le complexe adsorbant est saturé par les cations alcalino-terreux (Ca^{2+} - Mg^{2+}) échangeables que les ions alcalins (Na^+ - K^+) pour les deux lacs.

Les teneurs en ammonium les plus élevées sont enregistrées durant la période des hautes eaux (mai 2016), et les teneurs les plus faibles, sont enregistrées durant la période des basses eaux (septembre 2016) pour les deux lacs. Leur évolution suit généralement un cycle saisonnier qui montre un décroissement des concentrations se faisant dans le sens saison humide-saison sèche. Cela est dû à l'activité agricole utilisant les engrains azotés et les déchets organiques (fumiers).

Les concentrations en bases échangeables (Mg^{2+} , Na^+ et K^+) dans les sols prélevés durant la campagne septembre 2016 sont plus élevées que celles de mai 2016 pour les deux zones étudiées. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que durant l'été la pluviométrie étant moins importante, ce qui favorise des concentrations plus élevées en ces cations.

L'étude statistique par l'analyse en composantes principales (ACP) a montré que les éléments chimiques présents dans les solutions de sols des deux lacs montrent une distribution spatiotemporelle assez variable. Les teneurs en éléments chimiques les plus élevées sont enregistrées dans les sols en période sèche (septembre 2016) ; les teneurs les plus faibles sont enregistrées durant la période humide (mai 2016). Leur évolution suit généralement un cycle saisonnier qui montre un accroissement des concentrations se faisant dans le sens saison humide-saison sèche (de mai 2016 à septembre 2016), Ceci pourrait s'expliquer du fait que durant l'été la pluviométrie étant moins importante, ce qui favorise plus de dépôt de particules fines à la surface des sols, entraînant ainsi des concentrations plus élevées en éléments chimiques. Par ailleurs, on constate que les teneurs en ammonium enregistrées sont nettement élevées durant la période humide qu'en période sèche.

La morphologie et les caractéristiques physico-chimiques des sols des lacs Oubeïra et Tonga sont contrôlées par la nature du plan d'eau, la roche mère, les fluctuations saisonnières, les facteurs anthropiques et par la nature et densité du couvert végétal.

Conclusion

Les résultats obtenus au niveau des différents paramètres effectués sur les sols des lacs Oubeïra et Tonga, nous ont permis de dégager ce qui suit :

Les sols du lac Oubeïra sont caractérisés par une porosité assez forte alors que les sols du lac Tonga présentent une porosité forte à assez forte. Les valeurs de la matière organique montrent que les sols étudiés sont riches en matière organique en période estivale. Les analyses granulométriques montrent la dominance de la texture limono-sableuse à sableuse pour les deux sites étudiés.

En ce qui concerne les paramètres chimiques, nous constatons que les sols de la région d'étude ne sont pas salés et ont un pH neutre à légèrement alcalin. Les résultats obtenus, concernant la répartition des bases échangeables (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ et NH_4^+) présents dans les sols des deux lacs sont dominée par le calcium échangeable.

Les résultats de l'ACP révèlent, d'une part une variabilité entre sites (lacs), et d'autre part, une éventuelle variabilité entre les deux périodes. Ces variabilités sont dues aux caractéristiques propres à chaque site, à la pression anthropique ainsi qu'à l'effet saison.

En effet, la topographie, la nature de la végétation et du matériau parental ainsi que l'importance et la durée de saturation des sols sont les principaux déterminants des processus de la pédogenèse et donc des caractéristiques pédologiques.

Partie 2: Etude hydrochimique

Introduction

L'étude de la chimie des eaux permet d'expliquer les mécanismes qui régissent la qualité des eaux. Elle apporte de nombreuses informations sur les échanges qui s'effectuent entre l'aquifère et son environnement c'est-à-dire sur la nature de l'encaissant, sur les zones d'alimentation et de circulation, ... Dans les lacs Oubeïra et Tonga, le chimisme des eaux est souvent influencé par l'évaporation des eaux du lac, les rejets urbains et l'activité agricole.

La présente partie a été menée afin de connaître l'origine, le mécanisme du chimisme, l'évolution des éléments chimiques décrits et de caractériser la qualité des eaux des lacs Oubeïra et Tonga.

1. Caractérisation physico-chimique des eaux du lac Oubeïra

1.1. Paramètres physiques et physico-chimiques

Tableau 20: Variations des paramètres physiques des eaux du lac Oubeïra

| Périodes | Période humide | | | | Période sèche | | | | |
|-------------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|---------------|-------------|------------------|-----------------|---------|
| | Paramètres | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Eh (mV) | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Eh (mV) |
| Min | | 18 | 7.24 | 207.3 | 200.5 | 25 | 6.71 | 423 | 96 |
| Max | | 20 | 7.77 | 623.5 | 254 | 27 | 7.33 | 735 | 185.5 |
| Moy. | | 19.16 | 7.39 | 445.75 | 224.83 | 26.16 | 7.01 | 595.75 | 145.08 |
| Ecart-type | | 0.75 | 0.20 | 170.10 | 17.83 | 0.82 | 0.21 | 125.23 | 31.92 |
| Normes | | 25°C | 6,5 - 8,5 | 400µS/cm | / | 25°C | 6,5 - 8,5 | 400µS/cm | / |

1.1.1. Températures (T °C)

La température étant un facteur très important pour la fonction des écosystèmes, pour les eaux superficielles, elle est due aux influences atmosphériques. La variation de la température agit sur les réactions métaboliques qui se produisent dans les eaux des lacs, mais aussi la période de prélèvement des eaux joue un rôle important.

En période humide, la température des eaux varie entre 18 et 20°C, avec une moyenne de 19.16°C. En période sèche, elle est légèrement en hausse et varie entre 25.5 et 27°C, avec une moyenne de 26.16°C (Fig.37).

Dans les deux périodes elle est proche de la température ambiante, parce que le niveau d'eau dans l'aquifère est soumis à l'influence de la pression atmosphérique, ce qui engendre un équilibre thermique.

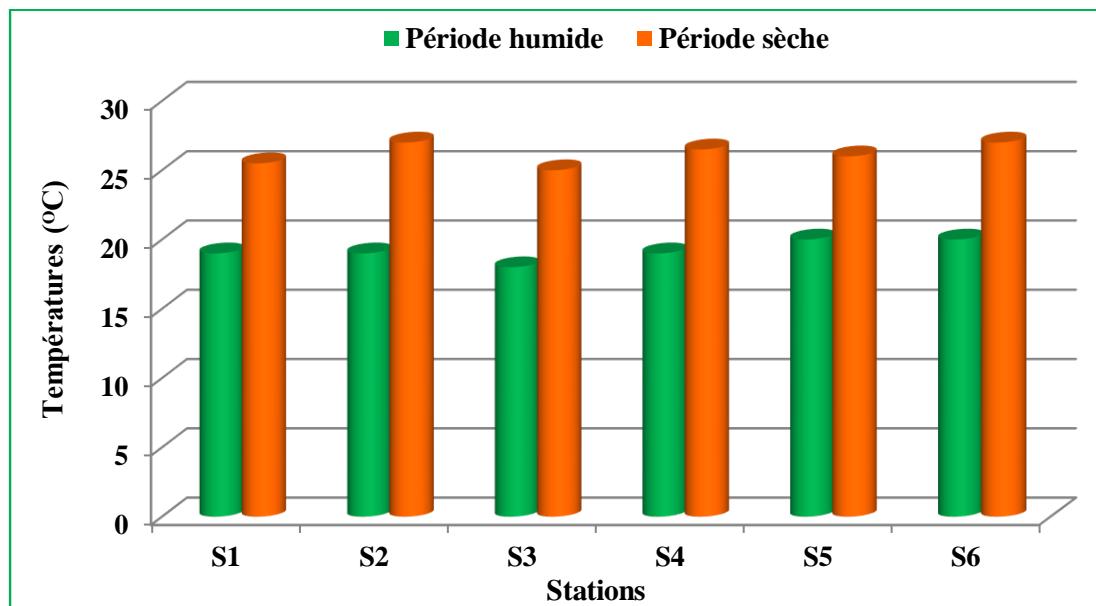


Figure 37: Variations de la température des eaux du lac Oubeïra.

1.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est une indication importante de la qualité et fournit des informations importantes de l'équilibre géochimique ou le calcul de la solubilité des micro-éléments (Dussart, 1966), il dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé (Peterson, 1999). Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques entre l'eau, le gaz carbonique dissous, les carbonates et les bicarbonates qui constituent des solutions tamponnées conférant à la vie aquatique un développement favorable.

Les valeurs du pH fluctuent entre 6.71 et 7.33 avec une moyenne de 7.01 en période sèche et entre 7.24 et 7.77 avec une moyenne de 7.39 durant la période humide, ce qui attribue aux eaux un caractère neutre à légèrement alcalin (Fig.38).

1.1.3. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Ce paramètre permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). En générale, la variation du potentiel d'oxydo-réduction est très liée à l'effet des précipitations, il est élevé pendant la période des hautes

eaux et faible pendant la période des basses eaux. Les eaux du lac Oubeïra sont marquées par une grande variation du Eh entre les deux périodes. Les valeurs du Eh oscillent entre 200.5 et 229.5 mV, avec une moyenne de 224.83 mV en hautes eaux (période humide), et une diminution des valeurs du Eh dans toutes les stations durant la deuxième campagne (période sèche) avec une moyenne de 145.08 mV, ce qui montre que ce paramètre est très lié à l'effet d'oxygénéation par les eaux de pluies en période de hautes eaux (Fig. 39).

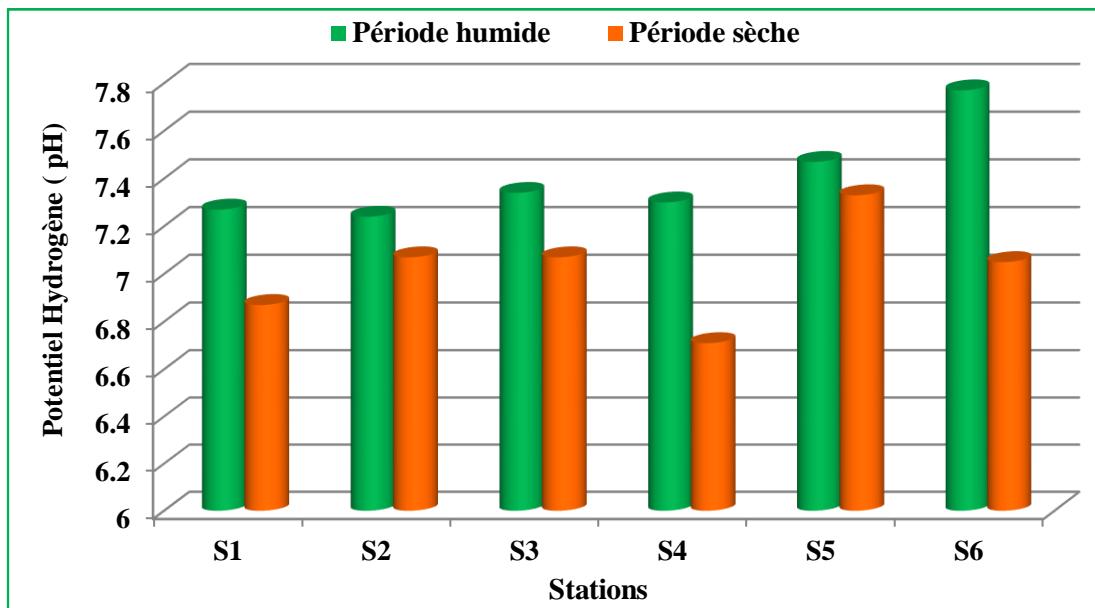


Figure 38: Variations du pH des eaux du lac Oubeïra.

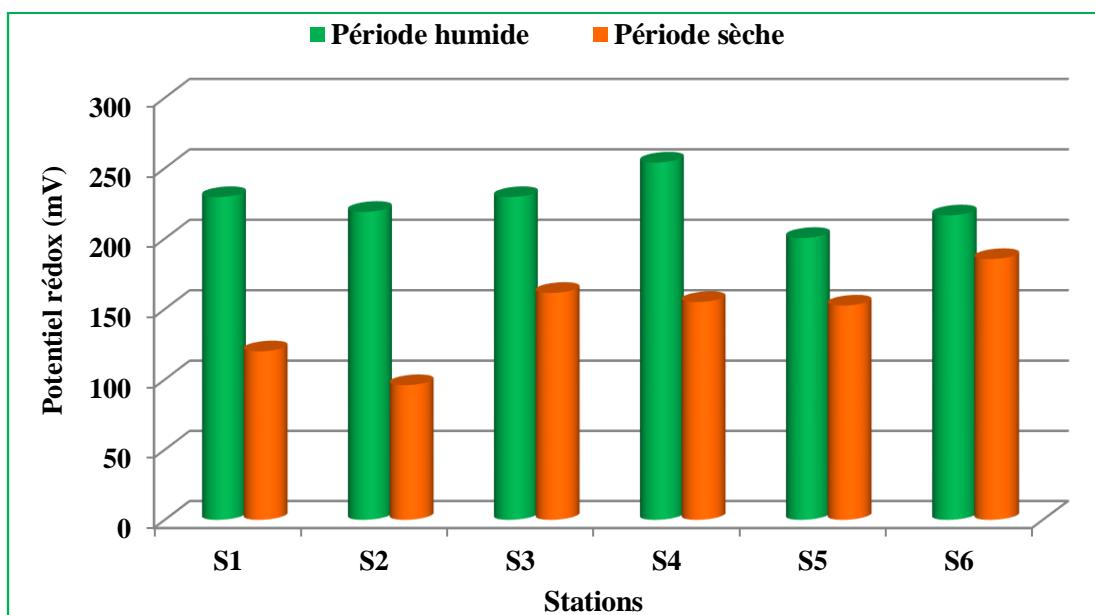


Figure 39 : Variations du Eh des eaux du lac Oubeïra.

1.1.4. Conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Des températures élevées agissent sur la conductivité électrique par action sur la mobilité des sels (Dussart, 1966), il est à signaler que la conductivité électrique est fonction de la température de l'eau, car elle est plus importante lorsque la température augmente (Bremond et Perrodon, 1979).

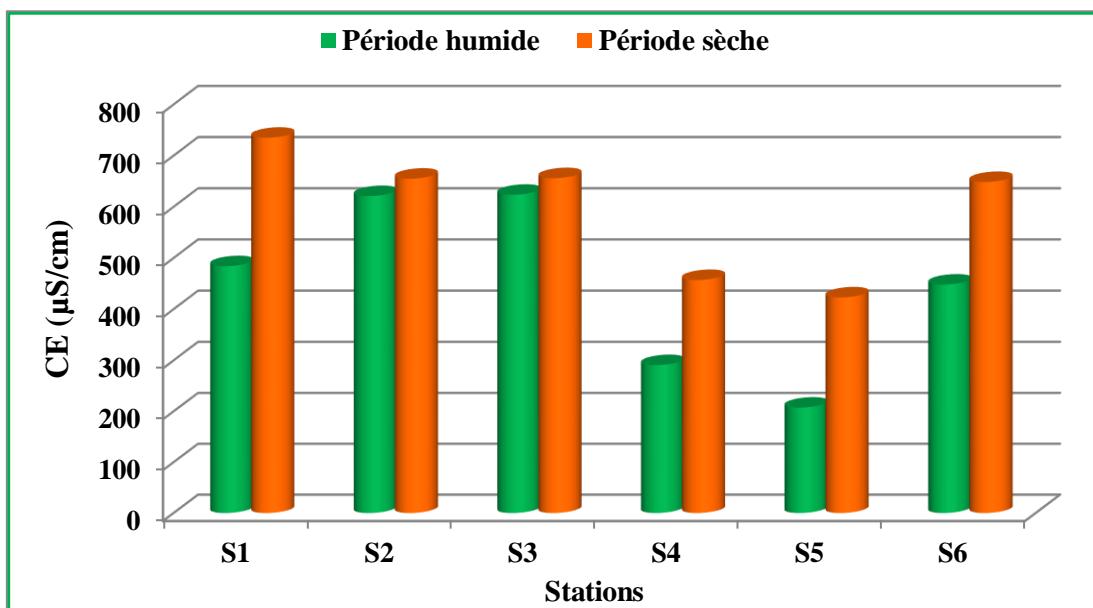


Figure 40: Variations de la conductivité électrique des eaux du lac Oubeïra

Durant les deux campagnes d'analyses, l'évolution de la conductivité électrique dans les eaux du lac Oubeïra est bien visible à l'échelle des saisons où les fortes valeurs s'observent en période d'étiage, elles atteignent $735 \mu\text{S}/\text{cm}$ (S1) alors que les valeurs les plus faibles se manifestent en période humide, elles sont de l'ordre de $207.3 \mu\text{S}/\text{cm}$ au niveau de la station S5 (Fig.40).

Cette variation est due aux conditions climatiques où les hautes températures accentuent l'évaporation des eaux et par conséquence augmentent la concentration des sels solubles dans l'eau. Les eaux du lac sont classées comme eaux faiblement minéralisées.

1.2. Paramètres chimiques

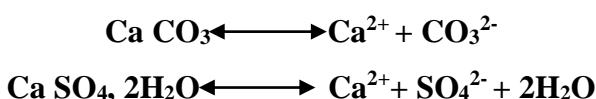
1.2.1. Les cations

Tableau 21: Teneurs en cations (mg/l) des eaux du lac Oubeïra

| Périodes | Période humide | | | | Période sèche | | | |
|------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| | Paramètres | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ |
| Min. | 18 | 4.8 | 48.3 | 4.62 | 72.84 | 14.71 | 55.06 | 2.95 |
| Max. | 58 | 18 | 70.83 | 5.74 | 185.25 | 88.43 | 171.46 | 15.95 |
| Moy. | 39 | 10.34 | 58.53 | 5.18 | 120.65 | 54.44 | 104.13 | 9.20 |
| Ecart-type | 17.79 | 4.76 | 8.24 | 0.38 | 41.63 | 28.82 | 50.94 | 5.90 |
| Normes | 100 | 50 | 150 | 12 | 100 | 50 | 150 | 12 |

1.2.1.1. Calcium (Ca²⁺)

Le calcium est généralement l'élément dominant dans les eaux naturelles. La présence des ions Ca²⁺ dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit à la dissolution des formations carbonatées (Ca CO₃), soit la dissolution des formations gypseuses (Ca SO₄).



Dans l'eau du lac Oubeïra les teneurs en calcium (Tab.21), sont d'une manière générale inférieure ou égale à la norme de potabilité. En période humide, elles varient entre 18 et 58 mg/l, avec une moyenne de 39 mg/l. En période sèche, les teneurs varient entre 72.84 et 185.25 mg/l, avec une moyenne de 120.65 mg/l.

On remarque que les teneurs en calcium sont plus élevées en période sèche et présentent des variations plus significatives qu'en période humide. Le maximum de la concentration en calcium est observé à la station S1, S3 et S5 dans la période sèche avec respectivement des valeurs de 185.25, 128.2 et 146.35 mg/l (Fig. 41).

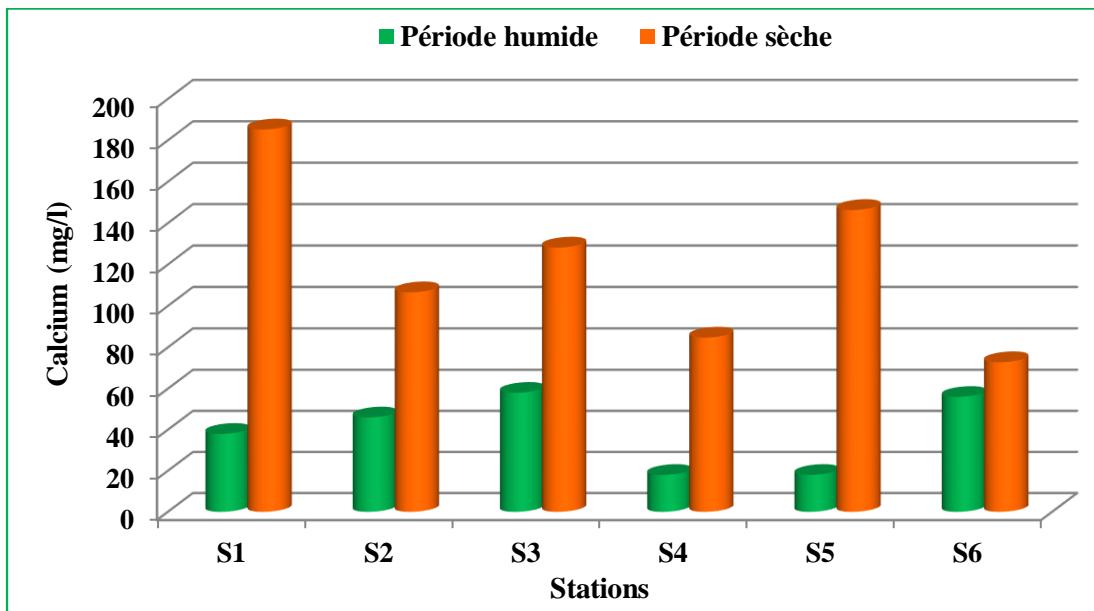


Figure 41: Variations des teneurs en calcium des eaux du lac Oubeira.

1.2.1.2. Magnésium (Mg^{2+})

D'un point de vue chimique, le magnésium s'apparente au calcium (**Bakalowicz, 1996** ; **Batiot, 2002**). Les origines proviennent de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) selon les relations suivantes :

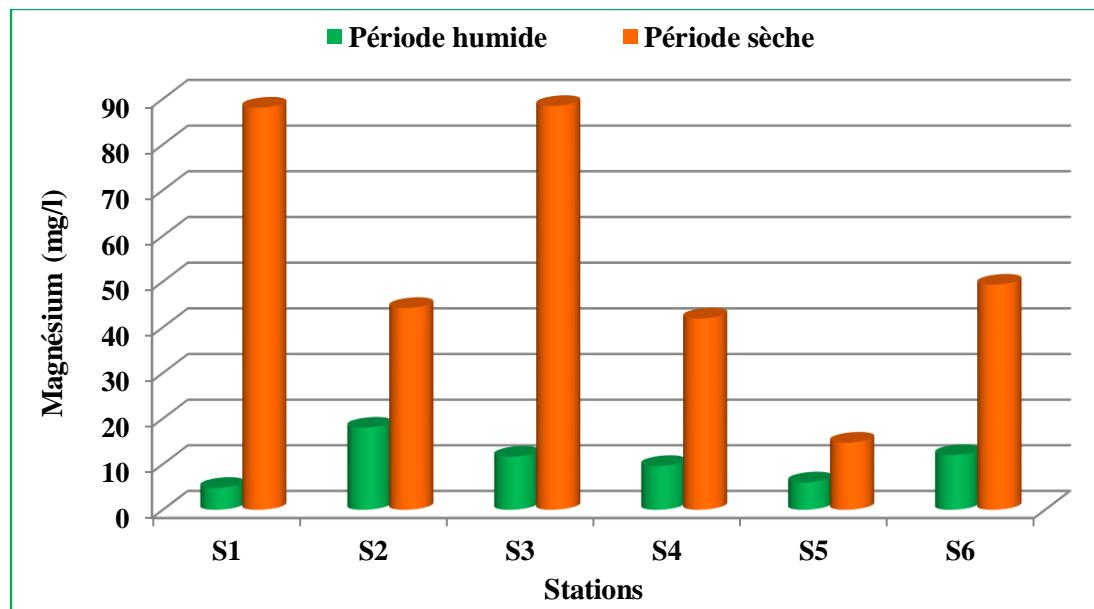
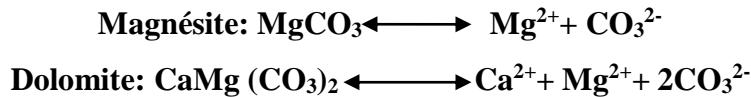


Figure 42: Variations des teneurs en magnésium des eaux du lac Oubeira.

Les teneurs en magnésium sont comprises entre 4.8 à 18 mg/l avec une moyenne de 10.34 mg/l pour les eaux en période humide et 14.71 à 88.43 mg/l avec une moyenne de 54,44 mg/l pour ceux des eaux en période sèche.

L'évolution des teneurs est identique à celle du calcium, la comparaison des concentrations avec les normes de potabilité montre qu'une partie des points d'eau possède des teneurs supérieures à la limite admise par l'OMS (50 mg/l). Les teneurs les plus élevées (88.07 et 88.43 mg/l) sont observées dans la période sèche au niveau des stations S1 (Embouchure d'oued Messida) et S3 (Embouchure du Dey L'Graa) (Fig.42).

1.2.1.3. Sodium (Na^+)

Le sodium est toujours présent dans les eaux naturelles en proportions très variables. L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des minéraux salifères selon la relation suivante :

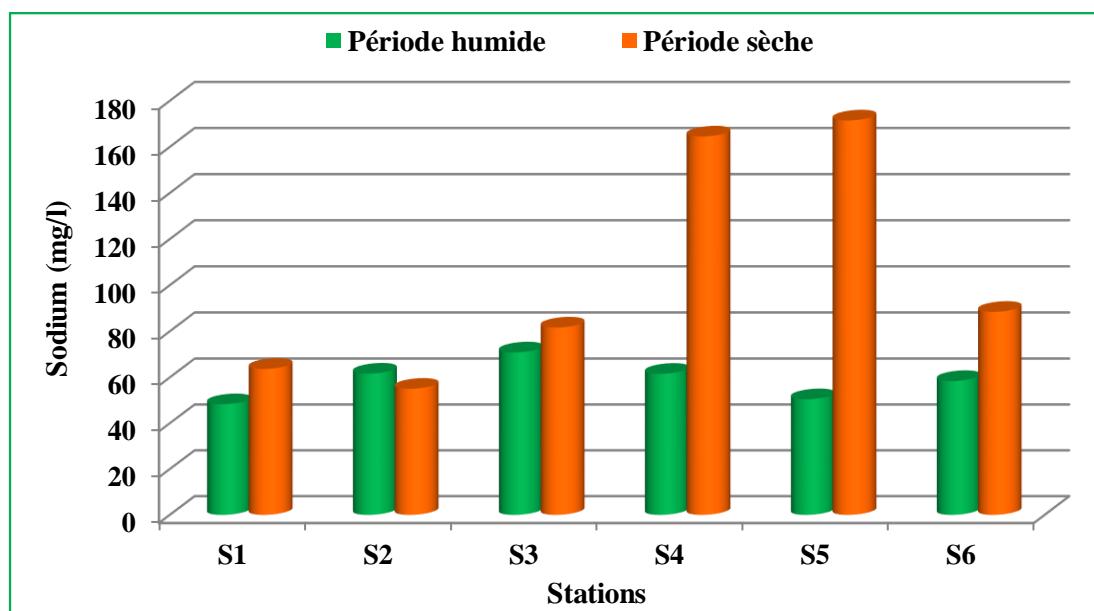
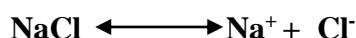


Figure 43: Variations des teneurs en sodium des eaux du lac Oubeïra.

Au cours de la première campagne (humide), nous remarquons de faibles teneurs en Na^+ qui ne dépassent pas 100 mg/l où les concentrations oscillent entre 48.3 et 70.83 mg/l avec une moyenne de 58,53 mg/l (Fig.43).

On constate une légère augmentation des concentrations en période sèche, due à une évapotranspiration. Les fortes concentrations caractérisent les eaux de l'embouchure d'oued

Boumerchène (S4) et au niveau de l'embouchure d'oued Demnet Rihanna (S5) dans la partie Nord du lac, avec des teneurs fluctuant entre 164.5 et 171.46 mg/l (Fig.43). La présence de cet élément dans les eaux de surface est liée aux rejets urbains dans le lac.

1.2.1.4. Potassium (K^+)

Le potassium K^+ , beaucoup moins abondant que le sodium, est rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l où on le considère comme négligeable par rapport au sodium. (Benhamza, 2007). Il provient de l'altération des argiles potassiques et de la dissolution des engrains chimiques (NPK) qui sont utilisés par les agriculteurs et au déversement des eaux usées domestiques des riverains.

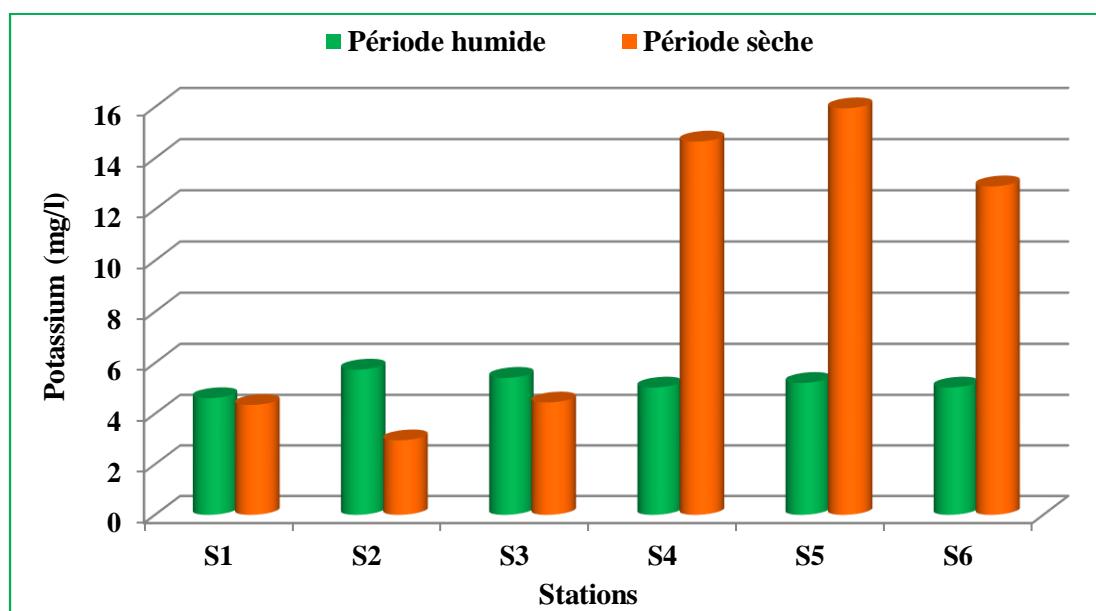


Figure 44: Variations des teneurs en potassium des eaux du lac Oubeïra.

Les teneurs en K^+ varient entre 4.62 et 5.74 mg/l avec une moyenne de 5.18 mg/l en période humide, et entre 2.95 et 15.95 mg/l avec une moyenne de 9.20 mg/l durant la période sèche (Fig.44). Les fortes concentrations (> 12 mg/l) sont enregistrées au niveau des stations (S4, S5 et S6) durant la saison sèche où les teneurs atteignent 15.95 mg/l au niveau de la station S5 (embouchure d'oued Demnet Rihanna).

1.2.1.5. Ammonium (NH_4^+)

Les concentrations en ammonium fournissent des informations sur la pollution des eaux suite au déversement des eaux usées ménagères ou à l'érosion et au lessivage des sols agricoles.

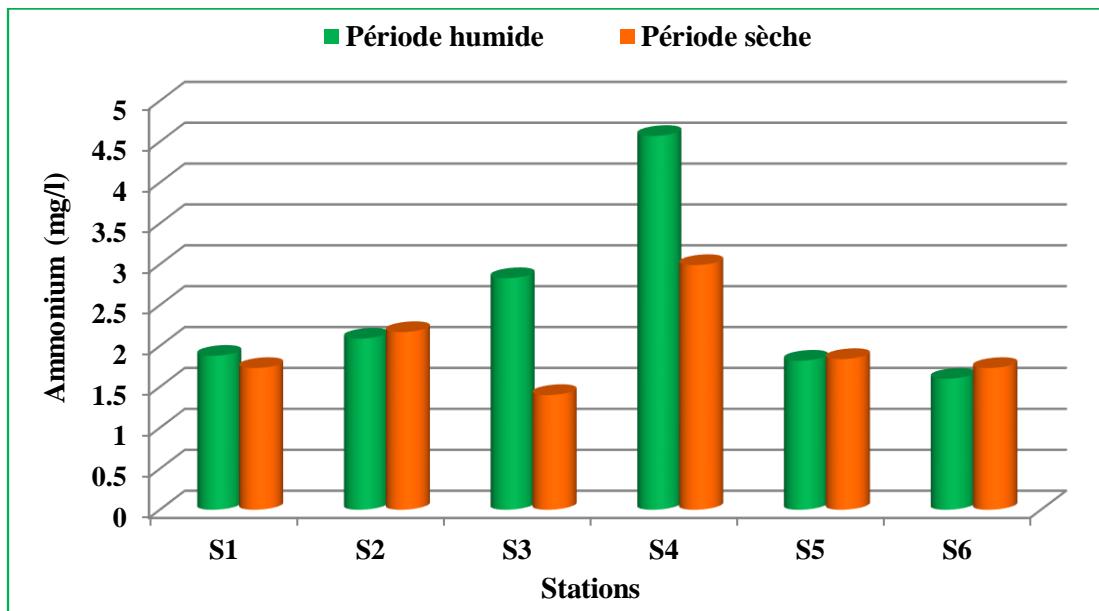


Figure 45: Variations des teneurs en ammonium des eaux du lac Oubeïra

L'intervalle de fluctuation d'ammonium dans les eaux du lac Oubeïra est de 1.6 à 4.57 mg/l avec une moyenne de 2.46 mg/l en période humide (Fig.45). Par contre en période sèche, les concentrations en ammonium varient entre 1.4 et 2.99 mg/l avec une moyenne de 1.97 mg/l. L'observation des valeurs montre que l'évolution temporelle de cet élément est plus importante en hiver qu'en été et dépassent de loin la norme de potabilité (0.5 mg/l). L'origine de ces ions ammonium est les rejets des eaux usées.

1.2.2. Les anions

Tableau 22 : Teneurs en anions (mg/l) des eaux du lac Oubeïra

| Périodes | Période humide | | | Période sèche | | |
|------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ |
| Paramètres | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ |
| Min. | 80.13 | 6 | 38.95 | 251.75 | 77.05 | 70.8 |
| Max. | 161.84 | 60.39 | 130.32 | 350.5 | 409.61 | 165.84 |
| Moy. | 115.38 | 30.72 | 81.92 | 313.83 | 283.95 | 101.74 |
| Ecart-type | 27.71 | 19.67 | 33.01 | 37.29 | 123.48 | 33.85 |
| Normes | 200 | 250 | 250 | 200 | 250 | 250 |

1.2.2.1. Chlorures (Cl⁻)

La provenance des chlorures peut être due au passage de l'eau à travers des percolations de roches sédimentaires, à l'intrusion d'eau salée dans les eaux souterraines et à l'épandage de chlorure de sodium et de calcium sur les routes. La concentration maximale en chlorure admis est de 250 mg/l, car à des concentrations supérieures, l'eau peut avoir un goût de sel. Les chlorures sont aussi des agents corrosifs à des concentrations élevées.

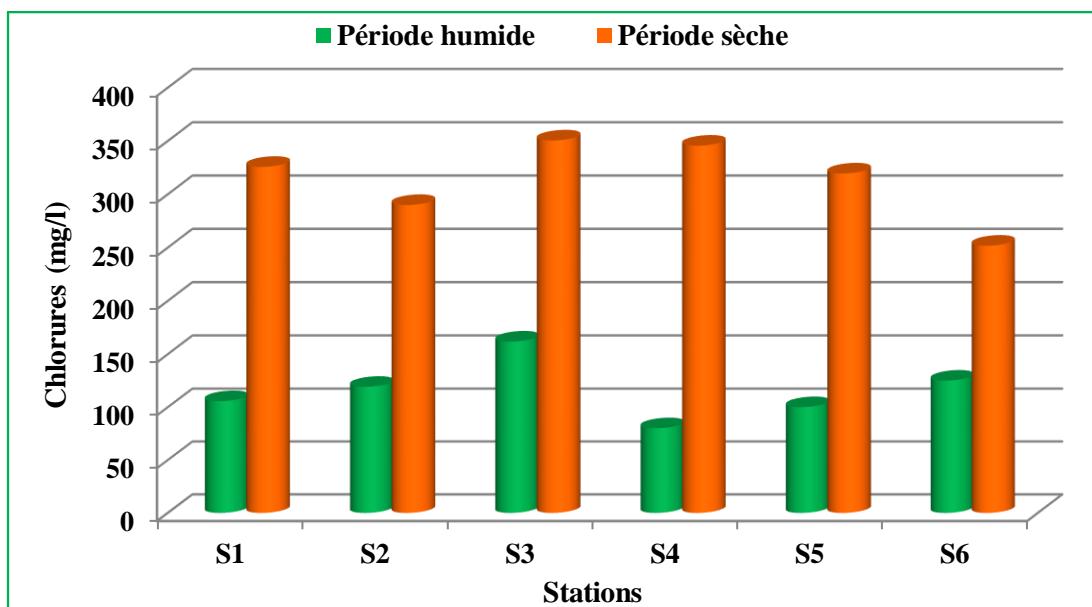


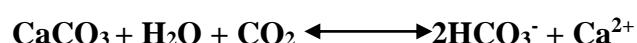
Figure 46: Variations des teneurs en chlorures des eaux du lac Oubeïra.

L'évolution spatio-temporelle est marquée par un abaissement des teneurs en chlorures pendant la saison humide par rapport à la saison sèche (Tab. 22). Les concentrations du Cl⁻ observées au niveau des eaux du lac Oubeïra montrent des teneurs inférieures aux normes de potabilité (200 mg/l) durant la première campagne (période humide).

La plupart des teneurs en chlorures dépassant la norme (250 mg/l) et peut altérer la qualité de l'eau du lac durant la période sèche, elles oscillent entre 251.75 et 350.5 mg/l avec une moyenne de 313.83 mg/l (Fig.46). La présence des chlorures dans ces eaux peut être liée à la pollution provenant des rejets urbains surtout au niveau de l'embouchure des oueds.

1.2.2.2. Bicarbonates (HCO₃⁻)

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



La concentration des bicarbonates dans l'eau est fonction des paramètres suivants :

- Le pH de l'eau ;
- La concentration du CO₂ dissous ;
- La température de l'air.
- La concentration de l'eau en sels et la nature lithologique des terrains traversés.

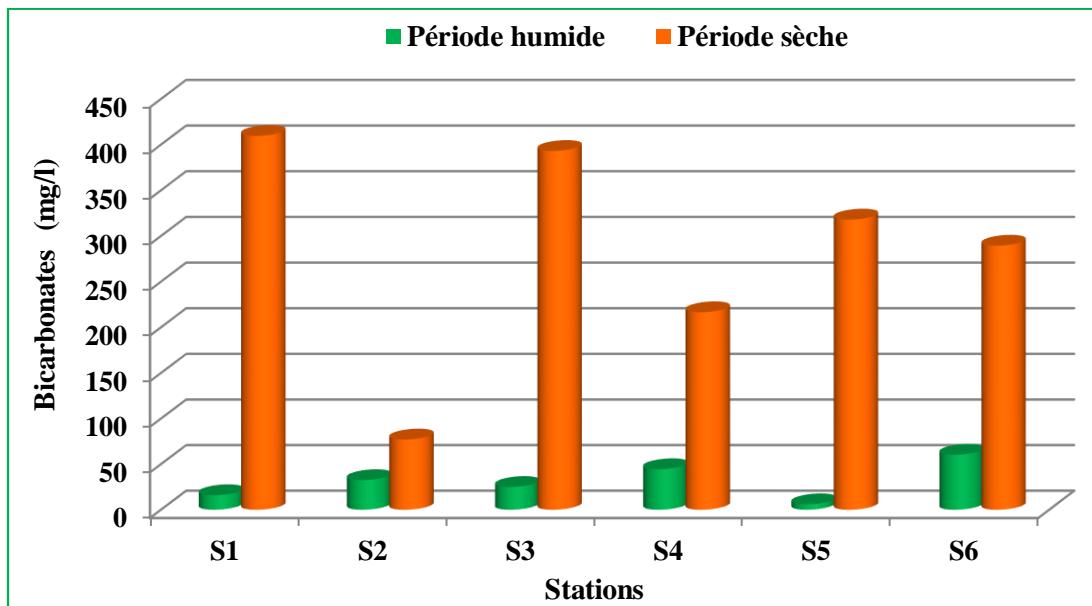


Figure 47: Variations des teneurs en bicarbonates des eaux du lac Oubeïra

Les teneurs en bicarbonates sont plus importantes en été qu'en hiver. Elles varient entre 6 et 60.39 mg/l en période humide, avec une moyenne de 30.72 mg/l. En période de basses eaux (période sèche), elles varient entre 77.05 et 409.61 mg/l, avec une moyenne de 283.95 mg/l. Durant cette campagne (sèche), les concentrations en bicarbonates sont supérieures à 250 mg/l dans la majorité des stations avec des pics enregistrés au niveau des sites S1, S3, S5 et S6 (Fig.47).

1.2.2.3. Sulfates (SO₄²⁻)

L'eau contient toujours des sulfates en proportion très variables, leur présence dans l'eau résulte :

- De la légère solubilité du Sulfate de Calcium (CaSO₄) des roches gypseuses (Ca SO₄, 2H₂O) ;
- De l'oxydation des Sulfates (pyrites FeS₂...) ;
- De l'oxydation des sulfures d'hydrogène et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère puis entraînés lors des précipitations (**Benhamza, 2007**).

Les valeurs observées montrent que les eaux de toutes les stations d'étude ont des concentrations inférieures à la limite de potabilité (250 mg/l), elles varient entre 38.95 et 130.32 mg/l, avec une moyenne de 81.92 mg/l en période hivernale. Par contre en période estivale, elles varient entre 70.8 et 165.84 mg/l, avec une moyenne de 101.74 mg/l (Fig. 48).

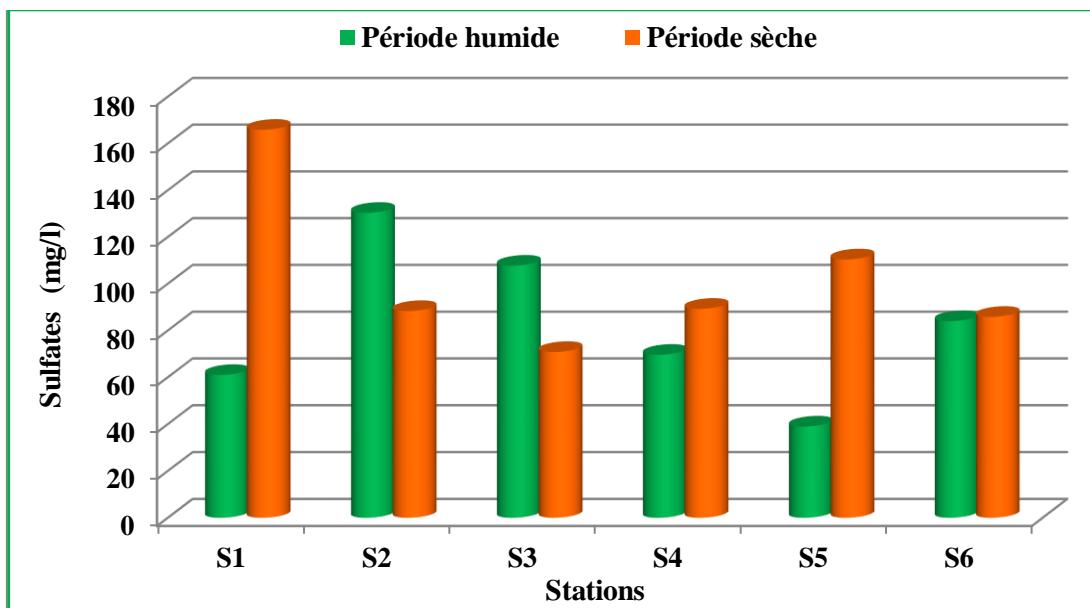


Figure 48: Variations des teneurs en sulfates des eaux du lac Oubeïra

1.3. Détermination des principaux faciès chimiques des eaux du lac Oubeïra

Le diagramme de Piper permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Ce type de diagramme est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation est importante, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

Après avoir reporté les différentes valeurs des deux périodes d'observations (humide et sèche) sur les diagrammes de Piper, nous observons (Fig. 49 et Fig. 50) :

En période humide, les faciès chimiques dominants sont chloruré-calciques et magnésiens et chloruré-sodiques. Tous les points présentent des teneurs importantes en chlorures (Fig.49). Les chlorures sont liés à l'activité anthropique (Rouabchia et Djabri, 2010).

En période sèche, la représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper, montre que les eaux échantillonnées sont généralement du type chloruré-calcique et magnésien. On constate que les teneurs en chlorures, calcium et magnésium prennent la prédominance (Fig.50).

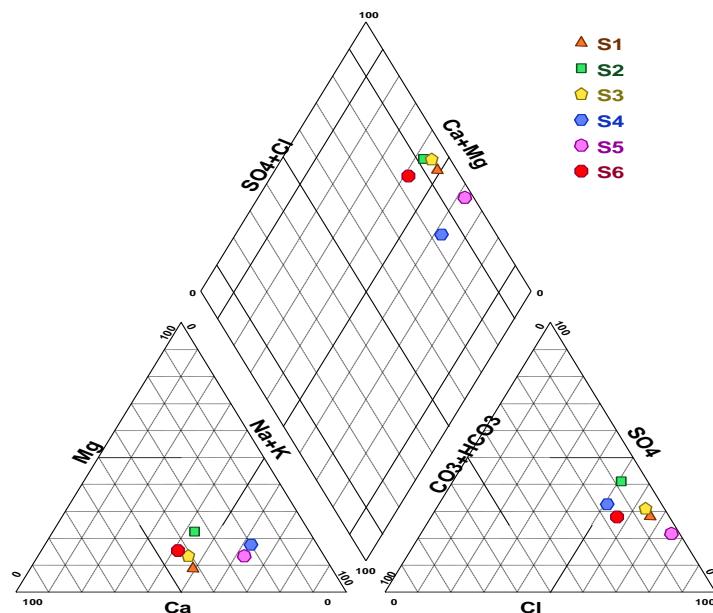


Figure 49: Diagramme de Piper des eaux du lac Oubeïra (période humide)

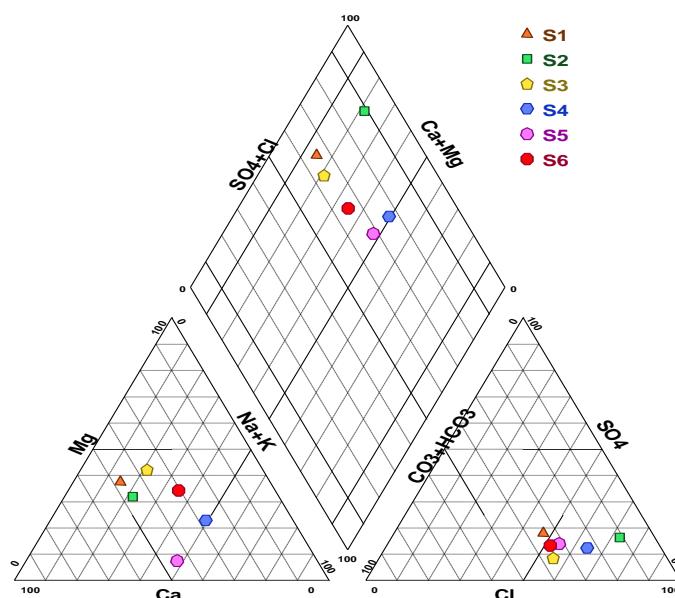


Figure 50: Diagramme de Piper des eaux du lac Oubeïra (période sèche)

1.4. Aptitude des eaux du lac Oubeïra à l'irrigation

La zone d'étude étant à vocation agricole, sur la base des résultats des analyses chimiques réalisées, nous avons jugé utile de traiter de l'utilisation des eaux pour l'irrigation et des risques encourus par l'utilisation de ces eaux dans le domaine agricole. Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets néfastes sur le sol et les plantes.

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium, des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (Todd, 1980). Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment les cations Ca^{2+} dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cet effet (Rouabchia et al., 2012).

La classification des eaux destinées à l'irrigation la plus utilisée est celle du laboratoire américain de salinité (USDA) développée par Richards en 1954, basée sur la combinaison du SAR « Sodium Absorption Ratio» avec la conductivité électrique sous forme d'un diagramme de classes (Diagramme de Richards). Le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est donné par la formule ci-dessous :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (\text{Concentrations en meq/l})$$

Après avoir reporté tous les stations d'eau des deux périodes (humide et sèche) sur le diagramme de Richards (Fig.51 et Fig.52), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR, deux (02) classes apparaissent : excellentes et bonnes avec les mêmes caractéristiques.

C1S1, C2S1: caractérisent des eaux de bonne qualité et pouvant être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels et sur les sols ayant une bonne perméabilité. Ces classes représentent la majorité des eaux durant les deux périodes d'observation.

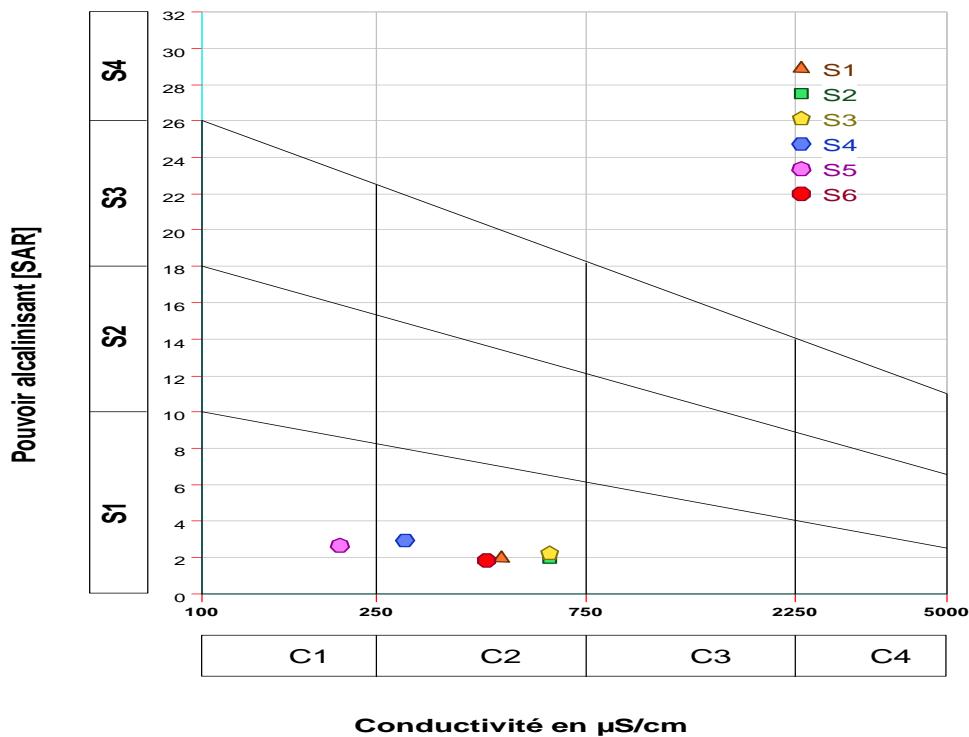


Figure 51: Classification des eaux du lac Oubeïra destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période humide)

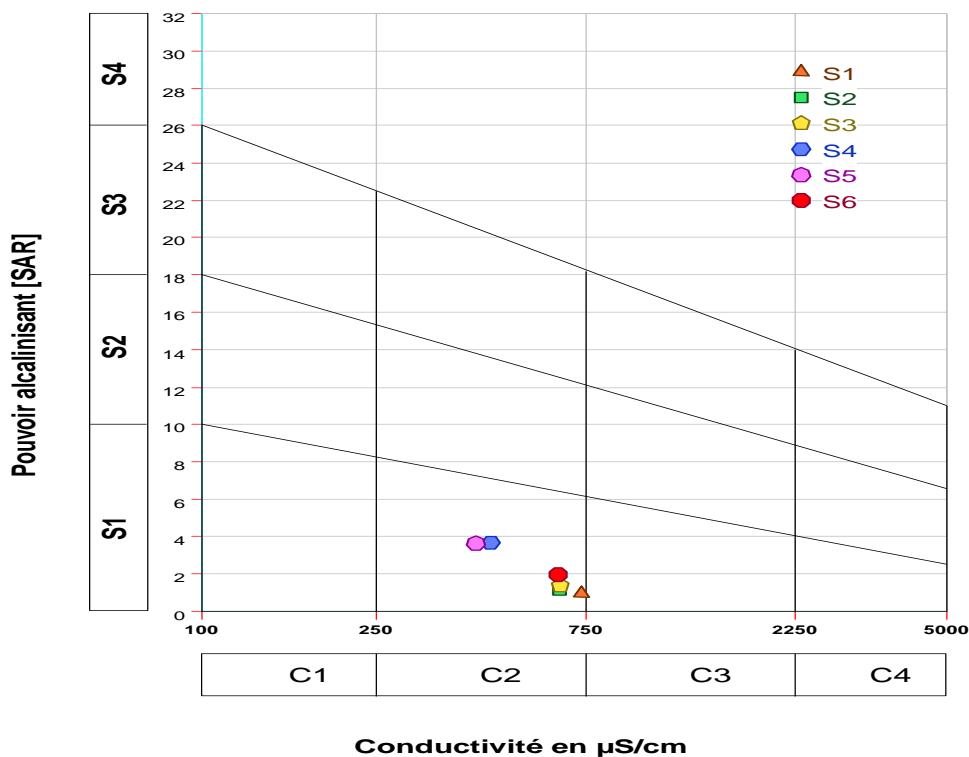


Figure 52: Classification des eaux du lac Oubeïra destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période sèche)

1.5. Etude statistique des eaux du lac Oubeïra

1.5.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. Le but de cette analyse statistique (ACP) est de faire dégager les associations qui peuvent éventuellement exister et de ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport aux autres. Cela nous permis de donner une idée préalable sur les éléments et les sites de pollution.

L'analyse en composantes principales des eaux du lac Oubeïra a été effectuée sur une matrice de données constituée de 12 variables (T, CE, pH, Eh, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et NH_4^+) et 12 individus (échantillons) qui se contribuent sur deux périodes d'échantillonnage humide et sèche à l'aide du logiciel Xlstat.

Le tableau ci-dessous (Tab.23) donne les valeurs propres de la matrice de corrélation et les proportions cumulées de la variance expliquées par les composantes.

Tableau 23 : Variance des cinq premiers axes.

| Axes | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeurs propres | 6.58 | 2.16 | 1.10 | 0.92 | 0.46 |
| % Variance | 54.81 | 17.96 | 9.186 | 7.643 | 3.84 |
| % cumulé | 54.81 | 72.77 | 81.96 | 89.60 | 93.44 |

L'analyse des variances montre que les deux premières composantes permettant de représenter le maximum d'informations. Ils expriment 72.77 % de la variance totale, avec 54.81 % pour la première composante (Dim.1) et 17.96 % pour la seconde (Tab.23)

1.5.2. Etude des variables

La contribution de chaque variable dans la formation de la composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré, autant que ce coefficient est important, autant que la variable contribue à la formation de l'axe.

Le tableau 24 de la corrélation des variables aux principaux axes, montre que les variables sont mieux représentées avec l'axe1.

Tableau 24 : Corrélation des variables aux principaux axes.

| Variables | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|-------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------|-------|
| T°C | 0.89 | 0.21 | -0.16 | -0.24 | -0.12 |
| pH | -0.73 | -0.09 | -0.46 | 0.36 | -0.08 |
| CE | 0.64 | -0.58 | 0.21 | 0.19 | 0.12 |
| Eh | -0.85 | 0.09 | 0.17 | 0.20 | 0.44 |
| Cl ⁻ | 0.96 | 0.14 | -0.05 | -0.11 | -0.03 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.90 | 0.05 | -0.08 | 0.04 | 0.32 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.54 | -0.29 | 0.45 | 0.61 | -0.15 |
| Ca ²⁺ | 0.92 | -0.14 | -0.05 | 0.18 | -0.12 |
| Mg ²⁺ | 0.84 | -0.36 | 0.05 | -0.26 | 0.25 |
| Na ⁺ | 0.51 | 0.81 | 0.02 | 0.20 | -0.01 |
| K ⁺ | 0.38 | 0.85 | -0.05 | 0.26 | 0.12 |
| NH ₄ ⁺ | -0.38 | 0.36 | 0.76 | -0.25 | -0.10 |

Le potassium et l'ammonium ont une représentation médiocre sur l'axe 1, mais assez bien corrélées sur l'axe 2. Les autres éléments tels que, la température, le pH, la conductivité électrique, le Eh, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ et le Na⁺ sont bien corrélés au premier axe. L'étude du cercle de corrélation permet de ressortir les variables corrélées entre elles, et par conséquent les dissemblances et les ressemblances entre ces dernières.

1.5.3. Représentation graphique de l'ACP des variables

Dans cette étude, nous ne présenterons que la projection des variables et des individus sur le premier plan factoriel des dimensions 1x2 qui porte une inertie totale de 72.77 % (Fig.53)

✚ Cercle des dimensions 1X2

L'observation du cercle des dimensions 1 et 2 (Fig.53-A), montre que l'axe Dim.1 (54.81 % de la variance) dans son sens positif représentant les éléments responsables des deux faciès chimiques dominants l'un chloruré-calcique et magnésien et l'autre chloruré-sodique, dont les

fortes teneurs en Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et le Na^+ et sont bien marquées. On peut considérer l'axe Dim.1 comme axe de minéralisation.

Le deuxième groupe, avec des valeurs négatives : pH et Eh qui représente le phénomène d'oxydoréduction durant la période humide.

L'axe Dim.2 (16.47 % de la variance), il est représenté par deux évolutions, l'une dans sa partie positive avec le sodium et le potassium, et l'autre dans sa partie négative figurée par la conductivité électrique (Fig.53-A).

Plan des dimensions 1X2

D'après le plan d'individus (1X2), l'axe Dim.1 dans la partie positive représente les eaux de la période sèche, ce sont des eaux caractérisées par une forte minéralisation (cercle des dimensions 1X2). La minéralisation est caractérisée par une forte évaporation ce qui augmente la concentration des minéraux dans l'eau (Fig.53-B).

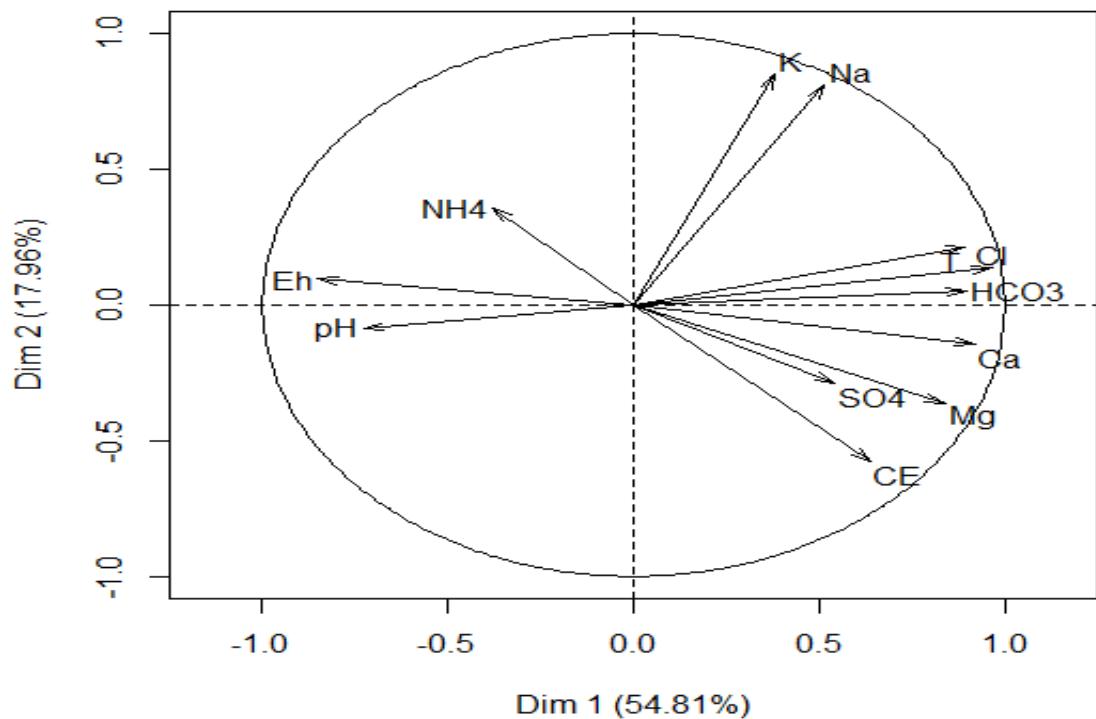
Le deuxième groupe d'individus montre par l'axe1 dans sa partie négative, caractérise les eaux de la période humide où les précipitations sont élevées.

L'axe Dim.2 distingue les eaux moyennement minéralisées dans sa partie négative composée des sites S1, S2 et S3 des deux périodes.

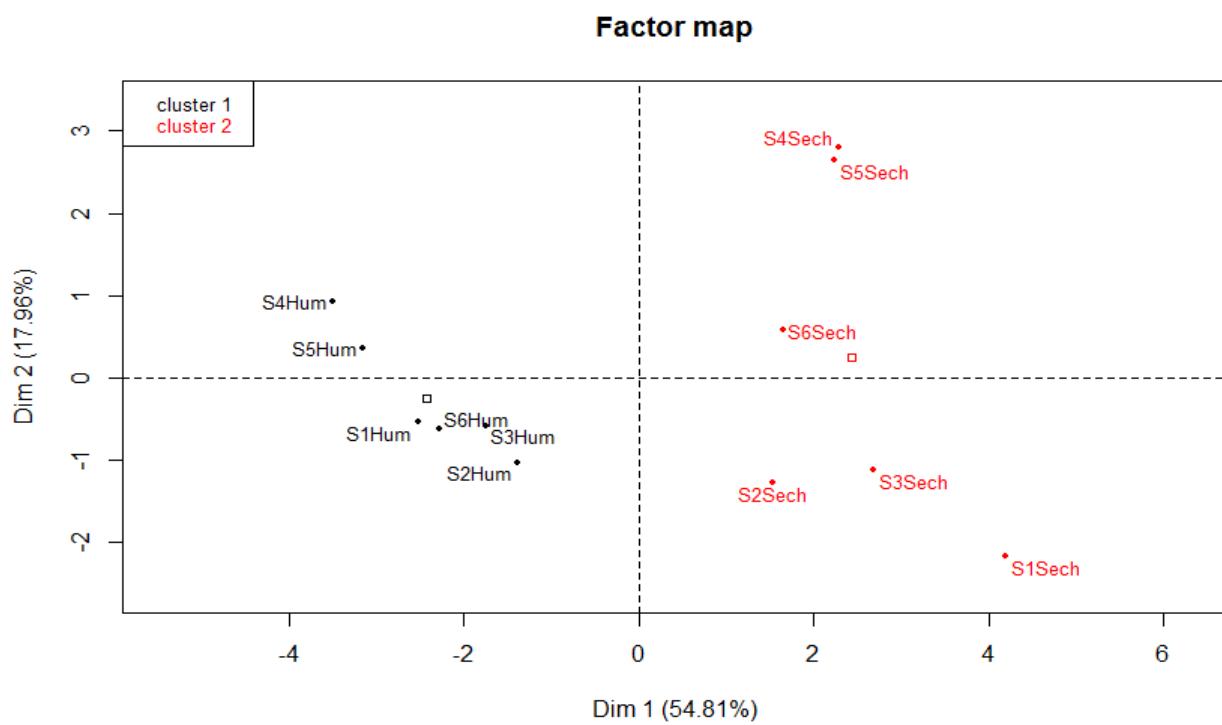
L'analyse de la projection des individus dans le plan factoriel 1 et 2 montre qu'on peut subdiviser les points de mesures en deux groupes :

Groupe 1 : Ce groupe renferme les points d'eau échantillonnés lors de la période sèche, ce sont les points de la minéralisation qui se placent sur la partie positive de l'axe1.

Groupe 2 : Les teneurs en pH, Eh et NH_4 sont importantes sur la partie négative de l'axe 1 par rapport à la partie positive. Ce groupe caractérise la pollution organique durant la période humide.



A- Projection des variables selon le plan (1X2)



B- Projection des individus selon le plan (1X2)

Figure 53 : ACP des eaux du lac Oubeïra selon le plan des dimensions (1X2)

2. Caractérisation physico-chimique des eaux du lac Tonga

2.1. Paramètres physiques et physico-chimiques

Tableau 25: Variations des paramètres physiques des eaux du lac Tonga

| Périodes | Période humide | | | | Période sèche | | | |
|------------|----------------|-----------|----------|------------|---------------|-----------|----------|------------|
| | Paramètres | T (°C) | pH | CE (µS/cm) | Eh (mV) | T (°C) | pH | CE (µS/cm) |
| Min. | 17.5 | 7.03 | 260.65 | 133 | 23.5 | 6.56 | 516 | 76.5 |
| Max. | 20.5 | 7.55 | 572 | 207 | 27 | 7.38 | 1030 | 151 |
| Moy. | 18.92 | 7.22 | 389.23 | 178.21 | 25.78 | 6.92 | 773.35 | 118.44 |
| Ecart-type | 1.13 | 0.17 | 100.94 | 27.83 | 1.22 | 0.28 | 165.38 | 23.51 |
| Normes | 25°C | 6,5 - 8,5 | 400µS/cm | / | 25°C | 6,5 - 8,5 | 400µS/cm | / |

2.1.1. Températures (T °C)

L'évolution temporelle de la température de l'eau montre des valeurs maximales en été et minimales en hiver (**El Addouli et al., 2011**). La température des eaux du lac Tonga varie de 17.5 °C (S3) à 20.5 °C (S6) avec une moyenne de 18.92 °C lors de la période humide, par contre durant la période sèche, elle varie de 23.5 °C (S7) à 27 °C (S2 et S6) avec une moyenne de 25.78 °C (Fig. 54).

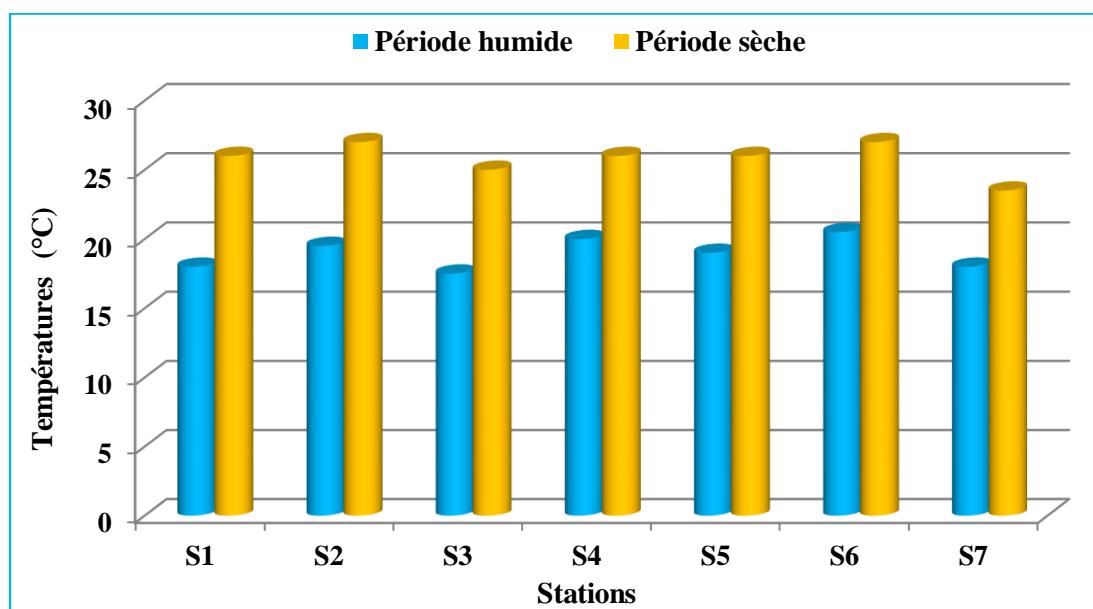


Figure 54: Variations de la température des eaux du lac Tonga.

2.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH mesure la concentration en ions H^+ de l'eau, il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu. Les valeurs du pH se situent dans la gamme de 6 et 8.5 dans les eaux naturelles (**Chapman et Kimstach, 1996**). Il diminue en présence des teneurs élevées en matière organique et augmente en période d'étiage, lorsque l'évaporation est importante (**Meybeck et al., 1996, in Derwich et al., 2010**).

Les eaux du lac Tonga au cours des deux périodes d'étude (humide et sèche) ont un pH qui ne dépasse pas les normes de potabilité ($6.50 < pH < 8.50$). Les valeurs du pH sont faibles pour la période sèche et elles sont comprises entre 6,56 et 7.38 avec une moyenne de 6.92 (Fig.55). L'état acide serait dû à une pollution anthropique provenant de la population qui entoure la station S4 et S5. Les valeurs observées en période humide sont neutres à légèrement basiques et varient entre 7.03 et 7.55.

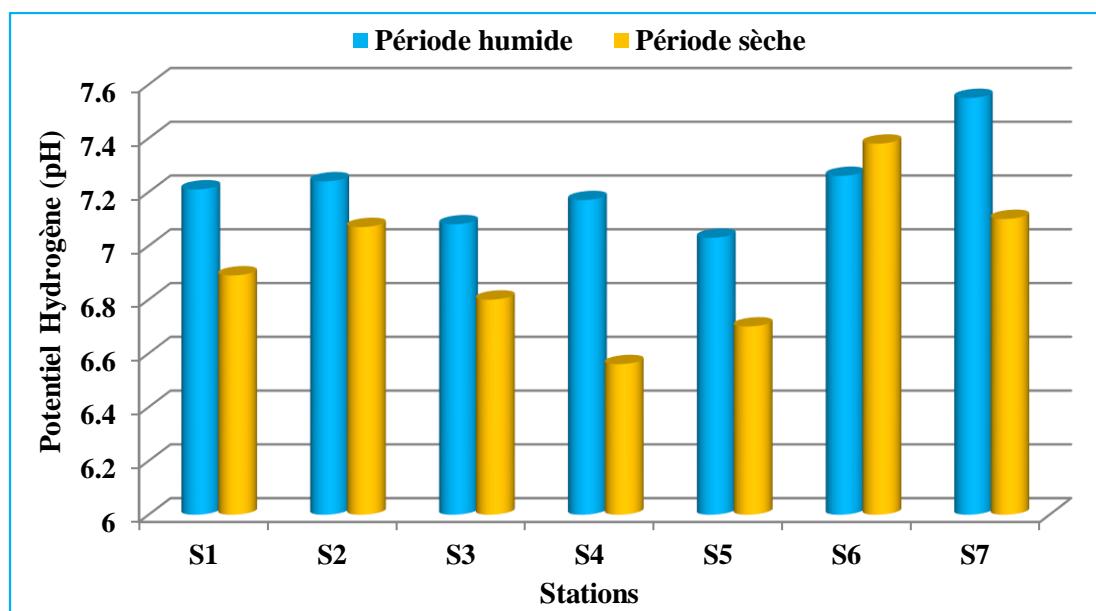


Figure 55: Variations du pH des eaux du lac Tonga.

2.1.3. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Les plus faibles valeurs de Eh sont mesurées en période sèche et les plus fortes caractérisent la période humide. Concernant la période humide, elle oscille entre 133 et 207 mV. En revanche pour la période sèche nous remarquons une légère diminution des valeurs du potentiel rédox où varient entre 76.5 et 138 mV (Fig. 56).

On remarque que les eaux du lac durant la période hivernale sont plus aérées que celles de la période estivale, donc ce paramètre est très lié à l'effet des précipitations et à la température de l'air.

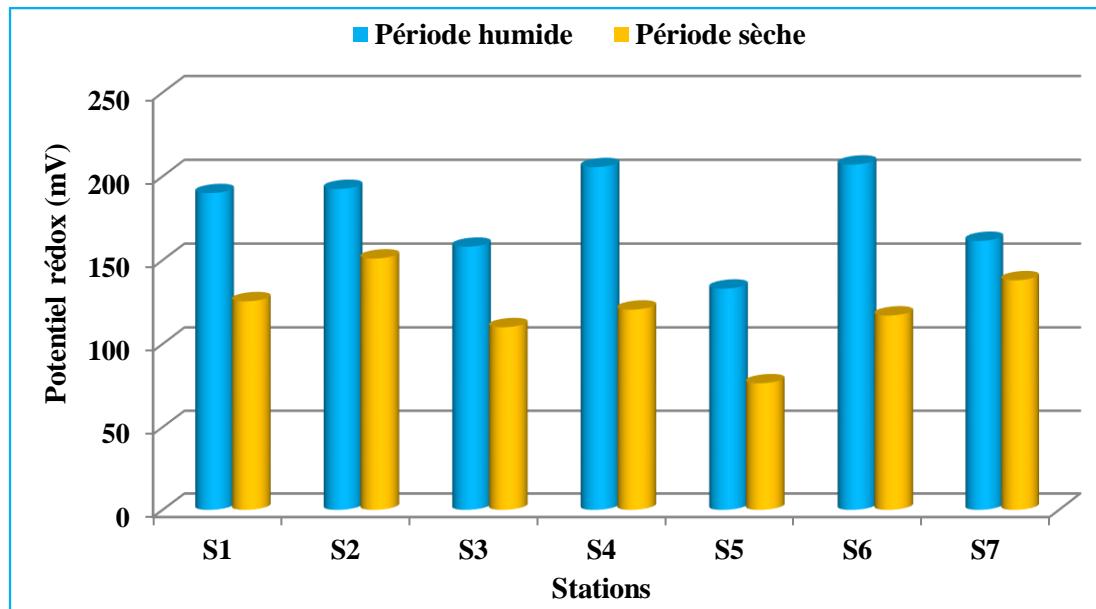


Figure 56: Variations de Eh des eaux du lac Tonga.

2.1.4. Conductivité électrique (CE)

En période humide, la variation de la conductivité électrique montre que la station S2 présente la valeur minimale de 260.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et la station S5 montre la valeur la maximale de 572 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 57).

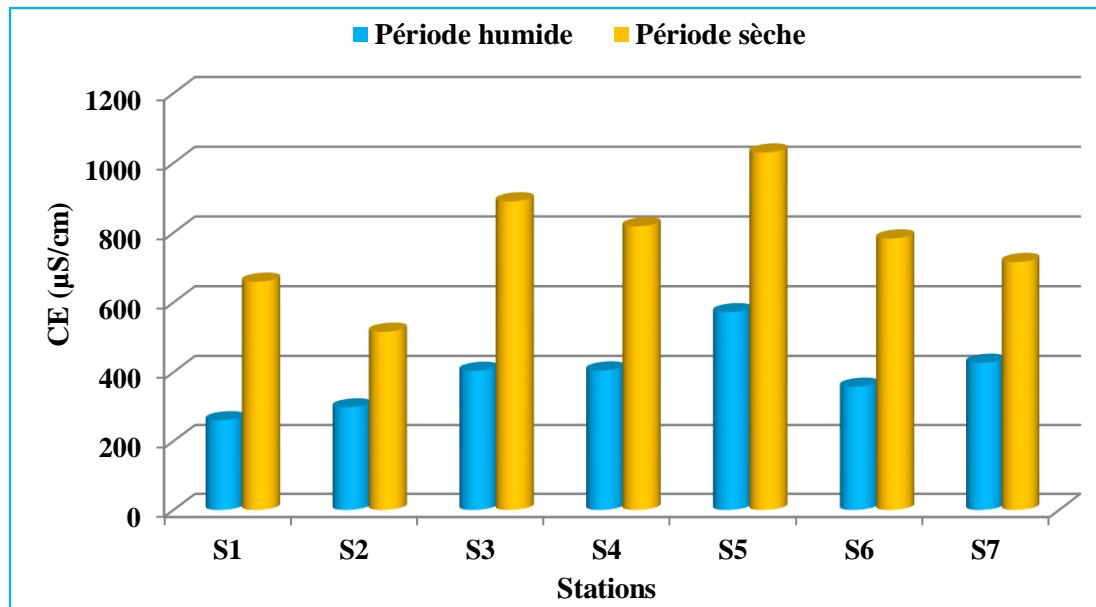


Figure 57: Variations de la conductivité électrique des eaux du lac Tonga

Dans la plupart des stations la CE est minimale en saison des pluies à cause des apports pluvieux qui diluent les concentrations. Pour la période estivale (sèche), la station S2 présentait la valeur minimale de 516 µS/cm, alors que la station S5 montrait la valeur maximale de 1030 µS/cm avec une moyenne de 773.35 µS/cm (Fig. 57).

En comparant les eaux du lac Tonga aux normes de minéralisations, on remarque que les eaux du lac étudiées présentaient une minéralisation importante.

2.2. Paramètres chimiques

2.2.1. Les cations

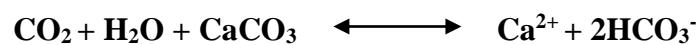
Tableau 26: Teneurs en cations (mg/l) des eaux du lac Tonga

| Périodes | Période humide | | | | Période sèche | | | |
|-------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ |
| Min. | 38 | 3.6 | 45.53 | 4.75 | 52.14 | 25.2 | 78.43 | 3.1 |
| Max. | 82 | 30 | 113.23 | 6.95 | 156.45 | 112.56 | 257.5 | 17.8 |
| Moy. | 50.28 | 19.27 | 74.71 | 5.27 | 86.28 | 53.48 | 152.06 | 10.25 |
| Ecart-type | 15.81 | 9.65 | 23.45 | 0.75 | 33.73 | 32.02 | 60.08 | 5.26 |
| Normes | 100 | 50 | 150 | 12 | 100 | 50 | 150 | 12 |

2.2.1.1. Calcium (Ca²⁺)

Le calcium est un élément de la dureté, il est généralement l'élément dominant dans les eaux naturelles. Sa dissolution résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations carbonatées et même lors de leur séjour à l'intérieur de ces formations.

Cette dissolution est due à la présence du gaz carbonique dans l'eau, le gaz provient de l'atmosphère, et des couches superficielles du sol, en raison de l'activité bactérienne selon la réaction :



Les teneurs en calcium durant les deux périodes varient entre 38 et 82 mg/l avec une moyenne de 50.28 mg/l en période humide et elles fluctuent entre 52.14 et 156.45 mg/l avec une moyenne de 86.28 mg/l en période sèche (Fig. 58). Nous observons une légère augmentation

des concentrations dans la plupart des cours d'eau durant la deuxième période, elles sont supérieures à 100 mg/l à la station S3 (Nord-Ouest du lac Tonga).

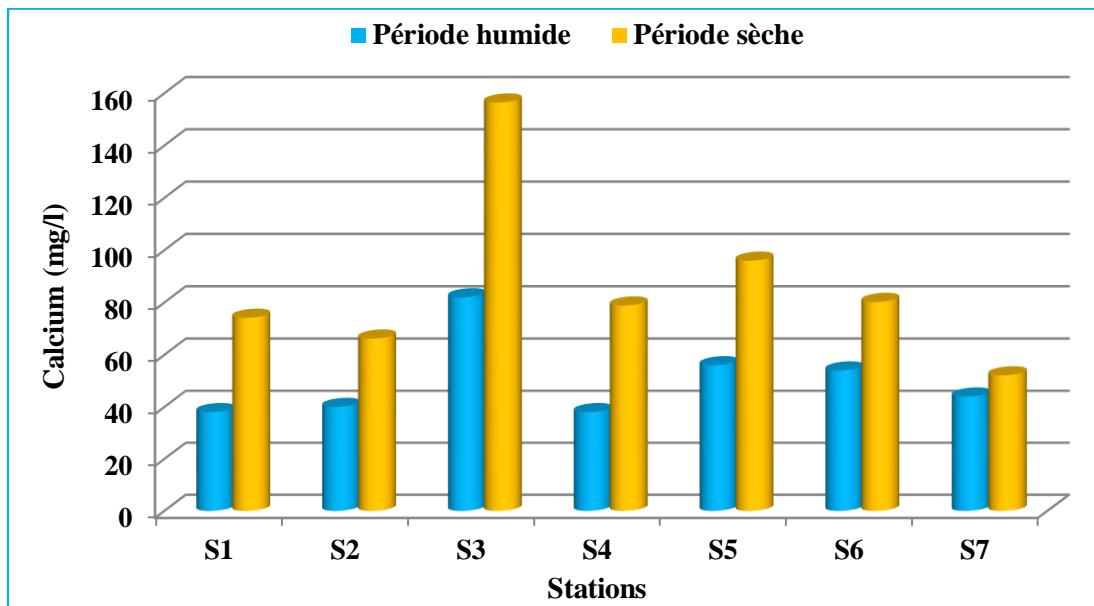


Figure 58: Variations des teneurs en calcium des eaux du lac Tonga.

2.2.1.2. Magnésium (Mg^{2+})

L'évolution des teneurs en magnésium est presque analogue à celle du calcium. Nous observons une augmentation des concentrations en magnésium durant la deuxième campagne (période sèche), atteignant 112.56 mg/l. Les teneurs les plus élevées (> 50 mg/l) sont enregistrées dans la partie Nord-Ouest (S3) et Sud-Ouest (S4) du lac Tonga (Fig.59).

2.2.1.3. Sodium (Na^+)

Les concentrations en sodium sont très faibles (inférieures à 150 mg/l), au cours de la première campagne, elles varient entre 45.53 et 113.23 mg/l avec une moyenne de 74.71 mg/l (Fig. 60). Par contre, durant la deuxième campagne, une forte augmentation des teneurs est observée au niveau des stations S3, S4 et S5 atteignant les 257.5 mg/l et qui dépassent la valeur guide (150 mg/l).

L'origine du sodium dans ces eaux est liée à la dissolution rapide des formations évaporitiques (halite NaCl) (Débieche, 2002) et à la dissolution de couches salifères par l'effet de l'évaporation (Zenati, 1999).

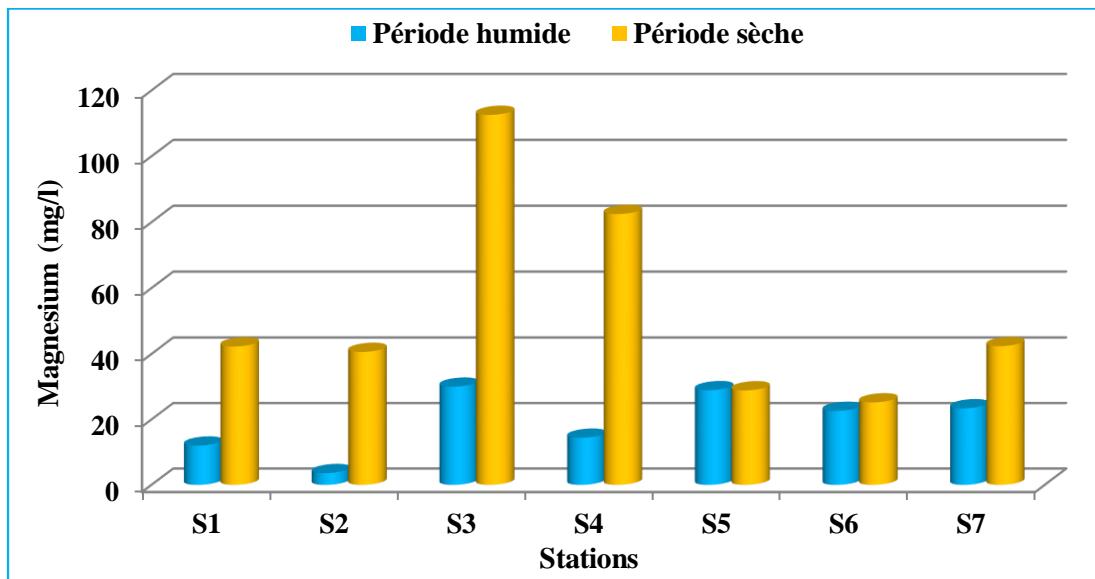


Figure 59: Variations de teneurs en magnésium des eaux du lac Tonga

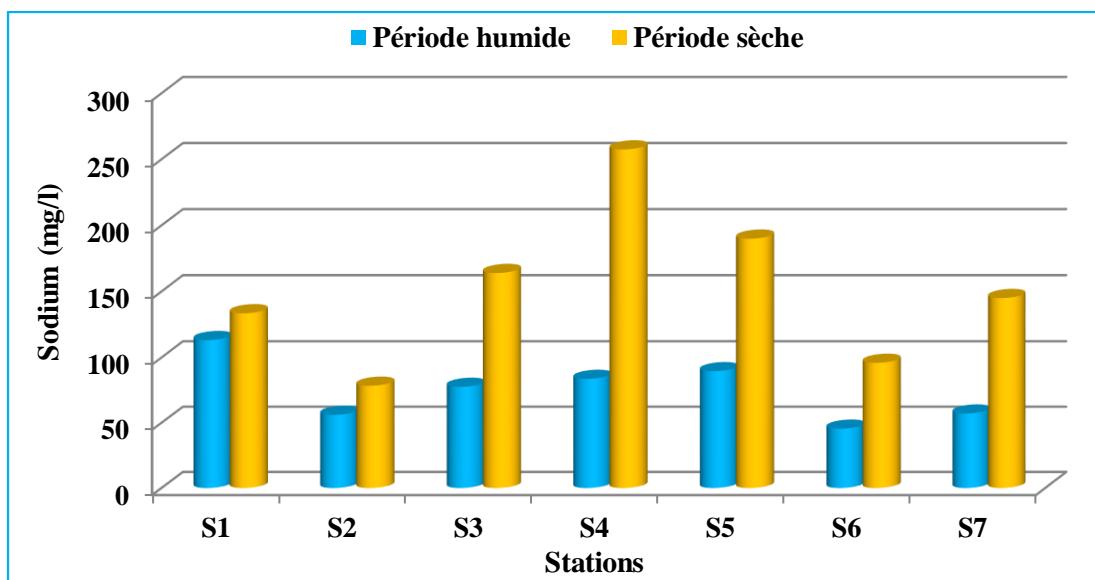


Figure 60: Variations des teneurs en sodium des eaux du lac Tonga.

2.2.1.4. Potassium (K^+)

En période humide, Les teneurs en potassium varient dans l'intervalle de 4.75 et 6.95 mg/l, avec une moyenne de 5.27 mg/l (Fig.61). Par contre, durant la deuxième période, une forte augmentation des teneurs est observée au niveau de la station S3 et S4 atteignant les 17.8 mg/l. La présence de cet élément dans les eaux des deux stations S3 et S4 (Nord-Ouest et Sud-Ouest du lac) qui sont situées à l'aval des agglomérations peuvent être liée à la contamination par les rejets domestiques dans le lac.

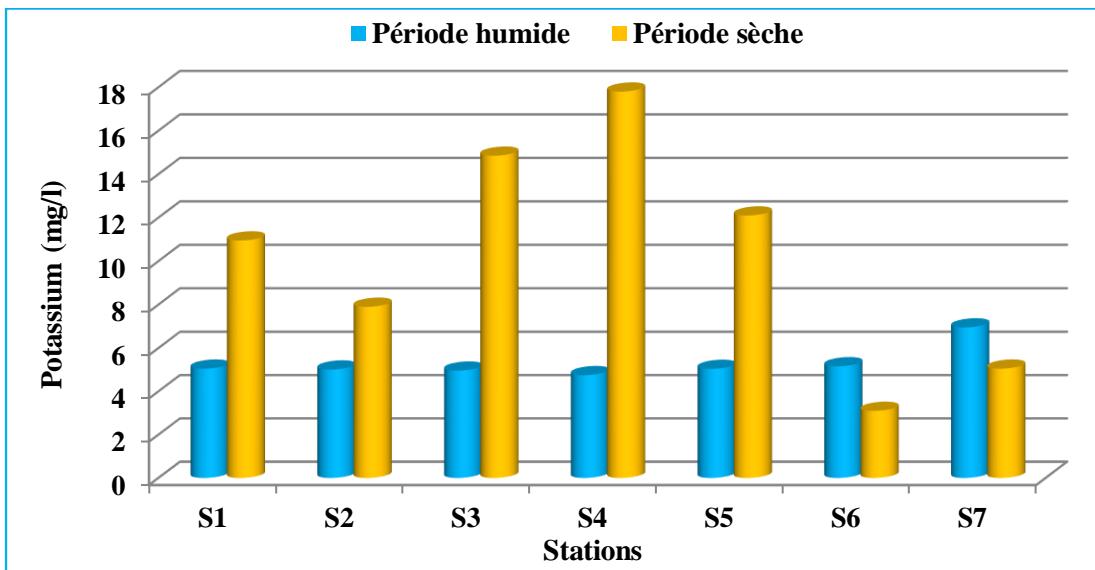


Figure 61: Variations des teneurs en potassium des eaux du lac Tonga

2.2.1.5. Ammonium (NH_4^+)

Durant les deux périodes, les teneurs en ammonium sont supérieures à la norme de potabilité (0.5 mg/l). Nous observons que les teneurs élevées en NH_4 sont marquées pendant la période humide, elles varient entre 1.85 et 4.05 mg/l avec une moyenne de 3.13 mg/l. Durant la période sèche, la teneur en ammonium fluctue entre 0.76 et 1.29 mg/l (Fig. 62).

On peut lier cette pollution à deux origines, la première au lessivage des sols riches en matières fécales animales et humaines pendant la saison pluviale. La deuxième pendant la saison sèche, causé par les rejets directs des eaux domestiques dans le lac.

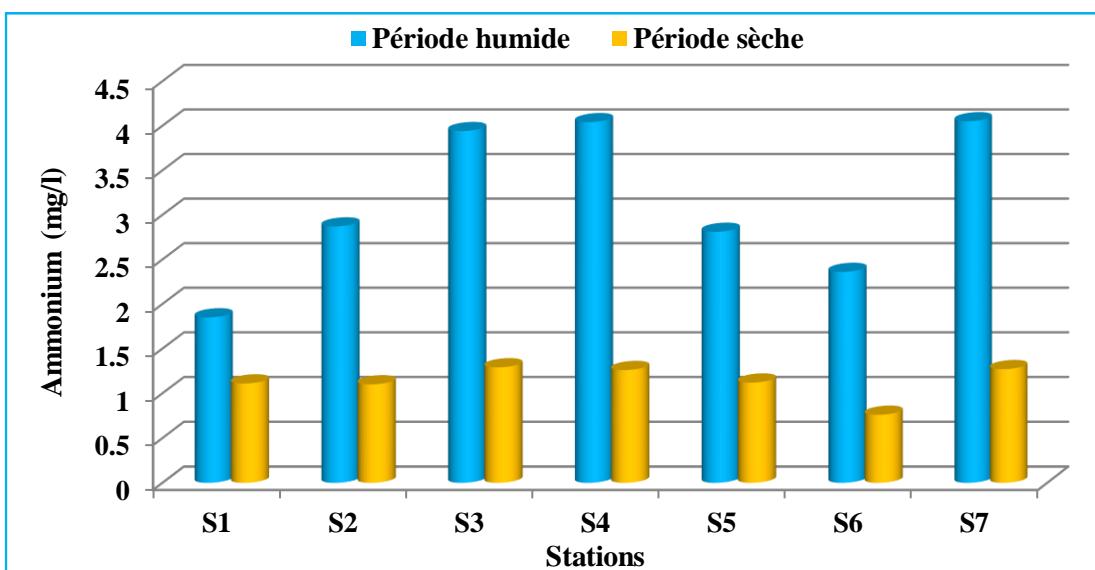


Figure 62: Variations des teneurs en ammonium des eaux du lac Tonga.

2.2.2. Les anions

Tableau 27: Teneurs en anions (mg/l) des eaux du lac Tonga.

| Périodes | Période humide | | | Période sèche | | |
|-------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ |
| Min. | 86.74 | 17.5 | 71.7 | 77.15 | 188.49 | 118.08 |
| Max. | 266.86 | 92.67 | 160.32 | 500.72 | 445.65 | 174.24 |
| Moy. | 151.31 | 54.08 | 106.33 | 228.01 | 316.77 | 147.4 |
| Ecart-type | 62.56 | 31.88 | 29.60 | 142.80 | 86.76 | 19.74 |
| Normes | 200 | 250 | 250 | 200 | 250 | 250 |

2.2.2.1. Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures sont généralement très répandus dans la nature, sous forme de sels de sodium (NaCl) de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂), l'ion chlorure est très mobile. Les concentrations en chlorures s'échelonnent de 86.74 mg/l (S2) à 266.86 mg/l (S3) avec une moyenne de 151.31 mg/l en période humide et entre 77.15 mg/l (S7) à 500.72 mg/l (S3) avec une moyenne de 228.01 mg/l en période sèche (Fig.63). Les valeurs maximales sont observées au niveau du site S3, S4 et S5 dépassant les normes recommandées par l'OMS (200 mg/l). La présence des chlorures dans ces eaux peut être liée à la pollution provenant des rejets des eaux usées des agglomérations qui entourent la station S4 et S5.

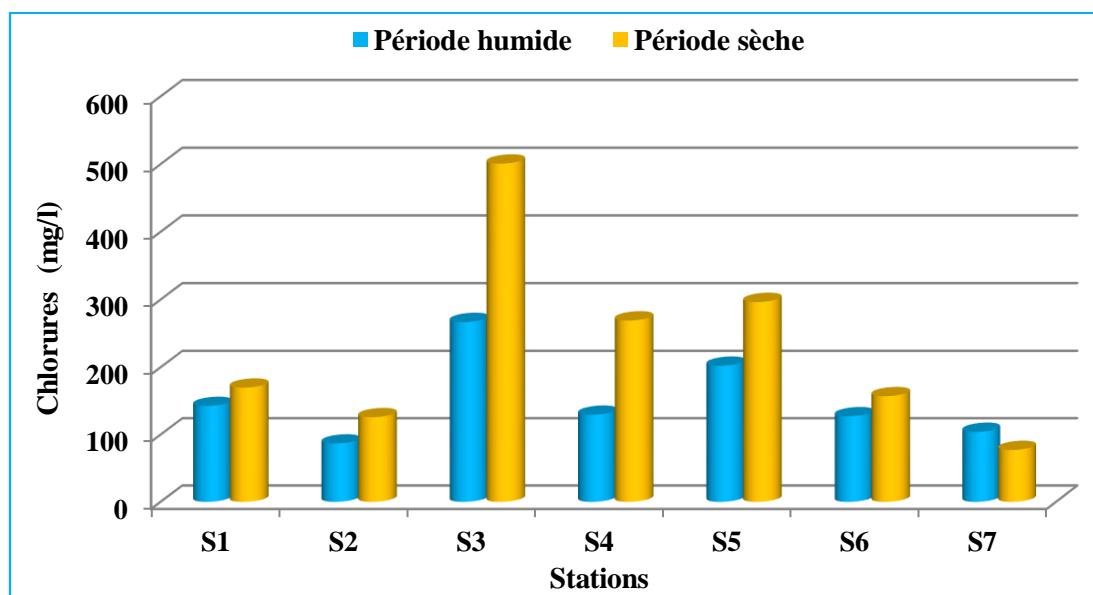


Figure 63: Variations des teneurs en chlorures des eaux du lac Tonga

2.2.2.2. Bicarbonates (HCO_3^-)

En hautes eaux, les teneurs en bicarbonates varient entre 17.5 et 92.67 mg/l, avec une moyenne de 54.08 mg/l. En basses eaux, les teneurs en bicarbonates oscillent entre 188.49 et 445.65 mg/l, avec une moyenne de 316.77 mg/l (Fig.64).

A la lumière de ces données statistiques, on constate qu'en basses eaux (période sèche), les variations des teneurs en bicarbonates sont plus importantes qu'en hautes eaux (période humide). Les fortes valeurs (> 250 mg/l) sont enregistrées dans la majorité des cours d'eau et dépassent les normes de potabilité d'eau de consommation en période sèche, à cause d'une éventuelle pollution anthropique.

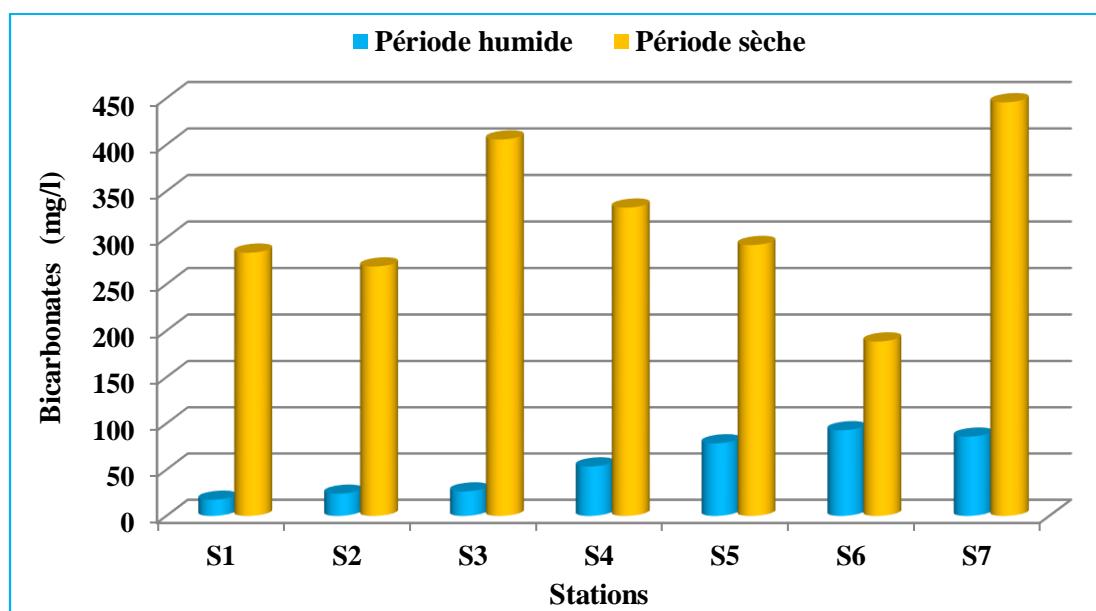


Figure 64: Variations des teneurs en bicarbonates des eaux du lac Tonga.

2.2.2.3. Sulfates (SO_4^{2-})

Durant les deux périodes, les teneurs déterminées sont comprises entre 71.7 et 160.32 mg/l avec une moyenne de 106.33 mg/l pour la première période et entre 118.08 et 174.24 mg/l avec une moyenne de 147.4 mg/l pour la deuxième période (Fig.65).

Les concentrations observées sont inférieures à la norme de potabilité (250 mg/l) pour tous les points d'eau durant les deux campagnes.

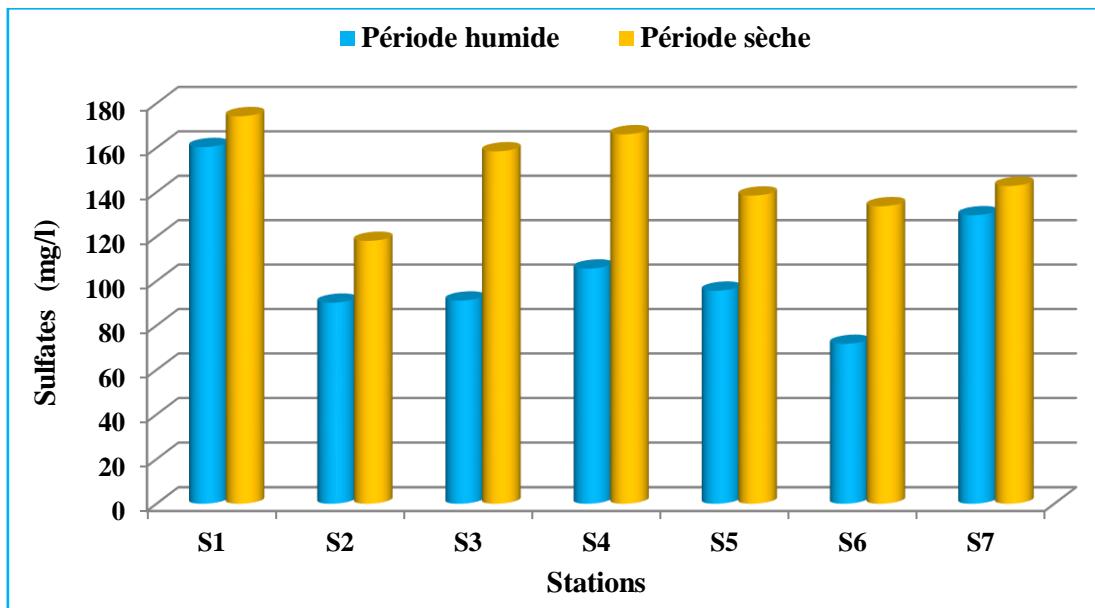


Figure 65: Variations des teneurs en sulfates des eaux du lac Tonga.

2.3. Détermination des principaux faciès chimiques des eaux du lac Tonga

Afin de tenter connaître l'origine, le mécanisme du chimisme et de caractériser la qualité des eaux des principaux lacs du Parc National d'El Kala, nous avons choisi le diagramme de représentation tel que celui de Piper, afin de mieux cerner la particularité des eaux étudiées et de bien identifier le ou les faciès chimique qui caractérisent ces eaux.

De la même façon, nous avons tracé les diagrammes correspondant aux périodes (humide et sèche). Les diverses analyses, relatives aux 07 points d'eaux du lac Tonga, sont reportées sur le diagramme de Piper (Fig.66 et fig. 67).

Durant les deux périodes, on remarque trois types de faciès caractérisant les eaux du lac Tonga :

- **Faciès chloruré-calcique et magnésien :** Ce faciès représente presque la moitié des eaux étudiées (57.14%) pour les deux périodes.
- **Faciès chloruré -sodique :** représente 42.85% des eaux de la période humide et 28.57 % des eaux pour la période sèche.
- **Faciès bicarbonaté-sodique :** Ce type de faciès est observé surtout dans les eaux de la période sèche au niveau de la station oued El Hout (S7).

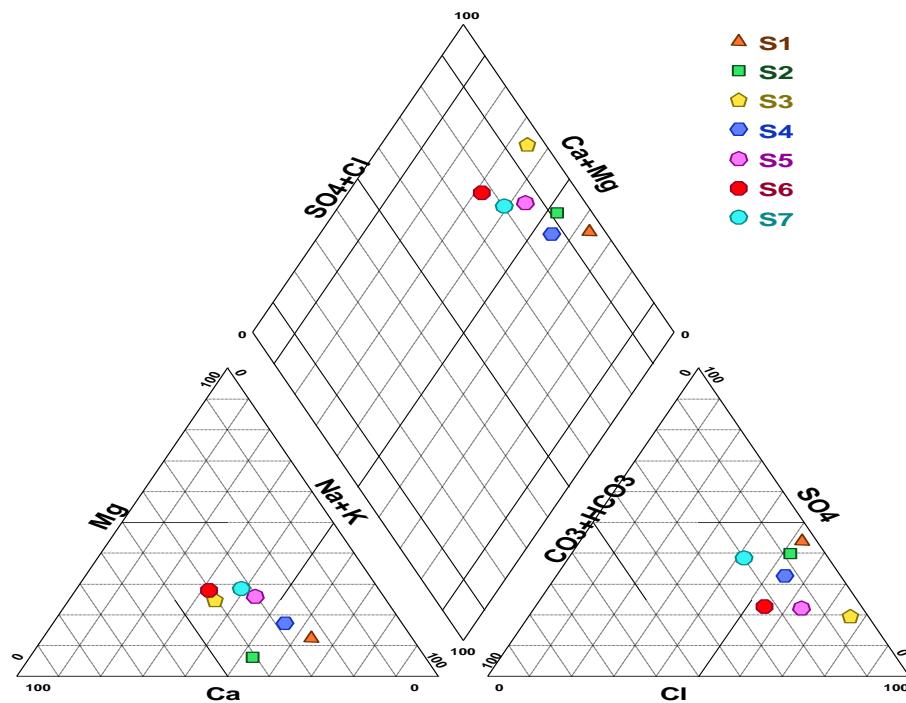


Figure 66: Diagramme de Piper des eaux du lac Tonga (période humide)

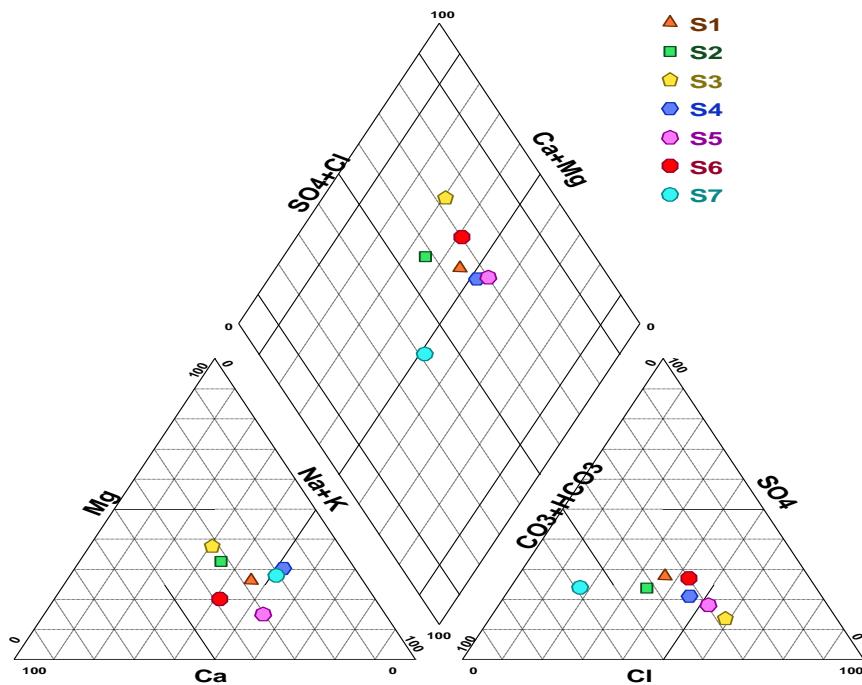


Figure 67: Diagramme de Piper des eaux du lac Tonga (période sèche)

2.4. Aptitude des eaux du lac Tonga à l'irrigation

Les sels peuvent perturber le développement physique des plantes. Du fait de l'absorption de l'eau, on peut observer des effets sur les processus osmotiques, ou du point de vue chimique par des réactions métaboliques, telles que celles causées par les constituants toxiques. En plus, les sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante (**Person, 1978**).

Pour estimer l'influence des eaux du lac Tonga sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Le rapport des résultats sur ce diagramme nous permet de classer les différents types d'eaux d'irrigation et d'indiquer les diverses utilisations selon la tolérance des cultures. L'observation du diagramme de Richards montre la répartition suivante (Fig. 68 et fig.69) :

- ❖ **Bonne (C2 S1):** Eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels et sur les sols ayant une bonne perméabilité. On remarque pour la première période que l'ensemble des points d'eau se situe dans cette catégorie et apparaît durant la deuxième période au niveau de trois (03) échantillons (Fig.68).
- ❖ **Admissible (C3 S1):** Eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés (ayant une bonne perméabilité). L'évolution de la salinité doit être cependant contrôlée. Cette classe n'existe que dans la deuxième période (sèche) avec 57.14 % des eaux du lac (Fig. 69)

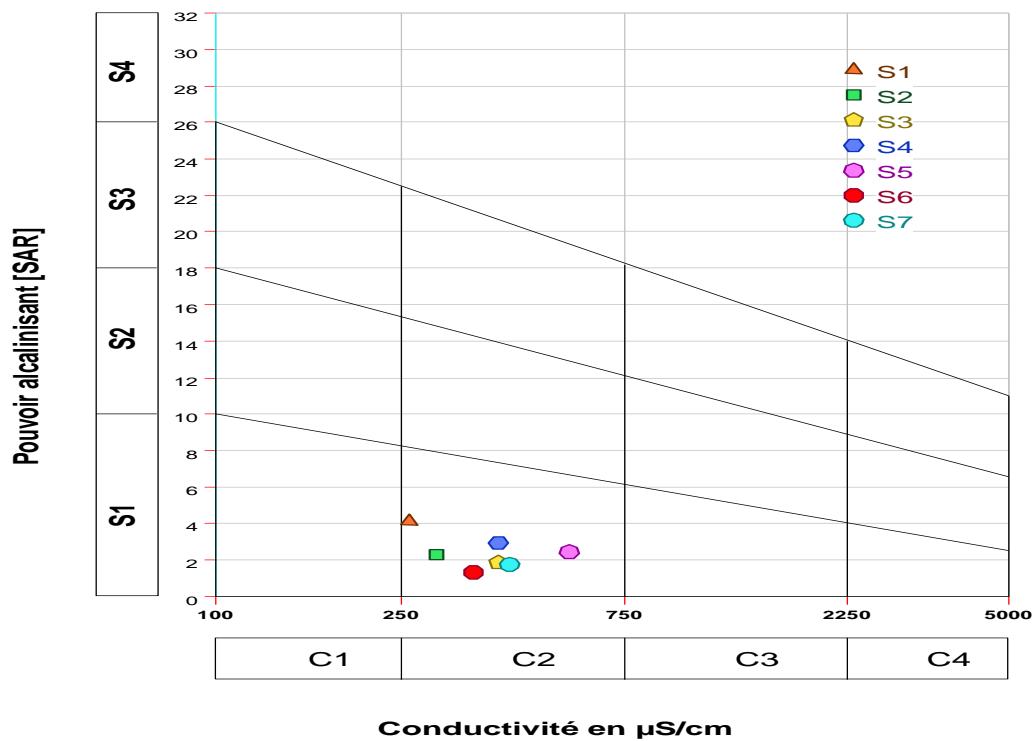


Figure 68: Classification des eaux du lac Tonga destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période humide)

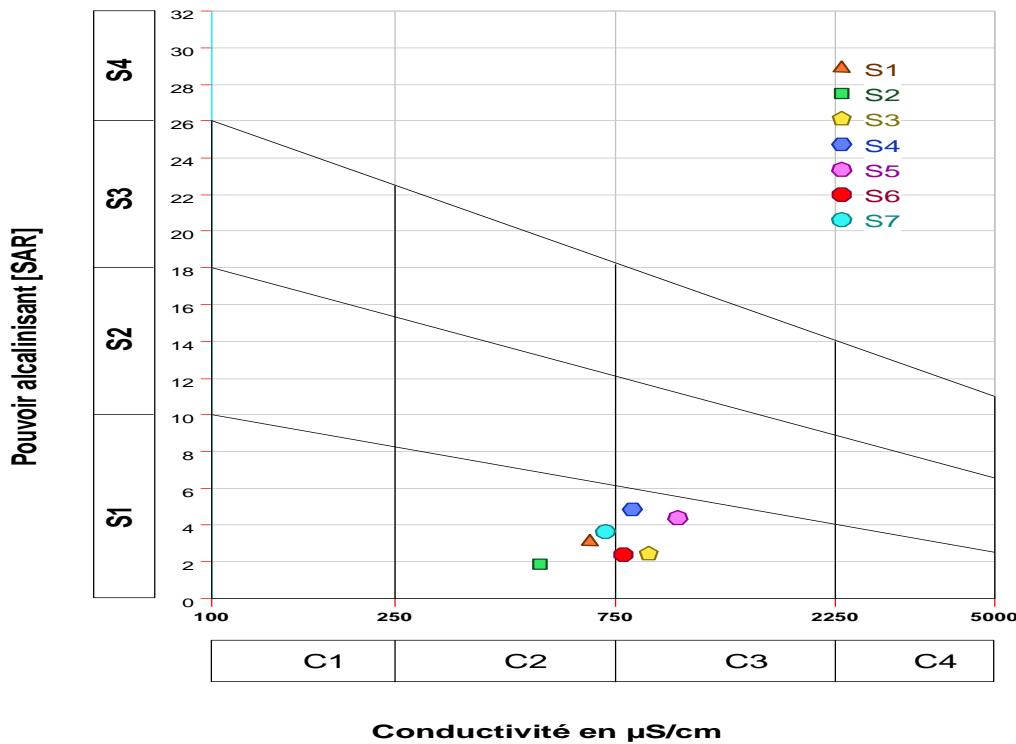


Figure 69: Classification des eaux du lac Tonga destinées à l'irrigation d'après le diagramme de Richards (période sèche)

2.5. Etude statistique des eaux du lac Tonga

2.5.1. Analyse en composantes principales (ACP)

L'utilisation de l'ACP pour l'étude de la chimie des eaux, permet de différencier les groupes ayant des caractéristiques chimiques similaires, leurs variations (facteur) suivant les axes principaux mais surtout les modes d'acquisition de la minéralisation.

L'ACP a été effectuée sur une matrice de données constituée de 7 prélèvements (7 stations x 1 campagne humide) et 7 prélèvements (7 stations x 1 campagne sèche) au cours desquels les 12 variables (T, CE, pH, Eh, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ et NH₄⁺) ont été analysées.

Le tableau ci-dessous (Tab.28) donne les valeurs propres de la matrice de corrélation et les proportions cumulées de la variance expliquées par les composantes.

Tableau 28: Variance des cinq premiers axes.

| Axes | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeurs propres | 7.91 | 1.47 | 0.88 | 0.55 | 0.47 |
| % Variance | 65.88 | 12.26 | 7.34 | 4.56 | 3.92 |
| % cumulé | 65.88 | 78.14 | 85.48 | 90.04 | 93.96 |

Le tableau 28 récapitule les valeurs propres et la variance expliquée par les premiers axes factoriels. Il montre que les deux premiers axes fournissent une variance expliquée de 78.14 % qui semble assez bonne compte-tenu de l'inertie moyenne.

2.5.2. Etude des variables

La plupart des variables physicochimiques se corrèlent bien avec le premier axe positivement, alors que le pH, Eh et l'ammonium se corrèlent négativement avec le même axe. Le deuxième axe regroupe les Cl⁻ et NH₄⁺ dans son sens positif. Ces variables seront les mieux représentées sur le plan (Tab.29)

Tableau 29: Corrélation des variables aux principaux axes

| Variables | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 | Dim.4 | Dim.5 |
|-------------------------------|--------------|-------------|-------|-------|-------|
| T°C | 0.78 | -0.47 | -0.21 | 0.03 | -0.22 |
| pH | -0.81 | -0.20 | -0.29 | -0.25 | 0.12 |
| CE | 0.90 | -0.12 | -0.23 | -0.25 | 0.12 |
| Eh | -0.85 | 0.10 | 0.24 | 0.30 | -0.29 |
| Cl ⁻ | 0.72 | 0.64 | -0.17 | 0.02 | 0.09 |
| HCO ₃ ⁻ | 0.86 | -0.28 | -0.07 | 0.17 | -0.12 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.70 | -0.28 | 0.40 | 0.28 | 0.42 |
| Ca ²⁺ | 0.80 | 0.40 | -0.39 | 0.14 | 0.05 |
| Mg ²⁺ | 0.84 | 0.32 | 0.01 | 0.36 | -0.11 |
| Na ⁺ | 0.87 | -0.03 | 0.41 | -0.18 | 0.04 |
| K ⁺ | 0.85 | 0.24 | 0.34 | 0.03 | -0.12 |
| NH ₄ ⁺ | -0.72 | 0.55 | 0.12 | -0.10 | 0.12 |

2.5.3. Représentation graphique de l'ACP des variables

La répartition des variables sur l'axe Dim.1 (65.88 % de la variance) montre l'existence de deux groupes distincts, le premier avec des valeurs positives : T °C, CE, et Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺, le deuxième groupe avec des valeurs négatives : pH, Eh et NH₄⁺ (Fig.70-A). Le premier groupe est celui de la minéralisation, les fortes teneurs en chlorures, calcium, magnésium et en sodium sont bien marquées, ce sont les éléments responsable des faciès chimiques (chloruré-calcique et chloruré-sodique).

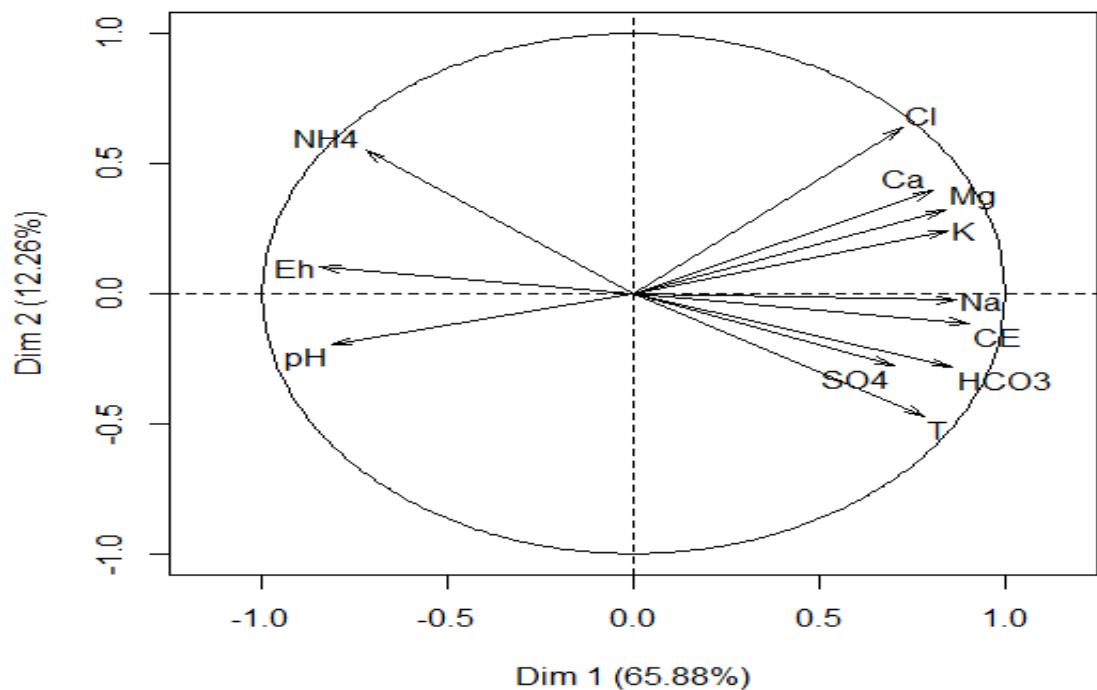
L'axe Dim.2 (12.26 % de la variance) est représenté uniquement par des variables à valeurs positives : Cl⁻ et NH₄⁺. Ces valeurs indiquent le phénomène de pollution qui est représenté au niveau de la plupart des stations durant la saison humide (Fig.70-B).

L'analyse de la projection des individus dans le plan factoriel 1 et 2 montre qu'on peut subdiviser les points de mesures en trois groupes :

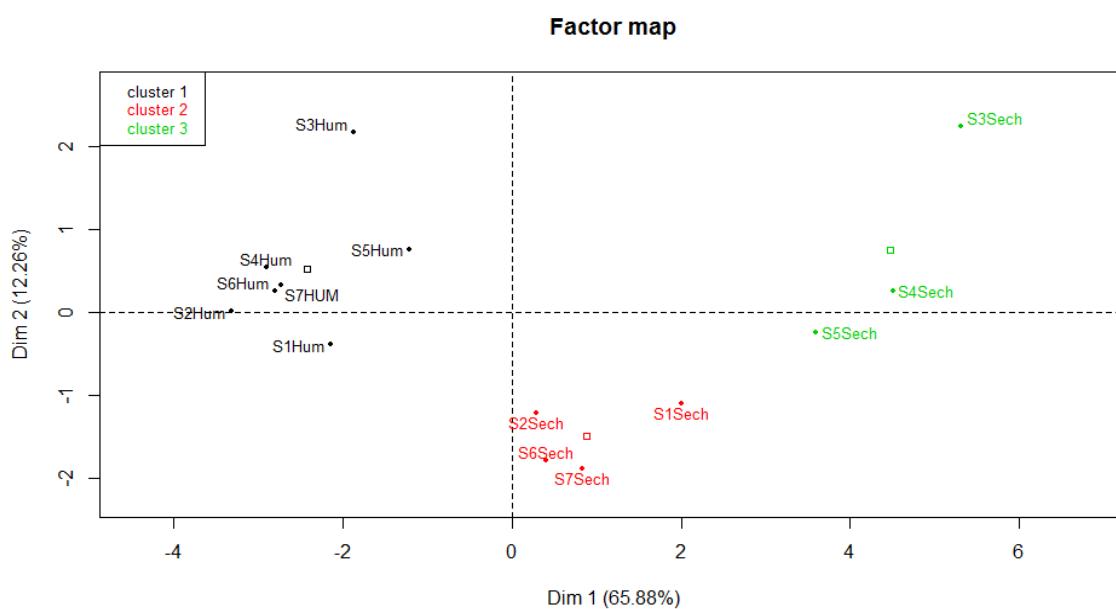
Groupe 1 : il caractérise les eaux polluées par l'azote ammoniacal qui apparaissent comme un polluant organique. Ce phénomène est visible au niveau des stations situées à proximité des terres agricoles durant la période humide.

Groupe 2 : ce sont les points les plus minéralisés avec une conductivité électrique élevée liée aux teneurs en Na⁺, HCO₃⁻ et SO₄²⁻. Ce groupe représente les stations S1, S2, S6 et S7 de la période sèche.

Groupe 3 : caractérise les stations S3, S4 et S5 de la période sèche, il regroupe les individus les moins minéralisés, avec une conductivité électrique faible. Les teneurs en Cl^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont importantes.



A- Projection des variables selon le plan (1X2)



B- Projection des individus selon le plan (1X2)

Figure 70 : ACP des eaux du lac Tonga selon le plan des dimensions (1X2)

3. Rapports caractéristiques

Afin d'apprécier les relations entre les différents éléments chimiques et déterminer leurs origines des deux lacs (Oubeïra et Tonga), nous avons utilisé les résultats des deux périodes (humide et sèche) à la fois, en se basant sur les meilleures corrélations qui existent entre les différents paramètres, ainsi que sur les faciès chimiques prédominants.

3.1. Relation Na^+ - Cl^-

Ces deux ions dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorures, car ce dernier est un élément très soluble, considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, il n'entre pas dans les réactions de précipitation et de dissolution (**Benlahcen, 1996 ; Fehdi et al., 2009**), il n'intervient pas également dans les phénomènes d'oxydo-réduction ou d'adsorption et peu influençable par l'intervention des bactéries (**Debièche, 2002 ; Jalali, 2007 ; Seghir et Kherici, 2008**).

Le sodium et les chlorures présentent un coefficient de corrélation faible pour les échantillons d'eau prélevée dans les deux sites d'étude (Oubeïra $R^2 = 0.38$ et $R^2 = 0.11$; Tonga $R^2 = 0.14$ et $R^2 = 0.21$) (Fig.71-A,D et fig.72-A,D), indiquant que les deux éléments chimiques ont des origines différentes.

3.2. Relation Ca^{2+} - Cl^-

Ces deux ions sont dominants dans les eaux des deux lacs. La représentation des concentrations en calcium en fonction des chlorures montre une bonne corrélation ($R^2 = 0.77$ et 0.93) entre les deux éléments dans les eaux du lac Tonga (Fig.72-B,E), exprimée par une répartition linéaire des données sur le graphique. Nous observons que les concentrations en calcium sont corrélées avec celles des chlorures ($R^2 = 0.76$) dans les eaux du lac Oubeïra durant la période humide (Fig.71-B). Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques. Cette relation se confirme par l'existence du faciès chloruré-calcique. Par contre, nous enregistrons une faible corrélation ($R^2 = 0.19$) pour les eaux de la période sèche (Fig.71-E), ce déficit en calcium par rapport aux chlorures est expliqué d'une part, par le phénomène d'échanges de bases avec les formations argileuses et d'autre part la dissolution de formation carbonatées.

3.3. Relation Mg^{2+} - Cl^-

La représentation graphique de l'évolution des teneurs en magnésium en fonction des concentrations en chlorures, montre une corrélation moyenne ($R^2 = 0.53$ et 0.60) entre les deux éléments pour les eaux du lac Tonga (Fig.72-C,F). Le magnésium est probablement issu des formations gypsifères ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ et $CaSO_4$) présentes dans la région. En ce qui concerne les eaux du lac Oubeïra (Fig.71-C,F), nous remarquons une faible corrélation entre les deux éléments ($R^2 = 0.15$ et 0.09), ce déficit en magnésium par rapport aux chlorures est expliqué par la fixation des ions magnésium par le processus d'échange de base.

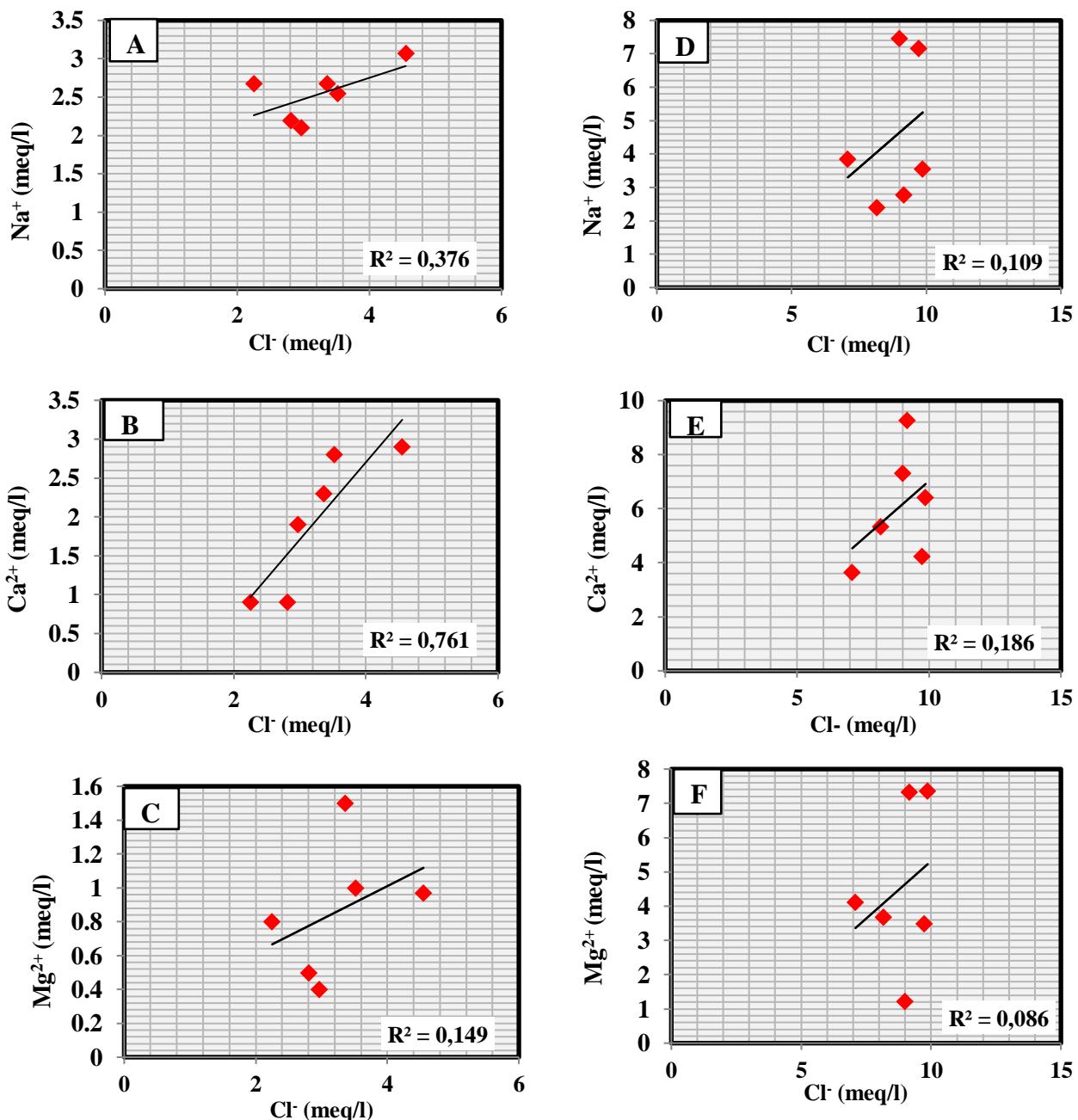


Figure 71: Relations Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} avec Cl^- des eaux du lac Oubeïra

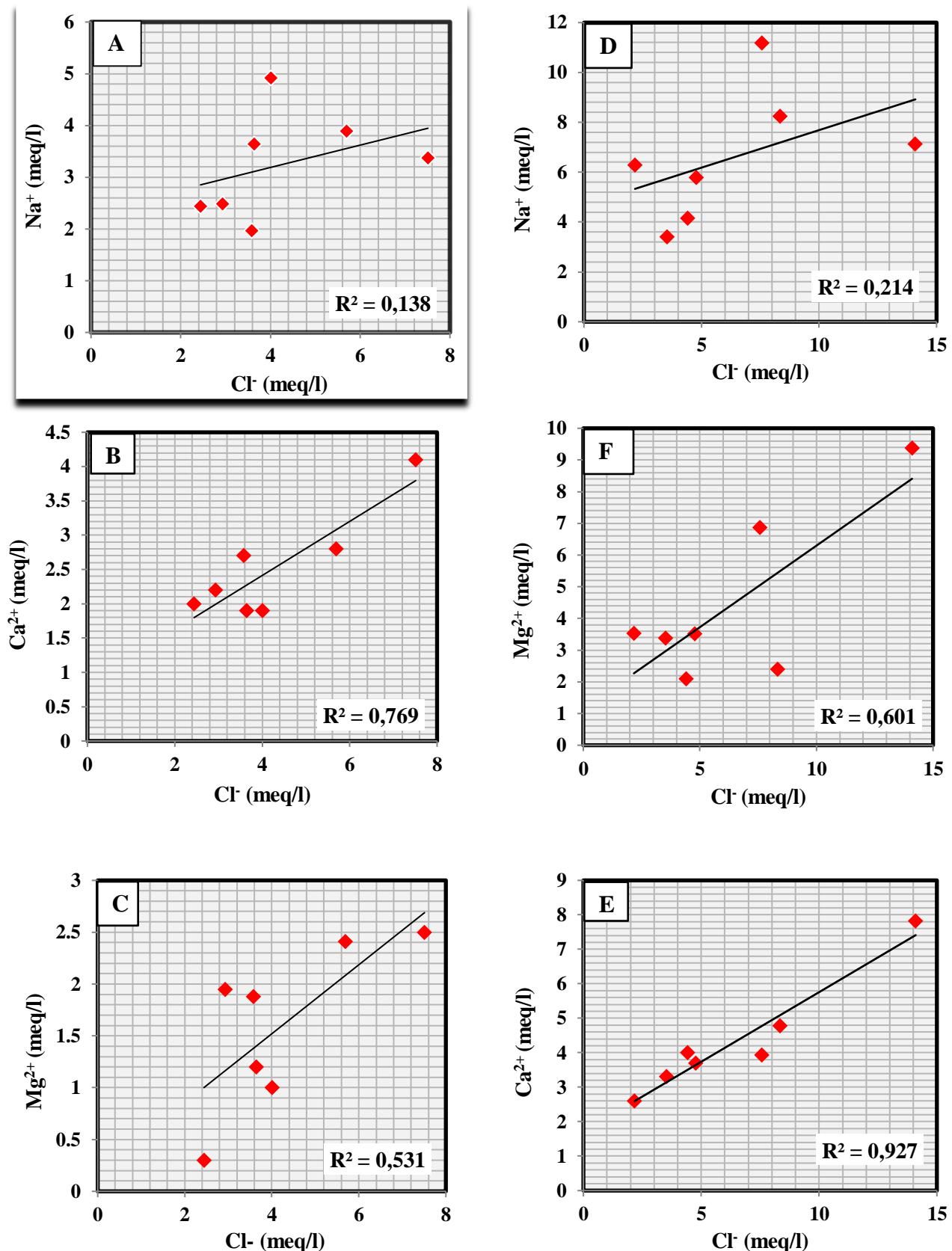


Figure 72: Relations Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} avec Cl^- des eaux du lac Tonga

(Figures : A, B et C de la période humide et figures D, E et F de la période sèche pour les deux lacs)

4. Discussion

L'étude de la qualité des eaux a permis de mettre en évidence l'importance des caractéristiques physico-chimiques des eaux au sein de la région du parc national d'El Kala. De manière générale, l'étude hydrogéochimique des eaux du lac Oubeïra et lac Tonga permet de dire que :

Les résultats de mesure de la température de l'eau des deux lacs montrent que ce paramètre présente des fluctuations saisonnières. Les valeurs maximales enregistrées en période estivale avec 26 °C pour lac Oubeïra et 25.78 °C pour Tonga, et minimales 19°C (Oubeïra) et 18.92°C (Tonga) en période hivernale.

Les fluctuations de ce paramètre abiotique sont en relation avec les conditions climatiques locales et plus particulièrement avec la température de l'air et les phénomènes d'évaporation de l'eau, dus à l'augmentation de cette dernière. Selon Semroud (1983), cette caractéristique est liée à la faible profondeur de la masse d'eau.

Les valeurs moyennes du pH enregistrées au niveau des deux lacs, présentent des pH neutre à légèrement alcalin. En effet, elles se situent entre 6.92 et 7.01 en été contre 7.22 et 7.39 en hiver.

La comparaison entre les périodes révèle que la forte dilution de la période humide se traduit par un pH neutre, alors que durant la période estivale une certaine tendance à l'alcalinisation des eaux pour les deux lacs. Certains auteurs rapportent que les lacs eutrophes ont un pH qui varie entre 5 et 9 et qui présentent une faible transparence; nos valeurs nous permettent de classer les 2 lacs dans la catégorie des lacs eutrophes.

La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. La moyenne de la CE de période sèche est supérieure à celle de la période humide, les eaux des deux lacs, le Oubeïra et le Tonga, se caractérisent par leur faible minéralisation durant l'hiver ; ceci s'expliquerait par la forte dilution des eaux ayant pour origine les fortes précipitations et la faible évaporation de l'eau. Par contre, l'augmentation de la minéralisation en période estivale serait favorisée par la diminution du débit de l'eau en faveur de la prédominance des rejets fortement minéralisés et à l'accélération du processus bactérien de la minéralisation de la matière organique (**Silva et Sacomani, 2001**).

On ce qui concerne les sulfates, les eaux étudiées présentent des teneurs dans les normes. L'évolution temporelle est marquée par un léger abaissement des teneurs en sulfates pendant la saison humide par rapport à la saison sèche sous l'effet de la dilution provoquée par les précipitations pendant la période fraîche.

Meybek et Pourriot (1995), considèrent que les eaux naturelles ont une teneur de l'ordre de 0.015mg/l en NH_4^+ . En générale une eau bien oxygénée ne contient que des traces d'ammonium. Malgré des décennies d'efforts pour diminuer les rejets de polluants dans l'environnement, l'enrichissement des milieux aquatiques par les éléments nutritifs demeure un problème important (**Chambers et al., 2001**).

Les teneurs en ammonium dépassent de loin les normes et montrent des concentrations plus importantes en période humide qu'en période sèche dans les deux zones d'étude. Cette différence temporelle est due aux apports d'engrais agricoles azotés tandis que la forte concentration annuelle provient des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère, de la réduction et la biodégradation des déchets, des déjections des organismes vivants et de la matière organique azotée, sans négliger les apports anthropiques d'origine domestique, industrielle et agricole (**Chapman et Kimstach, 1996**).

Les concentrations élevées de cet élément sont dues aux activités agricoles et l'élevage intensif aux bordures des lacs d'une part, et d'autre part les rejets urbains sont principalement liés aux rejets des Méchtats (regroupements familiaux) où les réseaux d'assainissement sont absents et ce qui induit des apports caractérisés par de fortes teneurs en ammonium.

L'origine des sels dissous dans les eaux est généralement liée aux minéraux contenus dans les roches et des formations traversées. Il est maintenant bien connu qu'une partie des éléments dissous provient des précipitations atmosphériques (**Stallard et Edmond, 1981, 1983, 1987 ; Meybeck, 1983**). Les éléments les plus importants des eaux sont les chlorures, les bicarbonates en deuxième position surtout durant la période estivale et en troisième position le sodium.

L'évolution des chlorures au niveau des eaux des deux lacs durant les périodes d'observations, montrent une forte différence dépassant la valeur limite de 250 mg/l lors de la période sèche ; cette différence est liée généralement avec le degré de minéralisation. Nous notons aussi que la comparaison des concentrations saisonnières se révèle plus fortes en été qu'en hiver.

La baisse des concentrations en période humide est attribuée à la dilution des eaux concentrées du cours d'eau par les eaux de pluie et de ruissellement faiblement minéralisées ; tandis que l'augmentation des concentrations s'explique par une contribution de la nappe plus importante, celle-ci étant plus concentrée. Pendant l'étiage, les débits faibles sont assurés par la nappe ; l'évaporation est importante. Les fortes concentrations en chlorures indiquent un état de pollution en rapport avec les activités anthropiques.

Concernant les ions bicarbonates, l'enrichissement des eaux en ions bicarbonates est dû à la dissolution des formations carbonatées (calcite) par des eaux chargées en gaz carbonique. Les plus fortes concentrations caractérisent les eaux de la période sèche dans les deux lacs.

Le sodium est considéré exclusivement comme provenant de l'atmosphère et de l'altération des roches silicatées. Le sodium est fortement conservé dans les processus hydrochimiques dans lesquels il est fortement associé avec les chlorures (**Duce et Hoffman, 1976**). Le sodium et le chlorure sont les ions dominants dans les eaux, et dans plusieurs cas ils peuvent avoir la même source (**Nordstrom et al., 1990**). Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl et des formations argileuses.

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

Les faibles teneurs des éléments alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) relevées en hiver dans les deux lacs seraient probablement dues au phénomène de dilution. Le lac Oubeïra présente les valeurs les plus élevées en ions calcium et magnésium durant la période estivale par rapport au lac Tonga.

L'approche hydrochimique montre la dominance de deux faciès importants : chloruré-calcique et magnésien et chloruré-sodique pour les eaux des deux lacs.

Le faciès chloruré-sodique résulte de la dissolution des formations évaporitiques (halite NaCl) (**Djabri et al., 2008**).

Sur toute la période d'observation, nous avons remarqué que la majorité des stations (60%) présentent un changement de faciès hydrochimique. On explique le changement du faciès par la pluviométrie (diminution et/ou augmentation des concentrations par dilution).

Dans le but d'évaluer les risques de salinisation et d'alcalinisation des eaux, les résultats des analyses physicochimiques ont été projetés sur le diagramme Richards. Sur cette représentation graphique, le risque de salinité est estimé par la conductivité électrique. Alors que le risque d'alcalinisation est quantifié par le SAR (Sodium Absorption Ratio). Ce coefficient permet d'évaluer le risque d'alcalinisation du sol par l'eau d'irrigation. Un excès de sodium réduit la perméabilité, empêchant ainsi l'infiltration de l'eau d'irrigation, ce qui entraîne une asphyxie des plantes.

Les eaux des deux lacs sont en général acceptables pour l'utilisation agricole, mais nécessitent un contrôle préalable. Nous remarquons que les eaux du lac Oubeïra conviennent mieux à l'irrigation, comparativement aux eaux du lac Tonga.

L'étude statistique par l'analyse en composante principale (ACP) a permis de déterminer que les eaux des deux lacs ont une évolution similaire (mêmes caractéristiques chimiques). Elle confirme l'existence de deux groupes plus ou moins distincts : le groupe 1 de la minéralisation exprimée dans l'eau de la période sèche et le groupe 2 des eaux riches en ammonium indiquant une pollution agricole, soit les stations de la période humide.

Le tracé de la concentration du calcium et magnésium en fonction des chlorures pour les eaux du lac Tonga montre une corrélation élevée, ce qui confirme que les chlorures et les alcalino-terreux, sont à l'origine de la minéralisation. Par contre les eaux du lac Oubeïra indiquent une faible corrélation entre le sodium, le magnésium et les ions chlorures, ces eaux sont peu minéralisées.

Conclusion

Les eaux du lac Oubeïra et lac Tonga ont un pH neutre à légèrement alcalin et une conductivité électrique faible en période humide et élevée en période sèche. La variation des paramètres chimiques des eaux est sous l'influence des changements périodiques de la température, précipitations et évaporation. Les fortes teneurs sont enregistrées durant la période sèche.

En ce qui concerne les teneurs en ammonium, elles dépassent de loin les normes et montrent des concentrations plus importantes en période humide qu'en période sèche dans les deux zones d'étude.

Le diagramme de Piper réalisé à partir de l'ensemble des analyses chimiques montre l'existence de deux faciès chimiques importants l'un chloruré-calcique et magnésien et l'autre chloruré-sodique pour les eaux du lac Tonga. Tandis que les eaux du lac Oubeïra sont caractérisées par la dominance d'un faciès chloruré-calcique et magnésien.

Concernant l'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que les eaux de la majorité des échantillons prélevés ont une qualité admissible pour les deux lacs, ces eaux sont en général acceptables pour l'utilisation agricole.

Les résultats de l'analyse en composante principale (ACP) nous a permis de déterminer deux groupes plus ou moins distincts pour les deux lacs. Le groupe 1 : comprend les stations de la période sèche caractérisées par une eau minéralisée. Le groupe 2 : caractérise les stations de la période humide qui sont affectées par la pollution organique.

Les études sur les rapports caractéristiques des éléments montrent une forte corrélation entre chlorures, calcium et magnésium, ce qui confirme que les chlorures et les alcalino-terreux sont à l'origine de la minéralisation des eaux du lac Tonga. Par contre les eaux du lac Oubeïra indiquent une faible corrélation entre le sodium, le magnésium et les ions chlorures, ces eaux sont peu minéralisées.

5. Influence de la qualité des eaux sur les sols

La relation eau-sol dans les lacs Oubeïra et Tonga peut être déterminée par l'analyse des propriétés de sols qui sont sous l'influence de la nature du plan d'eau, du climat, de la végétation et la topographie.

La description morphologique et les résultats analytiques des différents sites font ressortir cette relation, la différenciation des sols est liée aux facteurs de formation et d'évolution des facteurs de pédogénèse où la roche mère, le climat (période humide et sèche), la qualité des eaux des lacs et la nature du couvert végétale sont les facteurs déterminants.

L'eau est un facteur important de la genèse des sols, c'est l'agent principal de l'altération, de la décomposition et de la désagrégation des roches. Son rôle sur la pédogenèse est surtout perçu au travers certaines caractéristiques du climat dont les précipitations.

Au niveau des lacs du parc national d'El Kala, l'eau commande en permanence l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques des sols. Son effet est conditionné par les inondations d'hiver et l'exondation estivale.

La zone d'étude est une zone à double influence naturelle (continentale et marine) et anthropique (domestique et agricole) du fait de l'absence d'industrie autour des deux sites. Il ressort que les teneurs en ammonium enregistrées durant notre année d'étude, sont nettement élevées durant la période des hautes eaux qu'en période des basses eaux. La fraction fine est généralement riche en polluants organique et contient une grande partie de limons et de matières organiques/humique qui absorbent activement et concentrent les polluants organiques.

L'analyse de la variation saisonnière de l'azote ammoniacal des eaux a montré que la pluviométrie a favorisé le lessivage de cet élément des eaux usées, des engrains organique et minéral épandus sur les sols. En effet, plusieurs études ont montré que le véritable problème lié à l'agriculture est la contamination de la nappe par les composés azotés provenant soit des eaux usées et/ou des engrains, surtout en période pluvieuse (**Majdoub et al., 2003**).

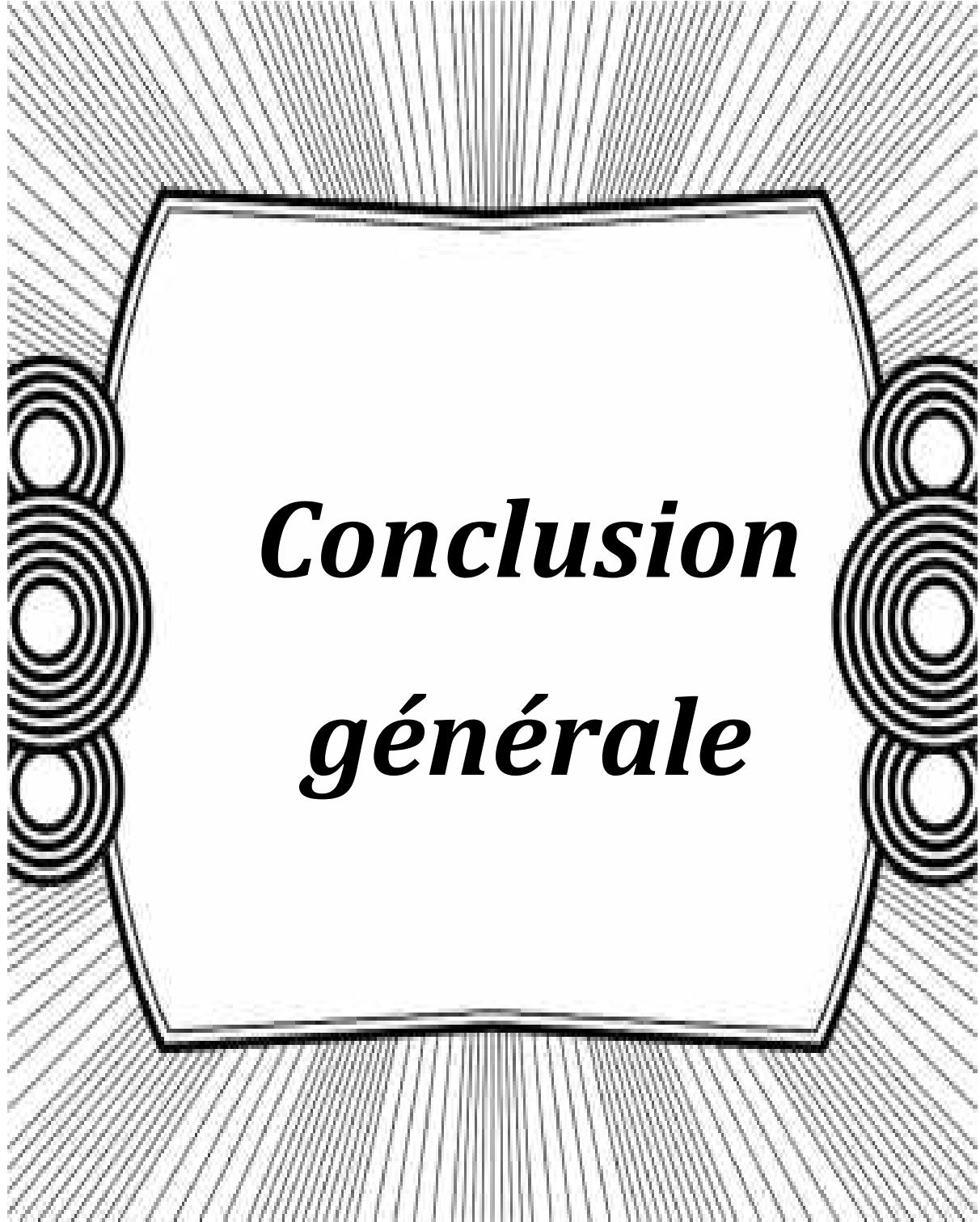
Les analyses ont montré que l'eau des deux lacs est une eau neutre à légèrement alcaline, non salée, moyennement riche en éléments minéraux et qui évolue en fonction des saisons. Cette eau s'infiltre dans les sols et affecte l'ensemble ou une partie du profil menant à un sol neutre à légèrement alcalin, non salé et un complexe adsorbant moyennement saturé en bases

échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) qui sont dominées par le calcium. L'infiltration du calcium dans le sol lors des précipitations est plus importante que pendant la saison sèche.

Un échange des minéraux entre l'eau et le sol en faveur des éléments dans l'eau. Ces derniers vont se précipiter dans le sol ce qui explique l'évolution des teneurs.

L'évolution et la différenciation des sols est sous l'influence des mouvements de la nappe ou du plan d'eau du lac Oubeïra et Tonga (une forte relation entre les caractéristiques des sols et les caractéristiques physico-chimiques des eaux). Cette relation a déterminé l'étude statistique des eaux et des sols et engendré une opposition des mêmes paramètres (la dynamique des paramètres d'eau s'évoluent en même temps que ce des sols), donc la qualité des eaux influence considérablement les sols.

D'une façon générale, l'étude de l'évolution des zones humides du parc national d'El Kala fait ressortir que les conditions climatiques et les facteurs anthropiques ont une influence importante sur la qualité de l'eau (Oubeïra et Tonga) et leur infiltration dans le sol provoque une dynamique des sols.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de cette étude est l'évolution des sols des principaux lacs du parc national d'El Kala sous l'influence de la qualité des eaux. Deux lacs ont été étudiés : lac Oubeïra et lac Tonga, font partie l'une des plus importantes zones humides de la région Nord-Est d'Algérie, tant dans le cadre écologique (richesse biologiques), hydrologique et que celui socio-économique. Les sites indiqués portent principalement sur l'étude de quelques caractéristiques physico-chimiques des sols et des eaux durant une période humide (Mai) et une autre sèche (Septembre) de l'année 2016.

L'étude effectuée a montré que la qualité des eaux de ces lacs est influencée par des facteurs climatiques (évaporation, température) et les effets anthropiques (utilisées comme exutoire pour évacuation des eaux usées et les eaux de drainage et les déchets urbains et domestiques).

Les sols du lac Oubeïra sont caractérisés par une porosité assez forte alors que les sols du lac Tonga présentent une porosité forte à assez forte. Les valeurs de la matière organique montrent que les sols étudiés sont des sols riches en matière organique en période estivale. Les analyses granulométriques sont caractérisées par la dominance de la texture limono-sableuse à sableuse pour les deux sites étudiés.

L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, nous a amené au constat que les sols de la région d'étude ne sont pas salés et caractérisés par un pH neutre à légèrement alcalin. Concernant la répartition des bases échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et NH_4^+) présents dans les sols des deux lacs montrent que ces derniers suivent une évolution saisonnière, ils se répartissent selon un cycle saisonnier, montrant un accroissement se faisant dans le sens saison humide, saison sèche pour les bases Mg^{+2} , Na^+ et K^+ . Tandis que pour d'autres bases (Ca^{+2} et NH_4^+), c'est au cours de la saison humide que les concentrations sont plus importantes. Le calcium joue le rôle de régulateur du sol particulièrement les liens entre la solution du sol et le complexe adsorbant en inhibant la biodégradation de la matière organique (**Muller, 1972**).

La morphologie et les caractéristiques physico-chimiques des sols des lacs Oubeïra et Tonga sont contrôlées par la nature du plan d'eau, la roche mère, les fluctuations saisonnières, les facteurs anthropiques et par la nature et densité du couvert végétal.

Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) révèlent, d'une part une variabilité entre sites (lacs), et d'autre part, une éventuelle variabilité entre les deux périodes. Ces variabilités sont dues aux caractéristiques propres à chaque site, à la pollution anthropique ainsi qu'à l'effet saison.

L'étude hydrochimique a montré que les eaux du lac Oubeïra et lac Tonga ont un pH neutre à légèrement alcalin et une conductivité électrique faible en période humide et élevée en période sèche. Les résultats obtenus, concernant la variation des paramètres chimiques des eaux des deux lacs est sous influence des changements périodiques de la température, précipitations et évaporation. Les fluctuations des concentrations de ces derniers sont plus élevées durant la période sèche qu'en période humide.

En ce qui concerne les teneurs en ammonium, elles dépassent de loin les normes et montre des concentrations plus importantes en période humide qu'en période sèche dans les deux zones d'étude.

Le diagramme de Piper réalisé à partir de l'ensemble des analyses chimiques montre l'existence de deux faciès chimiques importants l'un chloruré-sodique et l'autre chloruré-calcique et magnésien pour les eaux du lac Tonga. Tandis que les eaux du lac Oubeïra caractérisées par la dominance d'un faciès chloruré-calcique et magnésien.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que les eaux de la majorité des échantillons prélevés ont une qualité admissible pour les deux lacs, ces eaux sont en général acceptables pour l'utilisation agricole.

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques, a permis de déterminer que les eaux des deux lacs ont une évolution similaire (mêmes caractéristiques chimiques). Elle confirme l'existence de deux groupes plus ou moins distincts : le groupe 1 de la minéralisation exprimée dans l'eau de la période sèche et le groupe 2 des eaux riches en ammonium indiquant une pollution organique, soit les stations de la période humide.

Les études sur les rapports caractéristiques des éléments montrent une forte corrélation entre chlorures, calcium et magnésium, ce qui confirme que les chlorures et les alcalino-terreux sont à l'origine de la minéralisation des eaux du lac Tonga. Par contre les eaux du lac Oubeïra indiquent une faible corrélation entre le sodium, le magnésium et les ions chlorures, ces eaux sont peu minéralisées.

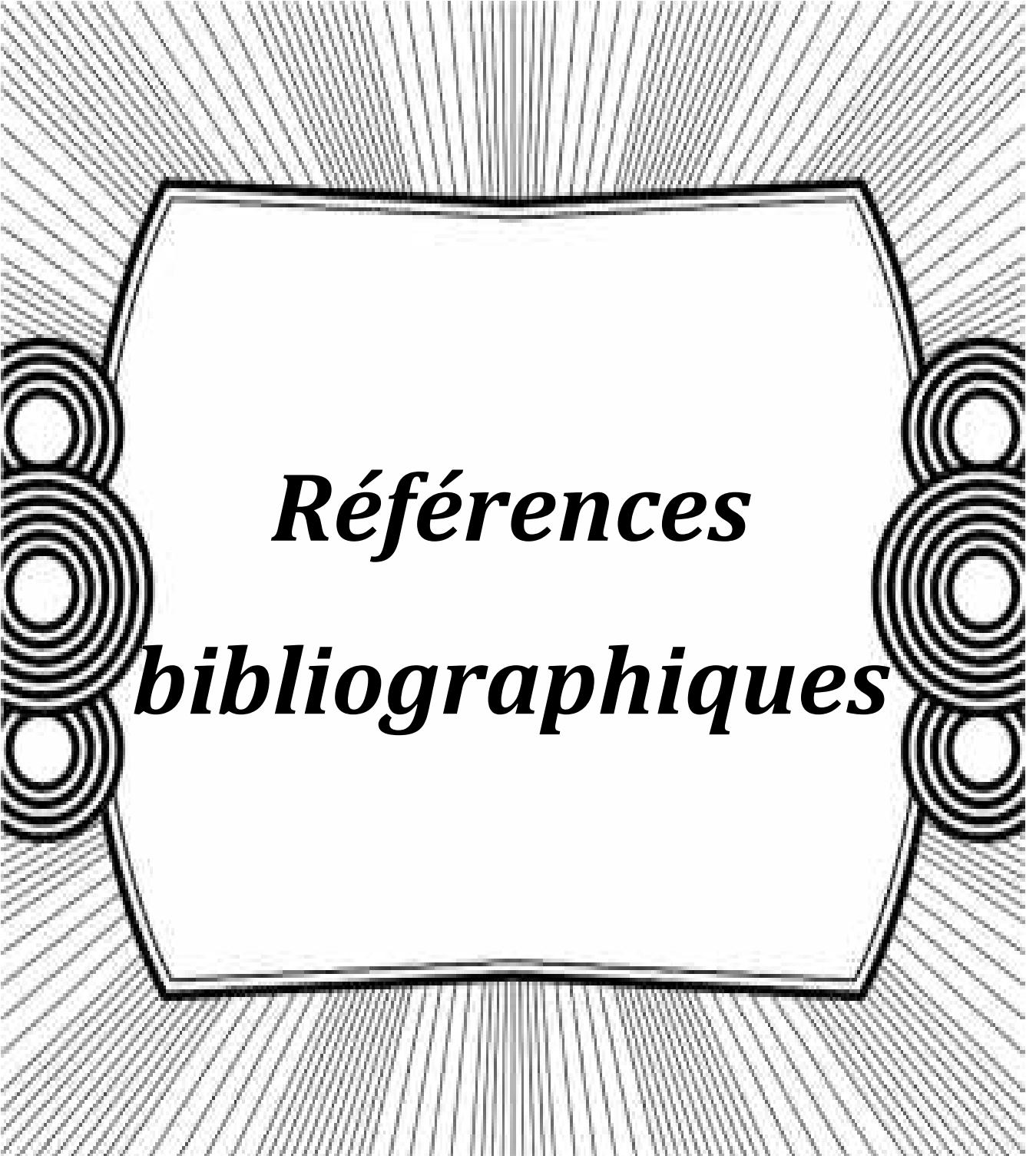
L'évolution et la différenciation des sols est sous l'influence des mouvements de la nappe ou du plan d'eau du lac Oubeïra et Tonga (une forte relation entre les caractéristiques des sols et les caractéristiques physico-chimiques des eaux). Cette relation a déterminé l'étude statistique des eaux et des sols et engendré une opposition des mêmes paramètres (la dynamique des paramètres d'eau s'évoluent en même temps que ce des sols), donc la qualité des eaux influence considérablement les sols.

Enfin, l'étude de l'évolution des zones humides du parc national d'El Kala fait ressortir que les conditions climatiques et les facteurs anthropiques ont une influence importante sur la qualité de l'eau (Oubeïra et Tonga) et leur infiltration dans le sol provoque une dynamique des sols.

La protection de ces écosystèmes sensibles contre la pollution est une nécessité pour sa préservation et sa durabilité. Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence : Il faut :

- ✓ Renforcer la lutte contre les activités anthropiques destructrices des ressources biologiques.
- ✓ Assurer la conservation des écosystèmes et des espèces menacées et/ou d'importance marquée.
- ✓ Le contrôle qualitatif et quantitatif des apports d'eau vers les lacs.
- ✓ Assainir le terrain durant la période d'assèchement, puis le renouvellement du système d'alimentation du plan d'eau (Oubeïra et Tonga) par la création de canaux d'évacuation à partir de la station d'épuration. Cette méthode très difficile avec les pouvoirs très limités, mais très intéressante pour conserver ces chères écosystèmes.

Cependant, il serait intéressant de compléter et d'approfondir cette étude si on veut sauvegarder le rôle réel des ces écosystèmes aquatiques par la surveillance et le contrôle de la qualité des eaux et des sols des zones humides de la région d'El Kala. Par exemple, il serait intéressant d'analyser les éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux et les sols et d'évaluer l'influence de ces éléments sur quelques paramètres physico-chimiques notamment la température du milieu, le pH, l'oxygène dissous et la charge en matières organiques.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abiven S., Menasseri S & Chenu C., 2009.** The effects of organic inputs over time of on soil aggregate stability- A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 41(1) : 1-12.
- **Alibou J., 2002.** Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. *Centre d'étude et de recherche sur les systèmes hydrauliques et environnementaux, Ecole Hassania des travaux publics.* 42p
- **Amoros C & Petts G.E., 1993.** Hydrosystèmes fluviaux. *Collection Ecologie n°24. Masson, Paris.* 300 p
- **Aubert G., 1983.** Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cahier ORSTOM, série Pédologique*, (20)1 :73-78.
- **Backalowicz M., 1996.** Le traçage naturel des aquifères karstiques. Les apports de la géochimie de l'eau et des isotopes du milieu. In « *Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique* ». Séminaire national tenu à Montpellier en 1996.
- **Bagnouls F & Gaussen H., 1953.** Saison sèche et indice xéothermique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 88, 193-239.
- **Bailey S.E.R., 1975.** The seasonal and daily patterns of locomotor activity in the snail *Helix aspersa* Miiller, and their relation to environmental variables. *Proceedings of the Malacological Society of London*, 41: 415-428.
- **Bailey S.E.R., 1981.** Circannual and circadian rhythms in the snail *Helix aspersa* Miiller and the photoperiodic control of annual activity and reproduction. *Journal of Comparative Physiology-A*, 142 (1) : 89-94.
- **Barour A.A.E., 2015.** Caractérisation des eaux et des sols de la haute vallée de la Medjerda. *Thèse de Doctorat en Biologie Végétale, Université d'Annaba, Algérie*, 170p
- **Batiot C., 2002.** Etude expérimentale du cycle de carbone en régions karstiques- Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologiques des systèmes. *Thèse de doctorat en Hydrogéologie. Université d'Avignon et des pays du Vaucluse.* 247p

- **Belhadj J., 1996.** Contribution à la cartographie des ornithocénoses en Algérie: Atlas de l'avifaune nicheuse du parc national d'El-Kala. *Thèse Magistère INA El-Harrach. Alger.* 199 p.
- **Bendjema A., 2014.** Variations de la qualité des eaux et son impact sur le sol des zones humides du PNEK. *Thèse de Doctorat. Université d'Annaba, Algérie* 238p
- **Benhamza M., 2007.** Contribution de la géophysique à l'étude hydrogéologique de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba), Nord Est Algérie. Conséquences de l'exploitation des gisements mercuriels sur l'environnement. *Thèse de Doctorat d'état de l'université d'Annaba, Algérie.* 174p
- **Benlahcen A.M., 1996.** Modélisation de saumures carbonatées par le traitement multivariable en hydrogéochimie à la mine Niobec de Saint-Honoré (Québec). *Mémoire de Maîtrise en Sciences de la Terre, Université du Québec, Chicoutimi,* 148p.
- **Benslama M., 1993.** Contribution à l'étude de la couverture Eco-pédologique et de la matière organique dans la différenciation des sols en milieu humide sous couvert forestier (Bassin versant du lac Tonga P.N.E.K) extrême Est Algérien. *Thèse de Magistère en en Sciences Agronomiques INA El-Harrach. Alger.* 152p
- **Benslama M., 2007.** Les sols du complexe humide de l'Algérie Nord Orientale (Formation, Organisation et Evolution) .*Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Agronomiques INA El-Harrach. Alger.* 315p
- **Bensettiti F & Lacoste A., 1999.** Les ripisylves du nord de l'Algérie: essai de synthèse systématique à l'échelle de la Méditerranée occidentale. *Ecol. Medit.* 25(1): 13-39.
- **Benyacoub S., 1993.** Ecologie de l'avifaune forestière nicheuse de la région d'El-Kala (Nord- Est Algérien). *Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne.* 273p
- **Benyacoub S., Louanchi M., Baba Ahmed R., Benhouhou S., Boulahbel R., Chalabi B., Haou F., Rouag R & Ziane N., 1998.** Plan directeur du Parc National d'El Kala et du complexe des zones humides (wilaya d'El Tarf). *Direction générale des forêts.* 300 p.
- **Benyacoub S & Chabi Y., 2000.** Diagnose écologique de l'avifaune du Parc National d'El-Kala. Composition, statut de répartition. *Synthèse n° 7. Revue des sciences et technologie, Université d'Annaba.* 98 p.
- **B.N.E.D.E.R., 2004.** Bureau national des études et du développement rural Alger.

- **Boukhroufa M., 2001.** Rôle fonctionnel du marais du Mellah pour les oiseaux d'eau: caractérisation et analyse de la variation des variables de structure du peuplement. *Mémoire Ingénieur d'Etat. Université d'Annaba. 54 p.*
- **Boulahbal R., 1999.** Caractéristiques d'un modèle de peuplement d'oiseaux d'eau nicheurs. Cas du lac Oubeïra et du marais du lac Mellah (parc national d'El-Kala). *Thèse de Magistère, Université d'Annaba. 80 p.*
- **Bouloumat L., 2001.** Structure des peuplements d'oiseaux dans les milieux ripicoles de la région d'El-Kala. Aulnaies de Boumerchen et Demnet Rihan. *Mémoire Ingénieur d'Etat. Université d'Annaba. 41p.*
- **Bremond R & Perrodon C., 1979.** Paramètres de la qualité des eaux. *Ministère de l'environnement et cadre de vie. Prévention des pollutions. 2ème édition: 259 p.*
- **Cadot A., 2005.** Le cépage *Vitis vinifera* L. cv. Fer servadou : étude de la nutrition minérale et des relations cépage, terroir, qualité du vin. *Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, 316 p.*
- **Calvet R., 2003.** Le sol, propriétés et fonctions. Tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces, *Dunod, Paris (France).455p*
- **Carrier A., 2003.** Que se passe--il dans le sol ? Serriculture maraîchère biologique. Agriculture, Pêcherie et Alimentation, Québec, 12p.
- **Chalabi B., 1990.** Contribution à l'étude des zones humides algériennes pour la protection de l'avifaune, cas du lac Tonga, Parc national d'El-Kala. *Thèse de Magistère. I.N.A. El-Harrach.133p*
- **Chambers P.A., Guy M., Roberts E., Charlton MN., Kent R., Gagnon C., Grove G., Foster N., Dekimpe C & Giddings M., 2001.** Nutrients. Section 6. Threats to Sources of Drinking Water and Aquatic Ecosystem Health in Canada. *National Water Research Institute, Burlington, Canada. 1 : 23-36.*
- **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, *2nd edition, Chapman edition, London, 59-126.*
- **Chapman J.W., Reynolds D.R & Smith A.D., 2003.** Vertical looking radar: a new tool for monitoring high altitude insect migration. *Bioscience, 53(5) : 503-511.*
- **Chaussod R., 1996.** La qualité biologique des sols. Evaluation et implications. *Etude et gestion des sols, 3: 261-277.*

- **Chenu C & Balabane M., 2001.** Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés: Une approche des matières organiques par leurs fonctions, *Perspectives Agricoles*, 272 : 42-45.
- **Costanza R., D'arge R., DE GROOT R., Stephen F.K., Monica G., Bruce H., Karin L., Shahid N., O'neill R. V., Jose P., Robert G.R., Paul S.K.K & Marjan Van Den B., 1997.** The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260 .
- **Côte M., 2006.** Guide d'Algérie -Paysages et Patrimoine-, *Ed Média-Plus, Constantine. 403p*
- **de Bélair G., 1990.** Structure, fonctionnement et perspectives de gestion de quatre écocomplexes lacustres et marécageux (El Kala, Est-Algérien). *Thèse de Doctorat, Université Montpellier II (France).193 p.*
- **Debièche T.H., 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. *Thèse de Doctorat, Université Franche-Comté, France, 235 p*
- **Décamps H., 2003.** Ripsylves: la biodiversité par l'instabilité. *Forêts Méditerranéenne. Tome 24(3): 221-230.*
- **De Gryze S., Six J., Brits C & Merckx R., 2005.** A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 37: 55-66.
- **Delas J., 2000.** La fertilisation de la vigne. *Editions FERET, Bordeaux., 154p*
- **Denef K., Six J., Bossuyt H., Frey S.D., Elliott E.T., Merckx R & Paustian K., 2001.** Influence of wet-dry cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 33:1599–1611.
- **Derradji-Benmeziane F., 2015.** Effet de la nature du sol sur la teneur en antioxydants de quelques variétés de raisin de la région d'El-Tarf. *Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, 163 p*
- **Derwich E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O & Belghity D., 2010.** Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec Oued Fes. *Larhyss Journal*, 8: 101-112.

- **Djabri L., Rouabchia A., Hani A., Lamouroux Ch & Pulido-Bosch A., 2008.** Origin of water salinity in a lake and coastal aquifer system. *Environment Geology*, 54(3) : 565–573.
- **Djamaï R., 1993.** Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). *Mémoire de Magistère, Option : Science Agronomiques. INA Alger*, 78 p.
- **Douaoui A., Gascuel-Odoux C & Walter C., 2004.** Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chéliff (Algérie). *Étude et Gestion des Sols*, 11(4): 379-392.
- **Dreux P., 1980.** Précis d'écologie. *Ed. Presses Universitaires de France. Paris*, 231p
- **Duce R.A & Hoffman E.J., 1976.** Chemical fractionation at the air/sea interface. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 4: 187-228.
- **Duchaufour Ph., 1977.** Pédologie : Pédogénèse et classification. *Ed Masson*. 477 p
- **Duchaufour Ph. 1995.** Pédologie : sol, végétation et environnement. *Ed Masson* 309p
- **Dussart G.B.J., 1966.** Limnologie : l'étude des eaux courantes. *Ed. Herman, Paris*, 250p
- **Duthil J., 1971.** Elément d'écologie d'agronomie, *Tome I, Ed J.B. Ballière et Fils*, 378p
- **El Addouli J., Chahlaoui A., Berrahou A., Chafi A & Ennabili A., 2011.** Approche de la qualité biologique de l'Oued Ouislane, au voisinage des effluents bruts de la ville de Meknes, *Larhyss Journal*, 9: 21-33
- **Emberger L., 1930.** La végétation de la région méditerranéenne: Essai d'une classification des groupements végétaux. *Rev. Géné. de Bot.*, 42: 641-662.
- **European Commission 2002.** Communication of 16 April 2002 from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Towards a Thematic Strategy for Soil Protection. 130p
- **Farsi B., 1996.** Contribution à l'étude de l'évolution floristique et structurale d'une forêt de chêne-liège incendiée (Région d'El-Kala). *Mémoire d'Ingénieur. INA El-Harrach- Alger*. 62 p
- **Fehdi Ch., Boudoukha A., Rouabchia A & Salameh E., 2009.** Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). *Afrique Science* 5(2): 217- 231.

- **Garrett R.R., 2000.** Natural sources of metals to the environment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 6: 945-963.
- **Gleick P.H., 1993.** "Water resources: A long-range global evaluation." *Ecology Law Quarterly*, 20(1): 141-149.
- **Gobat J.M., Aragno M & Matthey W., 2003.** Le sol vivant - Base de pédologie – Biologie des sols. 2^{ème} éd. *Presse Polytechniques. Université de Lausanne*. 568 p
- **Godin P.M., 1984.** Analyse et traitement des sols pollués. *Projet de cahier technique, Secrétariat chargé de l'environnement*, 155p.
- **Guy A., 1978.** Méthode d'analyse des sols. *Centre régional de documentation pédagogique de Marseille*, 191p
- **Heal O.W., Anderson J.M & Swift M.J., 1997.** Plant litter quality and decomposition: An historical overview. In G. Cadisch and K.E Giller (Eds.), *Driven By Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. pp 3-30.
- **Jalali M., 2007.** Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: An example from Tajarak, Western Iran. *Environment Geology*, 52(6) :1133-1149.
- **Joleaud L., 1936.** Etude géologique de la région de Bône et de la calle. *Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie*.199p
- **Kadid Y., 1989.** Contribution à l'étude de la végétation aquatique du lac Tonga – Parc National d'El Kala. *Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Agronomie,INA El Harrach*, 106p
- **Kaouritchev I., 1970.** Manuel pratique de pédologie. Sciences de la vie. *Tome I. Moscou*. 278p
- **Kiem R & Kandeler E., 1997.** Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type. *Applied Soil Ecology*, 5(3): 221-230.
- **Lamizana-Diallo M.B., 2005.** Effet du régime de la crue naturelle fluviale sur les hygrophytes. Cas d'un bief du Massili-Burkina Faso. *Mémoire de DEA. Laboratoire de biologie et d'écologie végétale. UFR-SVT, Université de Ouagadougou*. 77p
- **Lee C.S.L., Li X., Shi W., Cheung S.C.N & Thornton I., 2006.** Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics. *Science of the Total Environment*, 356 (1-3): 45-61.
- **Loukkas A., 2006.** Atlas des parcs nationaux algériens. *Ed. Diwane, Tissmsilet*, 96 p
- **Loveland P & Webb J., 2003.** Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review? *Soil and Tillage Research*, 70(1): 1-18.

- **Madigou E., 2005.** Influence du statut trophique de cours d'eau sur les fonctionnalités microbiennes des biofilms (*Epipsammone et Epilithon*). *Thèse de l'université Claude-Bernard-Lyon 1, France, 235p*
- **Majdoub R., Côté C., Labidi M., Guay K & Généreux M., 2003.** Impact de l'utilisation des engrains de ferme sur la qualité microbiologique de l'eau souterraine. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. *136p*
- **M.A.T.E., 2003.** Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. *Plan d'action et stratégie nationale sur la biodiversité, Tome III .16p*
- **McBride M.B., 1994.** Environmental Chemistry of soils. *Oxford University Press. New York. 406p*
- **Mebarki A., 2005.** Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. *Thèse de Doctorat d'État. Université Mentouri de Constantine. Algérie. 360p*
- **Meybeck M., 1983.** Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances. In : *Dissolved loads of rivers and surface water quantity/quality relationships (Proceedings of the Hamburg Symposium)*.141: 173-192.
- **Meybeck M & Pourriot R., 1995.** Les lacs et leur bassin. In : *Limnologie générale. Collection d'Ecologie N°25. Ed. Masson, pp.6-59.*
- **Meybeck M., Friedrich G., Thomas R & Chapman D., 1996.** Rivers Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, *Chapman edition, 2nd edition. London, pp. 59-126.*
- **Muller J.P., 1972.** Etude macromorphologique de sols ferrallitiques appauvris en argile du Gabon. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 10 (1): 77-93.*
- **Nordstrom D.K., Plummer L.N., Langmuir D., Busenberg E., May H.M., Jones B.F & Parkhurst D.L., 1990.** Revised chemical equilibrium data for major water-mineral reactions and their limitations. *American Chemical Society, Washington; 398-413.*
- **O.N.M., 2013.** Données climatiques de la région d'El Kala pour la période allant de 1995-2012. *Station météorologique d'El Kala, 47 p*
- **Ouelmouhoub S., 2005,** Gestion multi-usage et conservation du patrimoine forestier: cas des subéraies du Parc National d'El Kala (Algérie). *Thèse de Master en Science n°78, Institut Agronomique Méditerranéen .Montpellier, France, 130p*
- **Ozenda P., 1982.** Les végétaux dans la biosphère. *Ed. Doin, Paris, 431 p*

- **Person., 1978.** Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. *Water Science and Technology*, 19 (12):145-152.
- **Peterson H.G., 1999.** Water quality and Micro-irrigation for horticulture. Agriculture et Agroalimentaire. Canada.4p
- **Promeyrat S., 2001.** Contribution à l'étude de la pollution atmosphérique autoroutière, caractérisation des flux de déposition et de la contamination métallique de l'environnement de proximité, *Thèse en Sciences de la Vie, Université de Metz*, 207p
- **Quenea K., 2004.** Etude structurale et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sol d'un chrono séquence forêt/mais (Cestas, sud-ouest de la France). *Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI*.192p
- **Rizi H., 2001.** Contribution à l'étude de la biologie de la reproduction des populations de la Foulque macroule (*Fulica atra atra*) dans la zone humide du nord-est algérien : cas des lacs Oubeïra et Tonga. *Thèse de Magistère. Université d'Annaba*.51 p
- **Roche J & Yavercovski N., 1990.** El Kala : Richesse du Maghreb. Le courrier de la nature, la société nationale de la nature, 125: 18-24
- **Rodier J., Legube B & Merlet N., 2009** - L'Analyse de l'eau, 9^{ème} édition, Dunod, Paris; 1526 p
- **Rouabchia A & Djabri L., 2010.** L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El-Ma El-Abiod. *Larhyss Journal*, 8 : 55-67.
- **Rouabchia A., Djabri L., Hadji R., Baali F., Fehdi C & Hani A., 2012.** Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara lake North-East Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(1): 1-13.
- **Rouag R., 1999.** Contribution à l'inventaire de l'Herpétofaune dans la région d'El - Kala (Nord-Est algérien). *Thèse de Magistère. Université d'Annaba*.79 p
- **Sánchez-Martin M.J., Sánchez-Camazano M & Lorenzo L.F., 2000.** Cadmium and lead contents insuburban and urban soils from two medium-sized cities of Spain: influence of traffic intensity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(2): 250-257.
- **Saltiene Z., Brukstiene D & Ruzgyte A., 2002.** Contamination of soil by polycyclic aromatic hydrocarbons in some urban areas. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 22(1): 23-35.

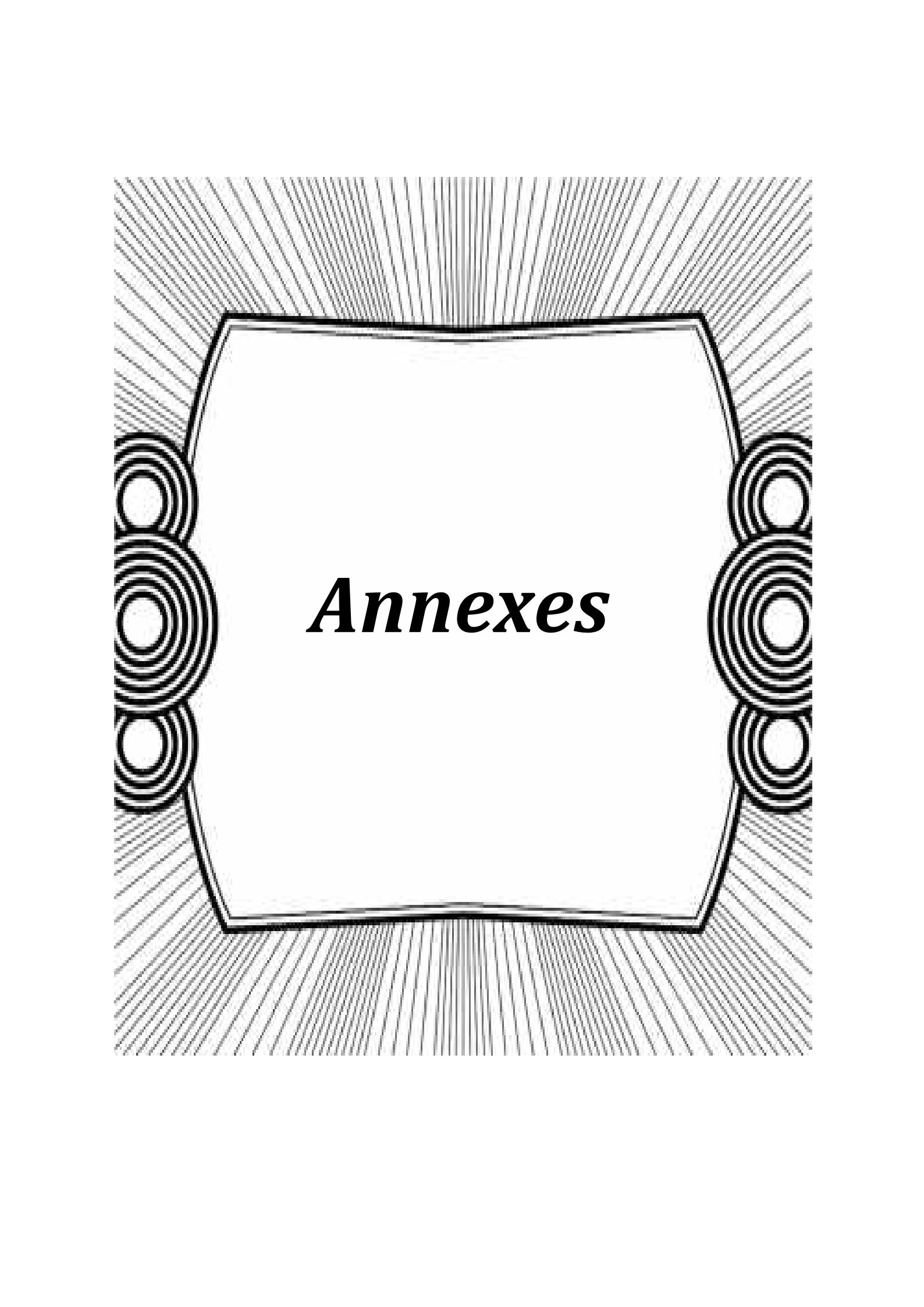
- **Samraoui B & de Bélair G., 1997.** The Guerbes-Senhadja wetlands (N.E. Algeria). Part I: an overview. *Ecologie*, 28(3): 233-250.
- **Samraoui B & de Belair.G., 1998.** Les zones humides de la Numidie orientale. Bilan des connaissances et perspectives de gestion. *Synthèse numéro spécial 4 : 1-90*.
- **Scheren P.A.G.M., Kroese C., Janssen F.J.J.G., Hordijk L & Ptasinski K.J., 2004.** Integrated water pollution assessment of the Ebrié Lagoon, Ivory Coast, West Africa. *Journal of Marine Systems*, 44 (1-2): 1-17
- **Seghir K & Khérici N., 2008.** Contribution to the study of the origin of salinity in alluvial aquifer system in the Ain Chabro-Hammamet (North-East Algeria). *American Journal of Environmental Sciences*, 4(6): 701-709.
- **Seltzer P., 1946.** Le Climat de l'Algérie. *Travaux de l'Inst. Météo. et physique du globe*. *Alger*, 219 p
- **Semadi A., 1989.** Effet de la pollution atmosphérique (pollution globale, fluorée et plombique) sur la végétation dans la région d'Annaba. *Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelles*, *Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)*, 339 p
- **Semroud R., 1983.** Contribution à l'étude écologique des milieux saumâtres méditerranéens: le lac Mellah (El-Kala, Algérie). *Thèse 3ème cycle*, *USTHB (Alger)*, 137p
- **Silva A.M.M & Sacomani L.B., 2001.** Using chemical and physical parameters to define the quality of pardo river water (Botucatu-Sp-Brasil). *Water Research*, 35(6): 1609-1616.
- **Soltner D., 1981.** Les bases de la production végétale. Tome 1, *Collection Sciences et Techniques Agricoles*. 456 p
- **Soltner D., 2003.** Les bases de la production végétale : Le sol et son amélioration. *Tome1, Ed. Broché. Collection Sciences et Technologies Végétales*, 250 p.
- **Stallard R.F & Edmond J.M., 1981.** Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of the peak discharge. *Journal of Geophysical Research*, Vol.86 (C10), pp. 9844-9858.
- **Stallard R.F & Edmond J.M., 1983.** Geochemistry of the Amazon: 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research*, 88 (C14): 9671-9688.

- **Stallard R.F & Edmond J.M., 1987.** Geochemistry of the Amazon: 3. Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. *Journal of Geophysical Research*. 92 (C8): 8293-8302.
- **Thurman E.M., 1985.** Organic Geochemistry of Natural Waters. *Nijhoff/Junk Po, Netherlands*. 497 p
- **Toubal O S., 1986.** Phyto-écologie, biogéographie et dynamique des principaux groupements végétaux du massif de l'Edough (Algérie Nord orientale). Cartographie au 1/25000 USTM. *Thèse de Doctorat 3ème cycle. Université de Grenoble*.109 p
- **Todd K., 1980.** Groundwater hydrology. Second Edition. *John Wiley, New York*, 510p
- **Viard-La rocca B., 2004.** Mise au point et validation, sur sites contaminés, (ETM-HAP) d'un test de biosurveillance en microcosme : Croissance et bioaccumulation par le gastéropode terrestre *Helix aspersa aspersa*. *Thèse en Sciences de la Vie, Université de Metz*, 266 p
- **Yoro G & Godo G., 1990.** Les méthodes de mesure de la densité apparente Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné. *Cahier ORSTOM, séries Pédologie*, 25 (4): 423-429.
- **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 de Doctorat, Université d'Annaba*, 193 p
- **Zenati N., 1999.** Relation nappe-lac, Confirmation par l'hydrochimie, Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E algérien. *Mémoire de Magistère en Chimie et Environnement, Université d'Annaba*, 151p
- **Ziane N., 1999.** Le peuplement d'Anatidés hivernants dans la région d'El-kala: Chronologie d'hivernage et rythmes d'activité. *Thèse de Magistère. Université d'Annaba*.107p

Webographie :

<http://www.lano.asso.frl>

[http://www.epa.gov/water sciences/guides](http://www.epa.gov/water_sciences/guides)



Annexes

Annexes

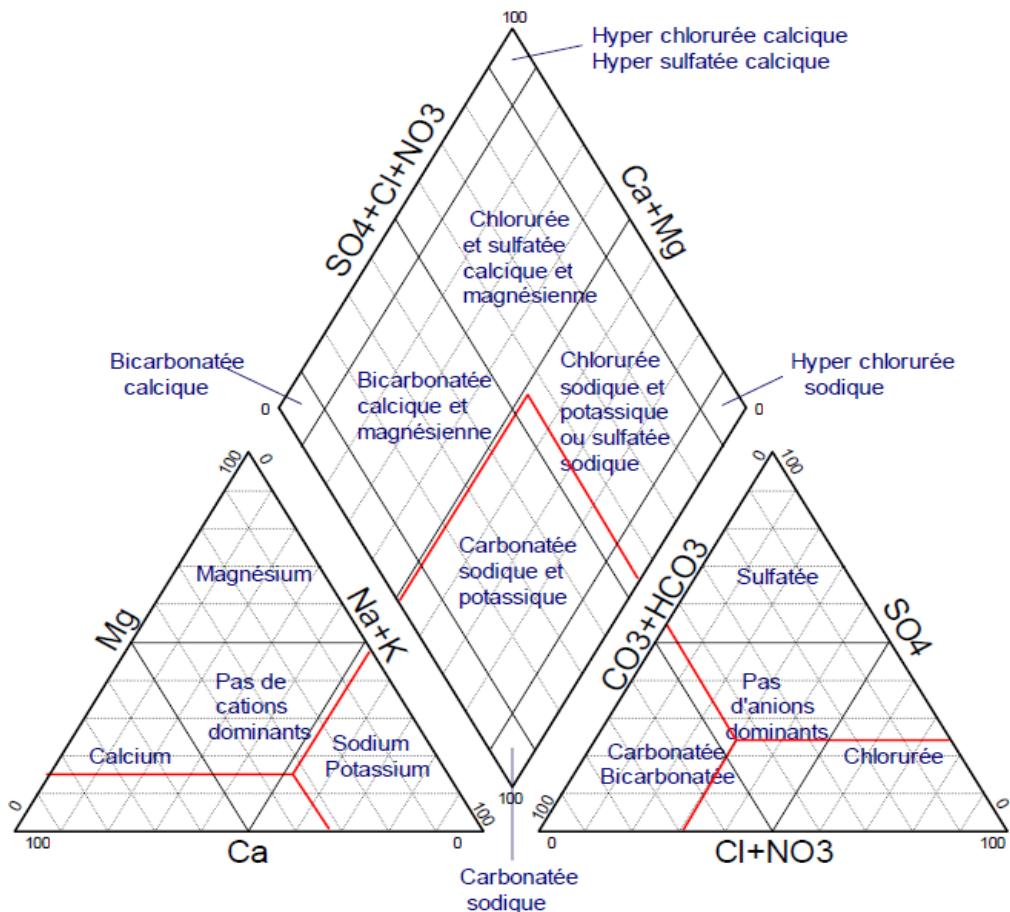
ANNEXE 1 : Gamme des pH des sols d'après Gaucher (*in Soltner, 1981*).

| pH | Appréciation |
|-------------|----------------------------|
| 3 – 4.5 | Sols extrêmement acides |
| 4.5 – 5 | Sols très fortement acides |
| 5 – 5.5 | Sols très acides |
| 5.5 – 6 | Sols Acides |
| 6 – 6.75 | Sols faiblement acides |
| 6.75 – 7.25 | Sols neutres |
| 7.25 – 8.5 | Sols alcalins |
| > 8.5 | Sols très alcalins |

ANNEXE 2 : Echelle d'interprétation de la CE (**Carrier, 2003**)

| CE (mS/cm) (1/5) | Niveau de salinité |
|------------------|---------------------|
| 0- 0.75 | Très faible |
| 0.75- 1.50 | Faible |
| 1.50- 2.25 | Moyenne |
| 2.25- 3.50 | Forte |
| 3.50- 5.00 | Très forte |
| >5.00 | Excessivement forte |

ANNEXE 3 : Diagramme de Piper. Présentation générale



ANNEXE 4 : Pour une meilleure analyse, la valeur de la teneur en Calcium, Magnésium, Sodium et Potassium a été divisée en 5 principales classes selon **Duchaufour (1995)**:

➤ Calcium

- 1- $0 \text{ Meq/100g} < \text{Ca}^{2+} \leq 2 \text{ Meq/100g}$ (très faible)
- 2- $2 \text{ Meq/100g} < \text{Ca}^{2+} \leq 5 \text{ Meq/100g}$ (faible)
- 3- $5 \text{ Meq/100g} < \text{Ca}^{2+} \leq 10 \text{ Meq/100g}$ (modéré)
- 4- $10 \text{ Meq/100g} < \text{Ca}^{2+} \leq 20 \text{ Meq/100g}$ (élevé)
- 5- $\text{Ca}^{2+} > 20 \text{ Meq/100g}$ (très élevé)

➤ Magnésium

- 1- $0 \text{ Meq/100g} < \text{Mg}^{2+} \leq 0,3 \text{ Meq/100g}$ (très faible)
- 2- $0,3 \text{ Meq/100g} < \text{Mg}^{2+} \leq 1 \text{ Meq/100g}$ (faible)
- 3- $1 \text{ Meq/100g} < \text{Mg}^{2+} \leq 3 \text{ Meq/100g}$ (modéré)
- 4- $3 \text{ Meq/100g} < \text{Mg}^{2+} \leq 8 \text{ Meq/100g}$ (élevé)
- 5- $\text{Mg}^{2+} > 8 \text{ Meq/100g}$ (très élevé)

➤ **Sodium**

- 1-** $0 < \text{Na}^+ \leq 0,1 \text{ Meq/100g}$ (très faible)
- 2-** $0,1 \text{ Meq/100g} < \text{Na}^+ \leq 0,3 \text{ Meq/100g}$ (faible)
- 3-** $0,3 \text{ Meq/100g} < \text{Na}^+ \leq 0,7 \text{ Meq/100g}$ (modéré)
- 4-** $0,7 \text{ Meq/100g} < \text{Na}^+ \leq 2 \text{ Meq/100g}$ (élevé)
- 5-** $\text{Na}^+ \geq 2 \text{ Meq/100g}$ (très élevé)

➤ **Potassium**

- 1-** $0 \text{ Meq/100g} < \text{K}^+ \leq 0,2 \text{ Meq/100g}$ (très faible)
- 2-** $0,2 \text{ Meq/100g} < \text{K}^+ \leq 0,3 \text{ Meq/100g}$ (faible)
- 3-** $0,3 \text{ Meq/100g} < \text{K}^+ \leq 0,7 \text{ Meq/100g}$ (modéré)
- 4-** $0,7 \text{ Meq/100g} < \text{K}^+ \leq 2 \text{ Meq/100g}$ (élevé)
- 5-** $\text{K}^+ \geq 2 \text{ Meq/100g}$ (très élevé)