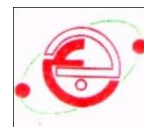


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Badji Mokhtar Annaba



Faculté des Sciences

Département de Biologie

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Option : Biologie végétale

Intitulée

**Impact des ions azotés sur la dynamique des sels solubles des
eaux du lac Fetzara (Annaba).**

Présentée par : Mme Ounnas Soraya

Devant le jury composé de :

Président : Pr. LAIFA Aziz (Université Badji Mokhtar, Annaba)

Directeur de thèse : Pr. DJAMAI Rachid (Université Badji Mokhtar, Annaba)

Examineur : Pr. KHANCHOUL Kamel (Université Badji Mokhtar, Annaba)

Examineur : Pr. ALAYAT Hacène (Université Chadli Bendjedid, El-Tarf)

Examineur : Pr. HOUHAMDI Moussa (Université 8 mai 1945, Gulema)

Examineur : Dr. LABAR Sofiane (Université Chadli Bendjedid, El-Tarf)

Année universitaire : 2017 / 2018

Remerciement

*Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude à notre **DIEU** le Grand Créateur qui ma donné le courage, la volonté, la santé et la patience pour réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à Mr le professeur **Djamai Rachid** pour son encadrement, ses nombreux conseils et son soutien tout au long de mon travail.*

J'adresse également mes vifs remerciements aux membres de jury, qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail :

*Professeur **LAIFA Aziz** de l'université Badji Mokhtar, Annaba pour l'honneur qu'il ma fait de présider le jury de ma soutenance de thèse.*

*Professeur **KHANCHOUL Kamel** de l'université Badji Mokhtar, Annaba a accepté d'examiner ce travail.*

*Professeur **ALAYAT Hacène** de l'université Chadli Bendjedid, El-Tarf a accepté d'évaluer ce travail en tant que membre examinateur de jury*

*Professeur **HOUHAMDI Moussa** de l'université 8 mai 1945, Gulema pour m'avoir examiné cette thèse.*

***Dr. LABAR Sofiane** de l'université Chadli Bendjedid, El-Tarf a accepté de participer en tant que membre examinateur de jury pour jugé ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements a Mr. **SAYAD Lamine** docteur a l'université Badji Mokhtar, Annaba pour ses précieuses remarques et ses consiels.*

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du département de Biologie et en particuliers ceux de laboratoires « sols et développement durable », d'écopédologie et de physiologie végétale.

J'adresse tous mes remerciements à toute ma promotion et à tous les professeurs qui nous ont dispensé un enseignement de qualité.

Je termine par un grand remerciement à Ma mère Metidji Houria. Mon beau père Benadouda mohamed el-Hadi et Mon marie Benadouda Faouzi ainsi que toute ma famille.

En bref, merci à tous!

Sommaire	page
Dédicaces	
Remerciement	
Introduction	07
Chapitre I : Aperçu sur l'azote	09
1. Cycle d l'azote.....	10
1.1. Fixation de l'azote.....	11
1.2. Assimilation de l'azote par les êtres vivants.....	11
1.3. Nitrification.....	12
1.4. Dénitrification.....	12
1.4. Dénitrification hétérotrophe	13
1.4.2. Dénitrification autotrophe.....	13
1.4.3. Facteurs influençant la dénitriication.....	13
2. Rétention d'azote dans les zones humides.....	15
3. L'azote géologique	15
4. Impact de l'azote sur l'environnement.....	16
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	18
1. Localisation géographique du lac Fetzara.....	19
2. Géologie du lac Fetzara.....	19
3. Géomorphologie du lac Fetzara.....	21
4. Hydrologique du lac Fetzara.....	22
4.1. Réseau hydrologique du lac Fetzara.....	23
4.1.1. Les entrées du lac Fetzara.....	23
4.1.2. Les Sorties du lac Fetzara.....	24
4.2. Etat hydrogéologique du lac Fetzara.....	25
4.2.1. Les nappes superficielles.....	26
4.2.2. Les nappes profondes.....	26
5. Pédologie.....	27
5.1. Différentes classes de sols.....	27
5.1.1. Les sols peu évolués (SPE).....	28
5.1.2. Les Vertisols (SV).....	28
5.1.3. Les sols hydromorphes (SH).....	28
5.1.4. Les sols halomorphes (SHA).....	29

5.2. la perméabilité.....	29
6. Occupation du sol.....	29
6.1. Occupation anthropique.....	29
6.1.1. Agricole.....	29
6.1.2. Industrielle.....	30
6.1.3. Urbaine.....	30
6.2.occupation naturelle.....	32
6.2.1. la montagne.....	32
6.2.2. la plaine.....	32
7. climatologie.....	33
7.1.Station de mesure.....	33
7.2. Principaux facteurs climatiques.....	33
7.2.1. Précipitations.....	33
7.2.1. Températures.....	35
7.2.2. Diagramme pluviothermique.....	36
7.2.3. Humidité relative.....	37
7.2.4. Vents.....	38
7.3. Bilan hydrique.....	38
7.3.1. Evapotranspiration.....	39
7.3.2. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	39
7.3.3. Evapotranspiration réelle (ETR).....	39
7.3.4. Ruissellement (R).....	40
7.3.5. Infiltration.....	40
7.4. Bilan hydrique.....	41
7.4.1. Représentation graphique du bilan hydrique.....	42
7.4.2. Interprétation du bilan hydrique.....	43
7.4.2.1. Station Les Salines.....	43
7.4.2.2. Station Pont Bouchet.....	44
Chapitre III : Matériel et Méthodes.....	45
1. Echantillonnage.....	46
2. Etude au laboratoire.....	47
3. Méthode d'étude.....	47
3.1. Traitement statistique.....	47
3.2. Classification hiérarchique ascendante (CHA).....	47
3.3. Diagrammes interprétatifs.....	47

3.4. Indice de saturation.....	49
3.5. Relation ions azotés- sels solubles.....	50
Chapitre IV : Approche statistique	51
1. Etude statistique des eaux de surface	52
1.1. Matrice de corrélations	53
1.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des eaux de surface.....	54
1.2.1. Plan factoriels de la première campagne.....	54
1.2.2. Plan factoriels de la deuxième campagne.....	55
2. Etude statistique des eaux souterraines	56
2.1. Matrice de corrélations	57
2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des eaux souterraines.....	58
2.2.1. Plan factoriels de la première campagne.....	58
2.2.2. Plan factoriels de la deuxième campagne.....	59
3. classification hiérarchique ascendante (CHA).....	59
Chapitre V : Etude hydrochimique	66
1. Faciès chimiques.....	62
2. Etude des paramètres physico-chimiques.....	64
2.1. Conductivité électrique.....	65
2.2. Acidité (pH).....	66
2.3. Anions.....	67
2.3.1. Chlorures (Cl ⁻).....	67
2.3.2. Sulfates (SO ₄ ⁻).....	69
2.3.3. Carbonates (CO ₃ ⁻).....	70
2.3.4. Bicarbonates (HCO ₄ ⁻).....	71
2.3.5. Nitrites (NO ₂ ⁻).....	72
2.3.6. Nitrates (NO ₃ ⁻).....	73
2.4. Cations.....	74
2.4.1. Calcium (Ca ⁺⁺).....	74
2.4.2. Magnésium (Mg ⁺⁺).....	75
2.4.3. Sodium (Na ⁺).....	76
2.4.4. Potassium (K ⁺).....	77
2.4.5. Ammonium (NH ₄ ⁺).....	78
3. Rapports caractéristiques.....	79

4. Indice de saturation.....	81
5. Le titre Hydrotimétrique (TH).....	85
6. Relation entre les ions azotés et les principaux paramètres physico-chimique.....	87
6.1. Nitrites et les principaux paramètres physico-chimique.....	87
6.1.1. Eaux de surface.....	87
6.1.1.1. Première campagne (Décembre 2013).....	87
6.1.1.2. Deuxième campagne (Mai 2014).....	89
6.1.2. Eaux souterraines.....	91
6.1.2.1. Première campagne (Décembre 2013).....	91
6.1.2.2. Deuxième campagne (Mai 2014).....	91
6.2. Nitrates et les principaux paramètres physico-chimique.....	94
6.2.1. Eaux de surface.....	94
6.2.1.1. Première campagne (Décembre 2013).....	94
6.2.1.2. Deuxième campagne (Mai 2014).....	96
6.2.2. Eaux souterraines.....	96
6.2.2.1. Première campagne (Décembre 2013).....	96
6.2.2.2. Deuxième campagne (Mai 2014).....	97
6.3. Relation entre les ions ammonium et les principaux paramètres physico-chimique.....	99
6.3.1. Eaux de surface.....	99
6.3.1.1. Première campagne (Décembre 2013).....	99
6.3.1.2. Deuxième campagne (Mai 2014).....	99
6.3.2. Eaux souterraines.....	102
6.3.2.1. Première campagne (Décembre 2013).....	102
6.3.2.2. Deuxième campagne (Mai 2014).....	102
7. Aptitude des eaux à l'irrigation.....	106
Conclusion générale.....	109
Références Bibliographiques.....	112
Listes des tableaux.....	120
Listes des figures.....	122
Résumé.....	127
Annexes	

Introduction

L'atmosphère terrestre est composée d'environ 78.1% d'azote gazeux (Mariotti , 1982). Toutes les formes d'azote (azote organique, ammonium, nitrites,...etc.) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus biologique (Pauwells et al., 1996).

Les quantités d'azote prélevés annuellement par les végétaux sont très variables pouvant atteindre plus de 100g m²/an (Bowden , 1987). Le type de végétation serait à l'origine de cette variabilité, qui dépend de la biomasse végétale et la concentration en nutriments de la colonne d'eau ainsi que du substrat (Ruffinoni , 1994). Les demandes d'azote sont plus importantes au printemps lors de la croissance des végétaux .

Les rejets des collectivités et occasionnellement de certaines industries (engrais, explosifs, oxydants) peuvent aussi concourir à l'enrichissement en nitrates des eaux superficielles. Souvent les nitrates s'infiltrent dans le sol par lessivage et finissent par polluer les nappes phréatiques et également les cours d'eau (Debieche, 2002). L'accroissement des concentrations est particulièrement significatif dans certaines nappes et varie inversement avec la profondeur.

L'Algérie est riche en zones humides qui font parties des ressources les plus précieuses sur le plan de la diversité biologique et de la productivité naturelle. Aujourd'hui, nous savons qu'elles jouent un rôle important dans les processus vitaux, entretenant des cycles hydrologiques et accueillant une flore importante, des poissons et des oiseaux migrateurs.

Les zones humides sont détruites à un rythme sans précédent, elles sont privées de leur eau par des pompages excessifs ou par la construction des barrages, elles sont même complètement drainées au profit de l'agriculture. Durant la colonisation, cela a été le cas pour de nombreuses zones humides en Algérie, tel que le lac Fetzara qui a subit plusieurs tentatives d'assèchement heureusement échouées (Boumezbeur, 2008).

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

En date du 04 juin 2003, le lac Fetzara a été classé comme étant zone humide par la convention RAMSAR, la salinité des eaux et du sol du lac a fait l'objet d'un bon nombre de travaux (Djamai, 1993 et 2007 ; Zenati, 1999 ; Belhamra, 2001 ; Habes, 2006 et 2013 ; Zahi, 2008 et 2014 ; Fekrache, 2015).

Le but de ce travail est de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux de surface et souterraines du lac Fetzara et d'évaluer l'influence des différents ions azotés sur la dynamique des sels

solubles des eaux de surface et souterraine et la salinité du lac. Pour la présentation de ce travail la démarche suivante a été adoptée.

Le premier chapitre comprend : le cycle de l'azote, sa dynamique, ses dérivés et son impact sur l'environnement.

Le deuxième chapitre présentera la zone d'étude en insistant sur le climat de la région avec les variations de la pluviométrie et de l'évaporation qui ont une influence sur le phénomène de salinisation. Avec une étude géographique, géologique, hydrogéologique.

Le troisième chapitre sera réservé au matériel et méthodes d'étude, dans lequel nous présenterons les travaux effectués sur les eaux du lac, les sorties d'échantillonnage, les techniques analytiques et les outils de traitement des données.

L'analyse statistique des résultats obtenue fait l'objet du quatrième chapitre, avec une approche statistique à partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) et classification des eaux par la méthode de classification hiérarchique ascendante (CHA) ainsi que les rapports caractéristiques.

Le cinquième chapitre comprend : l'étude hydrochimique des eaux,

Le dernier chapitre sera l'objet de la synthèse globale des résultats obtenus avec une discussion pour mieux comprendre les différentes relations entre les ions azotés et les sels solubles des eaux du lac ainsi que leur influence sur la salinité du milieu étudié.

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

Chapitre I:
Aperçu sur l'azote

Chapitre I: Aperçu sur l'azote

Sous forme de nitrates ou d'ammoniac, l'azote est très soluble dans l'eau et mobile dans les écosystèmes. Le ruissellement, l'érosion et les pluies tendent à ramener les nitrates non captés par la biomasse terrestre vers les lacs et surtout vers les nappes phréatiques et les océans.

1. Cycle de l'azote

L'azote est présent sous forme organique dans le sol et les êtres vivants (acides aminés, acides nucléiques,etc.), et également sous forme minérale (gazeux et dissoute). Le passage entre les diverses formes de l'azote (minérales et organiques) correspond à un cycle biogéochimique, faisant intervenir de nombreux organismes animaux et végétaux ainsi que des micro-organismes (Heathwaite, 1993).

Les organismes ont besoin de ce qu'on nomme l'azote fixé dans lequel les atomes sont liés à l'hydrogène dans l'ammoniac (NH_3) ou à l'oxygène dans les nitrates (NO_3^-). Le cycle de l'azote est très complexe (figure 1).

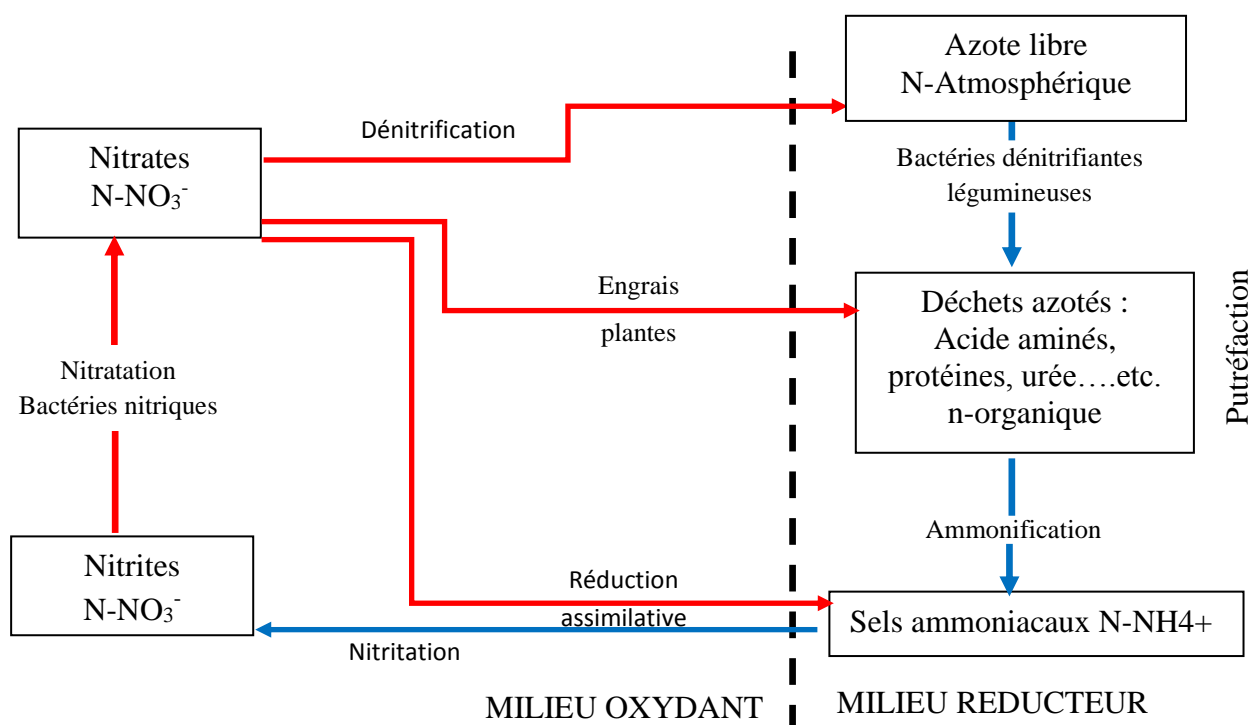


Figure 1 : Cycle de l'azote modifié (Kouakou, 2007)

Les bactéries fixatrices de l'azote produisent de l'ammoniaque (NH_4OH) à partir de l'azote atmosphérique et de l'hydrogène de l'eau (l'ammoniac est le nom de la forme soluble dans l'eau du gaz ammoniac). Certaines de ces bactéries, comme *Rhizobium*, vivent en symbiose avec des plantes, produisant de l'ammoniac. Dans les sols bien oxygénés, mais aussi en milieu aquatique

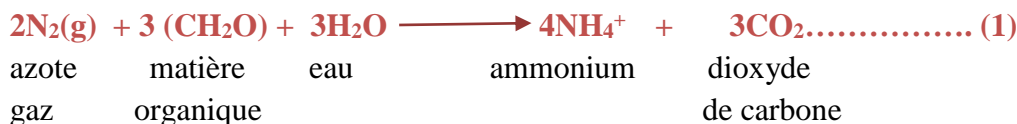
oxygéné, des bactéries transforment l'ammoniac (NH_3) en nitrites (NO_2^-), puis en nitrates (NO_3^-), au cours du processus de nitrification. On peut décomposer cette transformation respectivement en nitritation et nitratisation. La décomposition d'organismes morts (nécromasse) par des bactéries saprophytes sous forme d'ions ammonium (NH_4^+) est une autre source d'ammoniac.

En milieu anoxique (sol ou milieu aquatique non oxygéné), des bactéries dites *dénitrifiantes* transforment les nitrates en gaz diazote, c'est la dénitrification.

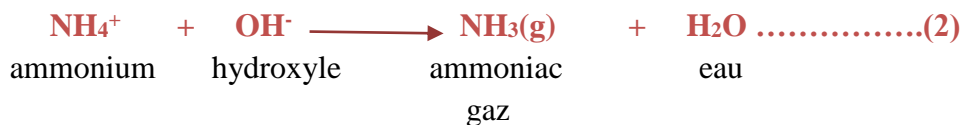
Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote: la fixation de l'azote diatomique (N_2), la nitrification et la dénitrification (Daniel et al, 1999).

1.1. Fixation de l'azote

La fixation de l'azote correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans le sol ou dans l'eau et qui réussissent à assimiler l'azote diatomique (N_2). Il s'agit en particuliers des cyanobactéries et de certaines bactéries vivants en symbiose avec des plantes (entre autres des légumineuses). La réaction chimique type est:



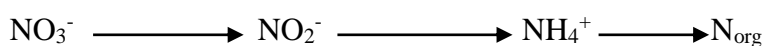
Dans les sols où le pH est élevé, l'ammonium se transforme en ammoniac gazeux:



La réaction nécessite un apport d'énergie de la photosynthèse (cyanobactéries et symbiotes de légumineuses). Cette fixation tend à produire des composés ammoniaqués tels l'ammonium NH_4^+ et son acide conjugué l'ammoniac NH_3 . Il s'agit d'une réaction de réduction qui se fait par l'intermédiaire de substances organiques notées $\{\text{CH}_2\text{O}\}$ dans l'équation (1).

1.2. Assimilation de l'azote par les êtres vivants

L'azote peut être assimilé généralement sous forme de nitrates (NO_3^-), et parfois sous forme d'ammonium (NH_4^+). Au sein de la plante, la réduction des nitrates fait intervenir des processus enzymatiques et s'effectue en plusieurs étapes :



Les quantités d'azote prélevés annuellement par les végétaux sont très variables allant de quelques gN/m²/an à plus de 100g m²/an (Bowden, 1987). Pour Ruffinoni (1994) le type de végétation serait à l'origine de cette variabilité. Mitsch et Gosselink (1993) ajoutent que cette variabilité dépend de la biomasse végétale et la concentration en nutriments de la colonne d'eau ainsi que du substrat. Ainsi les demandes de l'azote sont plus importantes au printemps, lors de la croissance des végétaux.

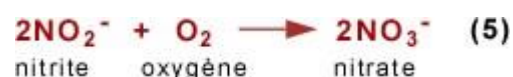
Pour les animaux, ils tirent leur azote organique de la consommation des végétaux ou d'autres animaux. Cet azote est restitué au milieu sous la forme d'azote organique par la déjection et à la mort de l'animal (Curie, 2006).

1.3. Nitrification

La nitrification transforme les produits de la fixation (NH₄⁺, NH₃) en NO_x (soient NO₂⁻ et NO₃⁻), des nitrites et nitrates, ces deux réactions (nitritation et nitratisation) sont réalisées uniquement en présence d'oxygène (Bock et al, 1995). La réaction en chaîne est de type:



soit:



Deux types de nitrification peuvent être distingués, la nitrification lithotrophe, qui utilise un substrat inorganique comme source d'énergie faisant intervenir deux groupes de bactéries, et la nitrification hétérotrophe qui concerne divers groupes de bactéries, de champignons et quelques algues, cette nitrification est assez mal connue (Bock et al, 1992).

1.4. Dénitrification

La dénitrification retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N₂, avec comme produit secondaire du CO₂ et de l'oxyde d'azote N₂O, un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. La dénitrification permet donc une disparition des nitrates du milieu qui sortent du système par voie gazeuse. On distingue deux types de dénitrification, hétérotrophe (utilisation du carbone organique comme source d'énergie) et autotrophe.

Tableau 1 : Taux de dénitrification mesuré dans différents milieux modifié (Fustec et Thibert , 1996)

Milieux	Perte d'azote (N-NO ₃ ⁻) en mg/m ² /jour	Auteurs
Prairie drainée	0.7	Schnabel et Stout(1994)
Prairie non drainée	30	" "
Marais salés	67.5 20 à 20.8	Kaplan et al (1979) White et Howes (1994)
Lacs	0.67 à 57.6 3.7	Seitzinger (1988) Smith et Delaune (1983)
Sédiments des rivières	10 à 59 33.6 à 470	Hill (1983) Christensen et al (1990)
Sols (65 sols différents)	0 à 35	Eichner (1990)
Irrigués	22.5	Ryden et al (1984)
Cultivés	8 à 27	Liang et Mackenzie (1994)

Le cycle naturel de l'azote a toutefois été fortement perturbé par les activités humaines, qui ont modifié la disponibilité de l'azote, avec des implications encore mal évaluées pour les écosystèmes à travers le monde (tableau 2).

Tableau 2 : Evaluation de la perturbation du cycle de l'azote par apport de nitrates anthropogènes à la biosphère continentale (Ramade, 2005)

Processus biogéochimiques	Agents ou facteurs	Rejets d'azote nitrique (en 10 ⁶ t.an ⁻¹ d'équivalent d'azote)
Nitrification		
Sources naturelles		
	Fixation d'azote dans les sols et les végétaux par les bactéries et par les processus abiotiques	139
	Fixation par les cyanobactéries nitrifiantes aquatiques	20-120
	Fixation par les processus abiotiques (Volcanisme-éclairis)	4-13
Sous-total		163-272
Sources anthropogéniques		
	Engrais nitrés	17,6
	Légumineuses et (ou) autres végétaux cultivés fixateurs d'azote	40
	Usages des combustibles fossiles et autres sources industrielles	23.5
	Incendie de la biomasse végétale	40
	Drainage des zones humides	10
	Défrichage des terres	20
Sous-total		155
Grand-total		318-427
Dénitrification		
	Dans les écosystèmes terrestres	108-160
	Dans les écosystèmes aquatiques	25-180
Grand-total		133-340

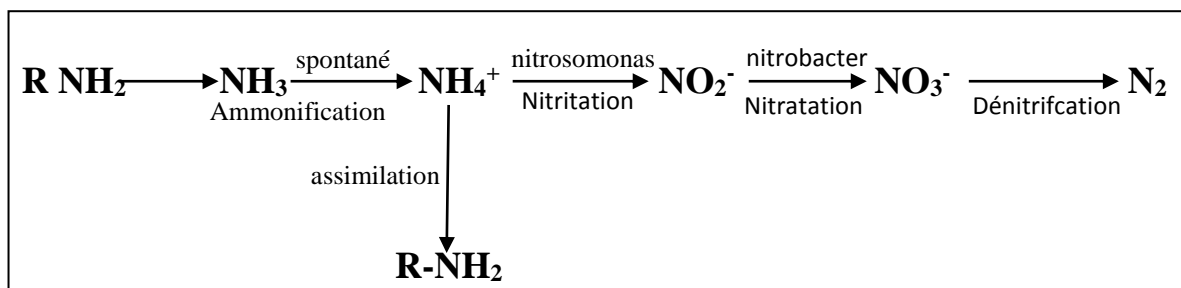


Figure 2 : Schéma réactionnel de la minéralisation de l'azote (Metahri, 2012)

Ce schéma réactionnel d'apparence simple fait partie du cycle complexe de l'azote (figure 2).

2. Rétention d'azote dans les zones humides :

Deux processus sont à l'origine de la rétention et de l'élimination de l'azote dans les zones humides, l'assimilation par la végétation et la dénitrification de ces deux mécanismes ; seule la dénitrification permet une élimination complète de l'azote en l'exportant du système sous forme de produits gazeux. L'absorption de l'azote par les plantes est seulement un processus de rétention temporaire. A la mort de l'organisme, l'azote prélevé est restitué au milieu sauf en cas de fauchage, lorsque les produits fauchés sont exportés hors du système (Haycock et al, 1993).

3. Azote géologique

Une partie souvent oubliée du cycle de l'azote passe par le substratum rocheux là où de l'azote était présent dans la matière organique sédimentée ou liée à cette dernière ; de l' « azote géologique » est aussi trouvé dans certaines eaux thermales, provenant de roches sédimentaires, du manteau et parfois de sources météoriques (Holloway et al, 2002).

Les taux d'azote dans les roches varient de simples traces (<200 mg N kg⁻¹) dans les granites à des taux écologiquement importants, dépassant 1000 mg N kg⁻¹ dans certaines roches sédimentaires et métasédimentaires (Allègre et al, 2001). Des roches riches en azote sont présentes un peu partout dans le monde et pourraient aussi jouer un rôle local, sous-estimé dans la disponibilité en azote pour le réseau trophique. Selon Schlesinger (1997) près de 20% de la totalité du cycle de l'azote serait fixé dans les roches.

Ce rôle pourrait avoir été négligé en raison d'un manque des méthodes analytiques de routine pour la quantification de l'azote dans les roches. Les dépôts des nitrates accumulés dans les régions arides et semi-arides sont notamment des réservoirs potentiellement importants.

Dans la plupart des cas, les taux élevés d'azote dans l'eau et le sol ont une origine humaine. Parfois, ils peuvent être attribués aux effets d'intempéries sur le substrat rocheux (en cas de roche-mère riche en ammonium), avec dans certains environnements une quantité d'azote libéré du socle rocheux supérieur aux besoins des plantes, et pouvant contribuer à saturer le milieu terrestre et l'écosystème local en produisant des phénomènes d'eutrophisation et de dystrophisation. L'oxydation du nitrate d'ammonium peut aussi contribuer à l'acidification des sols et au phénomène plus général d'acidification des eaux douces, susceptibles d'inhiber la revégétalisation et renaturation spontanée de certains écosystèmes (Holloway et al, 2002).

Il semble que les écosystèmes établis sur des roches à teneurs élevées en azote soient plus vulnérables à l'anthropisation. Plusieurs études récentes ont montré que l'azote géologique existe en quantité significative, qu'il peut être libéré et réactivé dans certaines circonstances, avec un potentiel d'amplification des impacts humains sur le cycle de l'azote dans les écosystèmes terrestres et aquatiques (Holloway & Dahlgren, 2002).

4. Impact de l'azote sur l'environnement :

L'azote est un nutriment indispensable pour le développement des êtres vivants. L'intensification des rendements agricoles d'une part, le rejet excessif de l'azote d'autre part et leur présence dans les milieux aquatiques est indésirable et contribuent à l'eutrophisation de ces derniers, qui trouvent leur équilibre bouleversé avec le constat d'une menace aussi bien sur la faune que sur la flore. D'une manière générale, les perturbations engendrés par de tels gestes peuvent être de natures diverses :

- Physico- chimiques : modification des paramètres physico-chimiques du cours d'eau (pH, température, teneurs en oxygène dissous, augmentation de la turbidité et des matières en suspension, déclenchement d'eutrophisation...etc.)
- Biologiques : stress de la biocénose pouvant conduire à sa disparition et l'eutrophisation du cours d'eau (Metahri, 2012).

Les nitrates et les nitrites sont aussi utilisés comme agents de conservation alimentaire, ce qui entraîne une augmentation de la concentration en azote dans les eaux souterraines et de surface ainsi que dans la nourriture. Cet apport d'azote dans l'environnement a plusieurs effets, il peut changer la composition de certaines espèces sensibles aux composés azotés; la plupart des nitrites peuvent avoir des effets sur la santé des hommes et des animaux (tableau 3). La nourriture riche en composés azotés peut provoquer une diminution du transport de

l'oxygène dans le sang.

Chez les animaux, une consommation importante d'azote peut poser des problèmes au niveau de la glande thyroïde, entraînant des carences en vitamine A, de plus dans l'estomac et les intestins, les nitrates peuvent être transformés en nitrosamines, une substance gravement cancérigène (Lenntech, 2011).

Tableau 3 : Limites acceptables de l'azote dans l'eau (in Bouziane, 2000)

Substances	Effets indésirables	Doses limites (mg/l)
Nitrites (NO_2^-)	Formation de nitrosamines	0.1 à 1
Nitrates (NO_3^-)	Méthémoglobine chez les nourrissons	25 à 50
Azote ammoniacal	Formation de dérivés d'ammoniac	1

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

1. Localisation géographique du lac Fetzara

Le lac Fetzara, d'une superficie de 20.680 ha est constitué d'un marais saumâtre et saisonnier de presque 5 800 ha et d'une plaine d'inondation de plus de 13000ha (Djamai et al , 2011).

Il se situe à 18 km au Sud-Ouest du chef lieu de la wilaya d'Annaba et à 14 km de la mer. Il s'allonge dans le sens Est-Ouest sur 17 km de long et s'étend sur 13 km dans sa plus grande largeur, sous une longitude de 7°24 à 7°40 Est et une latitude de 36°50 Nord. Il est bordé au Nord, par le massif de l'Edough, au Sud par les collines de Ain Berda et par les deux cordons dunaires à l'Est et à l'Ouest du lac. Plusieurs agglomérations existent sur la périphérie du lac , au Nord, la commune de Berrahal, au Sud les communes d'El Eulma (oued El Hout) et de Cheurfa et à l'Est de petits villages tels que El Gantra et Oued Zied.

Sur le plan juridique, la majorité des terres qui entourent la cuvette sont étatiques (80%), le reste est privé (figure 3).

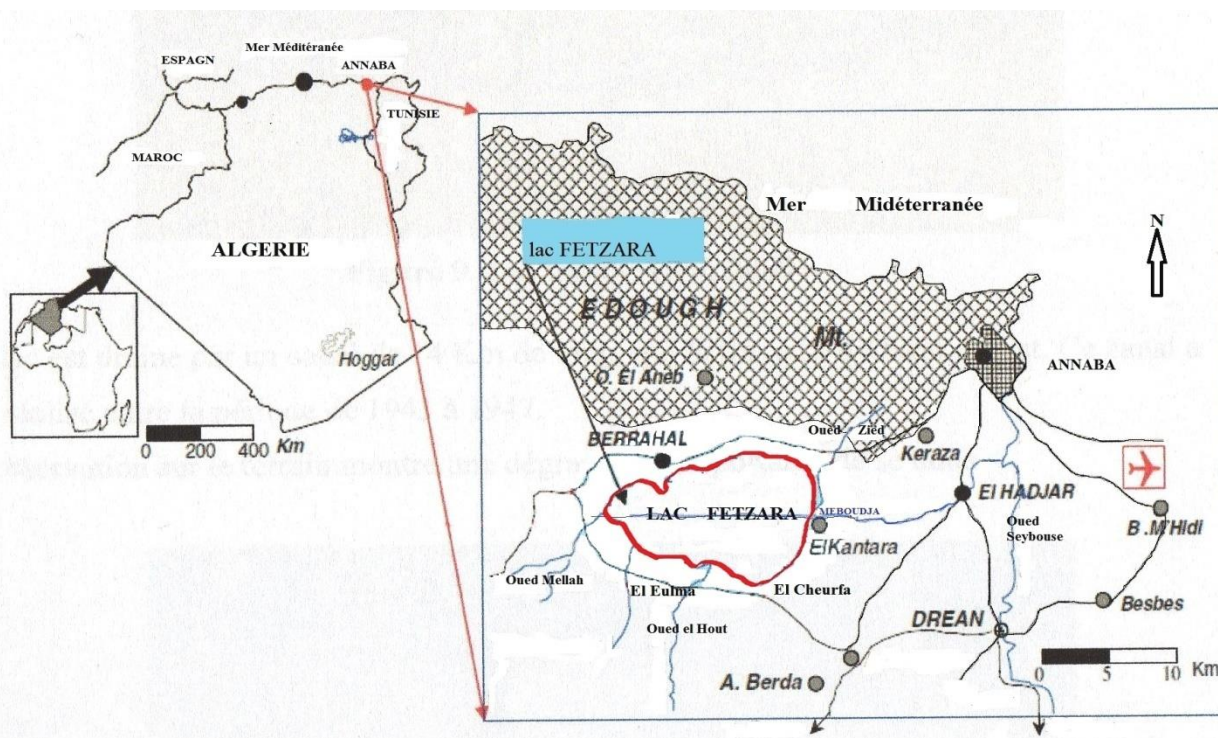


Figure 3 : Situation géographique du lac Fetzara (Fekrache, 2015)

2. Géologie du lac Fetzara

Le lac Fetzara fait partie de l'ensemble géologique du Tell d'Algérie Nord orientale, sa formation géologique est constituée de :

* Les gneiss à biotite qui forment le cœur de l'antiforme sont des roches fortement foliées et plissées (Gleizes et al., 1988).

* Les micaschistes, constitués de deux ensembles principaux :

- L'ensemble inférieur, posé sur les gneis, caractérisé par la présence de niveaux de marbre d'épaisseur très variable. Dans cet ensemble se trouve également des niveaux de lentilles d'amphibolites, de métagabros, de serpentines et de filons de quartz-grenat.

- L'ensemble supérieur est constitué par une série dite « alternances », surmonté par une unité épimétamorphique. La série des alternances est caractérisée par une alternance régulière de micaschistes (Gleizes et al, 1988 ; Gaby et Hammor, 1992).

* Les roches métabasiques, elles comprennent des amphiboles, des pyroxènes, des péridotites, des métagabros, etc... ; le volume le plus important est celui des amphiboles de Kef Lakhel. Celles-ci sont constituées de roches massives et d'autres rubanées ; le passage de l'un à l'autre est graduel (Hilly, 1962 ; Ahmed-Said et Leake, 1992).

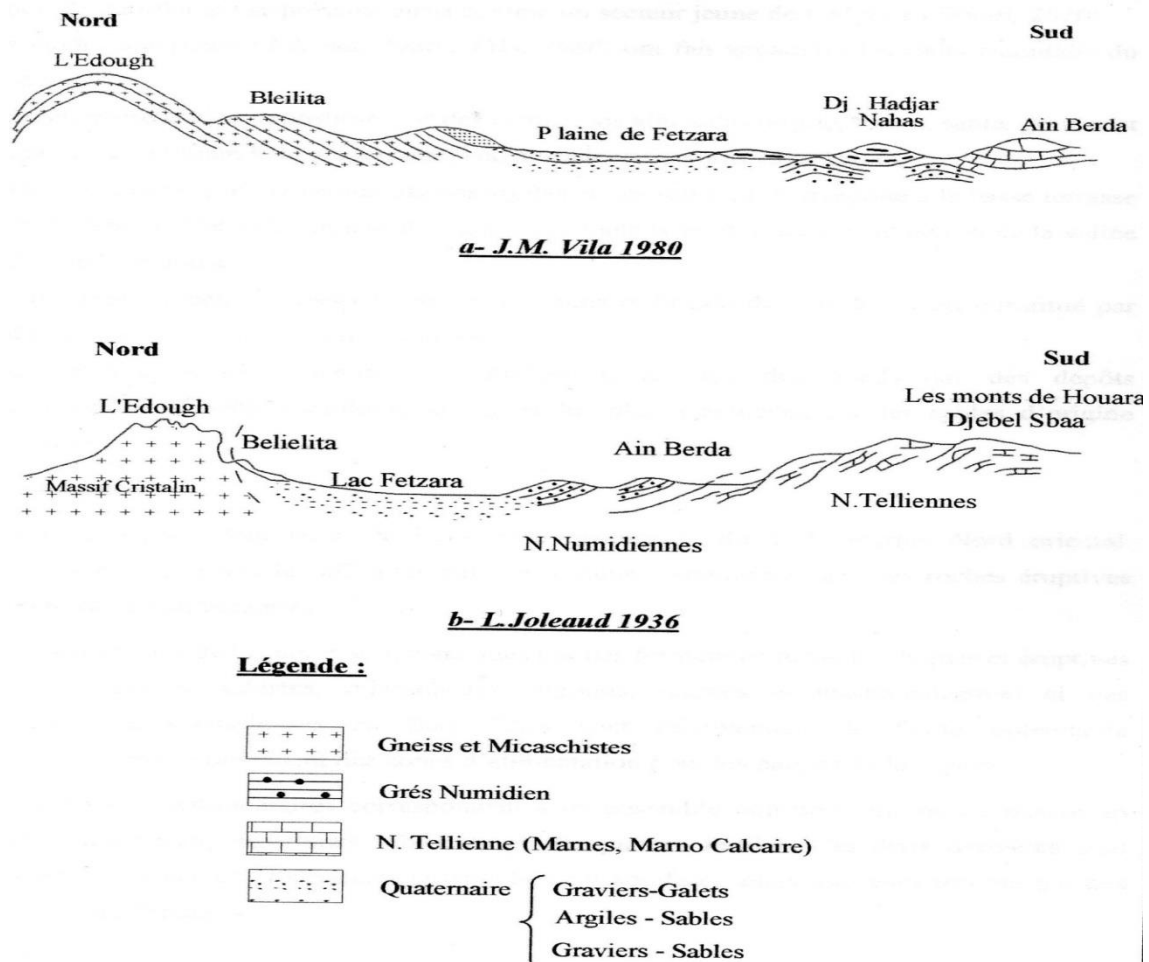
* La couverture sédimentaire : constituée de deux nappes, flyschs crétacés et numidiens. Les flyschs crétacés affleurent sous la nappe numidienne et occupent la région de Ain-Barbar et El-Mellaha (Hilly, 1962 ; Marignac, 1976 et 1985). Il s'agit d'intercalations d'argilites noires bleutées et de bancs peu épais de calcaires gréseux de type Massylien.

Les flyschs numidiens correspondent à un faciès argilo-gréseux constitué par des bancs minces de grés à la base qui deviennent plus épais et plus grossiers au sommet avec la présence de dragées de quartz. L'épaisseur de cet ensemble varie de 1000 à 1500 m.

* Le magmatisme tertiaire, les microgranites et rhyolites de l'Edough s'intègrent dans le cadre du magmatisme de la marge Nord algérienne. Ils appartiennent à l'ensemble Edough-Cap de fer (Hilly, 1962).

Les études antérieures ont fait apparaître les traits essentiels du Quaternaire (Joleaud, 1936 ; Vila, 1980).

- Quaternaire ancien : constitué par des formations alluviales (argiles, limons, sables, graviers et galets), constituant la haute terrasse ; son altitude varie entre 75 et 150 m.
- Quaternaire moyen : constitué par des argiles et des sables, correspond à la basse terrasse de 20 à 50 m.
- Quaternaire récent : correspond au cordon dunaire de Annaba ; constitué par des sables et des limons alluvionnaires.
- Quaternaire actuel : constitue essentiellement les lits des oueds par des dépôts alluvionnaires (sables, cailloux, etc...), et les plages actuelles par les sables d'origine marine (figure 4).



**Figure 4 : Coupes géologiques entre l'Edough et Ain Berda par le lac Fetzara
a) Vila, 1980 ; b) Joleaud, 1936.**

3. Géomorphologie du lac Fetzara

La cuvette du lac Fetzara présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques, elle est due à une grande tectonique active pendant le Quaternaire.

Au Sud, un véritable piémont avec quatre niveaux de glacis, s'est construit en aval du Tell Nord guelmien, ces niveaux sont répartis comme suit :

- Les restes de hauts niveaux énigmatiques, il s'agit d'une région où l'érosion a beaucoup fonctionné durant le Quaternaire. Au Nord de Mechtat Sidi Goulaya, on peut voir de gros blocs de grés à patine ferrugineuse pris dans une matrice argilo-sableuse brun-rouge. En contre bas, à 250m d'altitude, il existe également des blocs gréseux avec une formation sablo-argileuse rouge et une croûte calcaire. Plus à l'Ouest à 200 m d'altitude, on retrouve d'autres replats présentant les mêmes caractères (Marre, 1992).
- Les formes encroûtées au Pléistocène moyen, les grés pseudo-numidiens sont tronqués par un niveau d'érosion incliné au Nord vers 150-170 m, il s'agit de restes d'un glacis d'ablation. Cependant, grâce aux ravinelements, on peut voir que cette forme est constituée

par plusieurs mètres de sable argileux rouge formant des blocs de 50 m de longueur (Marre, 1992).

- Les lambeaux de glacis sont observables dans le paysage, ils descendent vers la cuvette du lac Fetzara depuis 120 m jusqu'à 70 m d'altitude (Marre, 1992).
- Les grands glacis-cônes du Pléistocène supérieur et les dépôts Holocène. Un talus d'érosion net, concave et haut de 5 à 10 m termine ces formes. Au pied de ce talus, les formations Holocène sont spécialement peu développées, sauf au débouché de l'Ouest de l'oued El-Hout où se construit un cône très aplati et qui progresse dans la cuvette du lac ; il s'agit de formations sablo-argileuses grises à noires lorsque l'hydromorphie est importante (Marre, 1992).

Au Nord, au piémont de la bordure Nord du lac Fetzara, on a trois niveaux de glacis :

- Les lambeaux de glacis, spatialement peu représentés, correspondent à un niveau d'érosion qui vers l'aval, passent à un glacis d'épandage et qui se terminent par un talus au château d'eau de Berrahal (Marre, 1992).
- Les bas glacis, dont le plus important, celui du douar de l'Eucalyptus. A l'Ouest, ces glacis s'appuyant sur le massif du douar Tobéiga et ils sont plus étendus que ceux situés plus à l'Est au pied du massif de l'Edough.
- Les formations Holocène se raccordent au fond de la dépression du lac Fetzara. Le long des ravinelements, des petites terrasses présentent des sables micacés gris-beiges avec par endroits, des lits décimétriques de graviers de 1 à 1.5 cm mal émoussés (Marre, 1992).

Donc la topographie du lac Fetzara est relativement simple, elle est présentée par les formations suivantes (AJCI, 1985) :

- une partie montagneuse (altitude > 40m).
- une terrasse fermée vers le centre du lac (altitude de 10 à 20 m).
- une terrasse basse (altitude < 10m).
- la plaine qui occupe environ les deux tiers de la superficie totale.
- la partie la plus profonde du lac est à 10 m.

4. Hydrologie du lac Fetzara

Les cours d'eau dans la région du lac Fetzara sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été, il correspond ainsi au climat méditerranéen.

Les réseaux en eaux superficielles sont constitués par une ramification des étendues libres, les lits de ces cours d'eaux sont élargis dans les parties avales, c'est-à-dire au contact du lac. Il existe trois principaux oueds qui alimentent le lac :

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

Les trois oueds sont canalisés, leurs eaux sont normalement évacuées par l'oued Meboudja qui se déverse au niveau de l'oued Seybouse qui débouche dans la mer Méditerranée.

4.1. Réseau hydrologique du lac Fetzara

L'ensemble du bassin versant du lac Fetzara provient des oueds : Zied, El Hout, Mellah, des ruisseaux (tableau 4), des eaux qui s'écoulent directement de la surface des pentes périphériques du lac, des rejets industriels et urbains et enfin des pluies, ce qui permet d'évaluer les apports du lac à un débit de 141 à 145 m³/s (Marre, 1992).

La superficie submergée en hiver est de l'ordre de 5800 hectares (A.J.C.I, 1985). Elle se réduit de juin jusqu'au mois de septembre, ceci est dû à une pluviométrie qui est pratiquement nulle et à une évaporation importante au cours de cette période. Les eaux du lac sont toujours drainées par le canal principal vers l'oued Meboudja. Le bassin versant du lac Fetzara est constitué de 30 sous-bassins versants petits et moyens avec une superficie totale de l'ordre de 515 km². Parmi les principaux sous bassins versants, on note ceux des oueds : Zied, El Hout, Mellah, représentant 29% de la superficie totale du bassin versant; ils font partie du réseau hydrographique endoréique (figure 5).

4.1.1. Les entrées du lac Fetzara :

Il existe trois principaux oueds qui alimentent le lac : oued Zied, oued El Hout et oued Mellah. Les eaux emmagasinées dans le lac en saison pluvieuse, s'évacuent vers l'oued Meboudja par l'intermédiaire du canal d'assèchement, passant par le pont-vanne, pour maintenir le niveau du lac à une certaine hauteur.

4.1.2. Les sorties du lac Fetzara

- **Oued Meboudja :**

C'est le collecteur intermédiaire entre le lac Fetzara et oued Seybouse, il draine une superficie de 203 km² et constitue le collecteur des eaux du bassin versant du lac Fetzara d'une superficie de 515km² et du bassin versant d'oued El Rassoul dont la superficie est de 103 km². Il reçoit deux affluents, oued Taieb et oued El Rassoul. Il présente une crue quinquennale de 20 m³/s (Bounnouna et al, 1986) ; ceci est dû au mauvais drainage au Sud du complexe sidérurgique d'El Hadjar et à une croissance importante des mauvaises herbes. La Meboudja rejoint l'oued Seybouse à environ 8 km de l'embouchure.

- **Oued Seybouse :**

C'est le deuxième oued d'Algérie, il s'écoule dans une vallée étroite et rectiligne de direction Sud-Nord depuis Bouchegouf jusqu'à Chihani, puis il draine la large plaine d'Annaba (bassin versant de 7045km²). En outre, oued Seybouse reçoit oued Meboudja et ses affluents, oued Mellah et oued Bou Athou dans la région d'annaba (A.J.C.I, 1985).

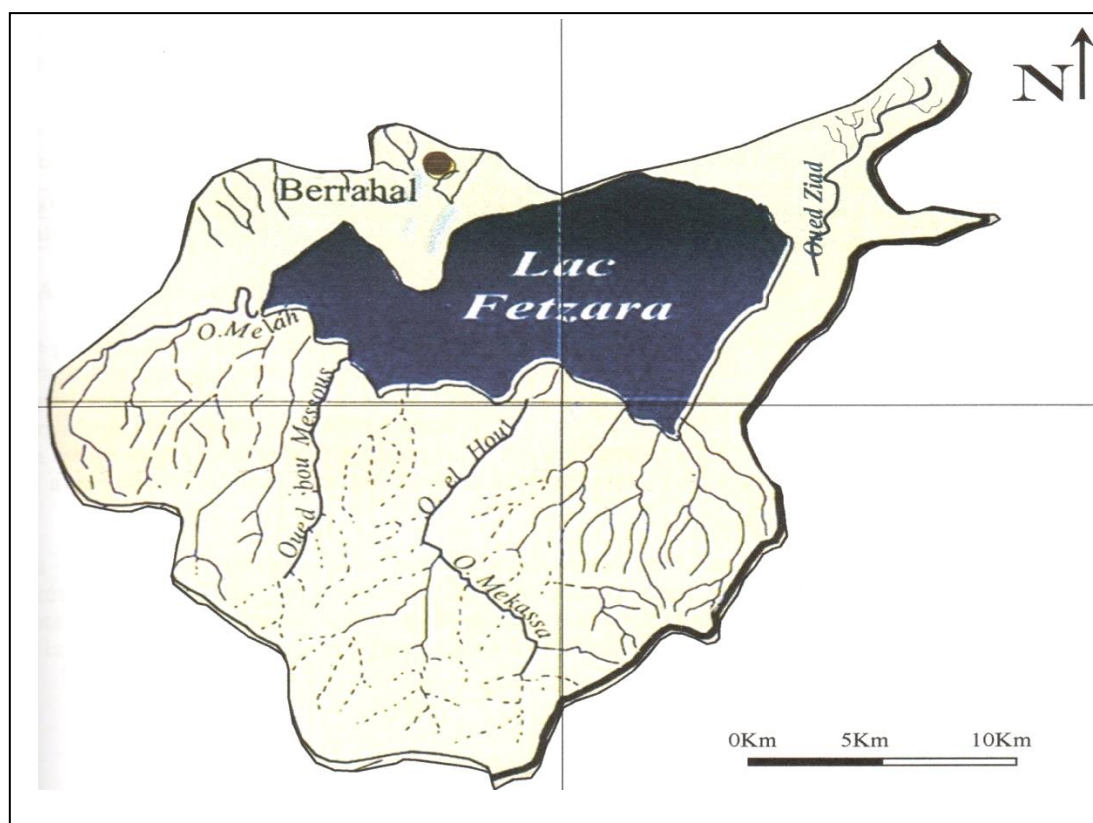


Figure 5: Principaux sous bassins versants du lac Fetzara (Khalfaoui, 2014)

Tableau 4 : Quelques caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara (d'après A.N.R.H, 2000)

Sous bassin versant du lac Fetzara						
Potentiel des nappes (hm ³ /an) selon P.N.E		13.4				
Superficie (km ²)		515				
Retenues collinaires		Nombre	Capacité (m ³)		Destination	
		31	2563000		Irrigation	
Eau potable		Nombre de réservoirs		Volume (m ³)		
		17		5920		
	Forages en exploitation			Débit (l/s)	Profondeur (m)	
		Draa Errich		9	75	
		Berrahal 1		13	77	
		Berrahal 2		12	37	
		Guemgoum		6	90	
	Guirch		10	80		
	Alimentation en eaux potables des agglomérations	commune	Nombre de réservoirs	Volume des réservoirs (m ³)	Longueur du réseau de distribution (m)	Dotation moyenne (l/j/hab)
		Berrahal	8	4100	30742	115
Berrahal		2	300	3694	39	
Berrahal		1	100	/	195	
El Eulma		3	560	12000	264	
Cheurfa		3	860	11700	64	

4.2. Etat hydrogéologique du lac Fetzara

L'étude hydrogéologique permet la compréhension du fonctionnement des nappes et de leur régime, ainsi que l'estimation des paramètres hydrodynamiques selon le contexte de l'aquifère et la détermination du sens d'écoulement et les relations existantes : nappe-lac-oued, en se basant sur les travaux déjà effectués, la description géologique des terrains de la région d'étude et des caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation ; on peut distinguer un ensemble de nappes se répartissant de manière hétérogène au niveau de la région de Annaba (figure 6).

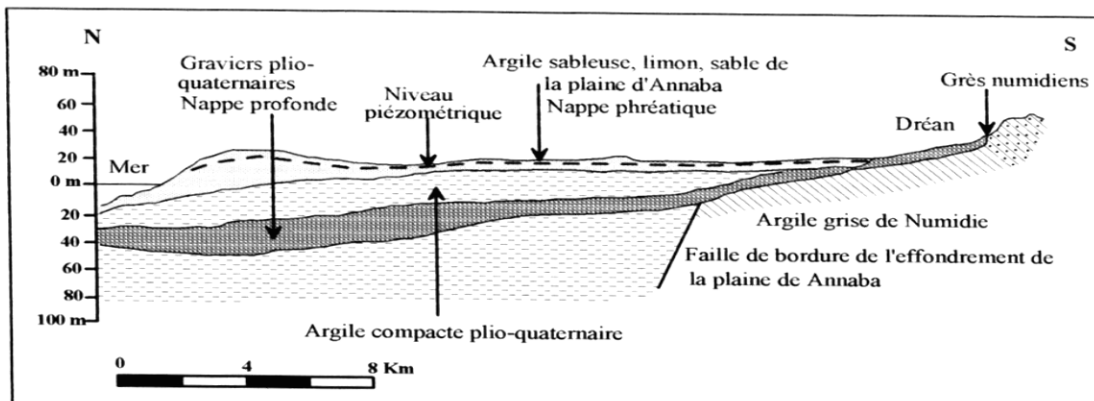


Figure 6: Coupe schématique du système aquifère de la région d'Annaba (Derradji et al, 2005)

4.2.1. Nappes superficielles

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

4.2.1.1. Nappe de gneiss altérés

Elle se localise dans la région Nord-Est du lac Fetzara, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et de Beleleita. La nappe est alimentée par les eaux de pluies, son épaisseur est de 15 m. Elle est exploitée par des puits et des forages. La perméabilité varie entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s (Belhamra, 2001 ; Derradji et al, 2005)

4.2.1.2. Nappe superficielle

Cette nappe est répandue sur la majorité de la plaine d'Annaba. D'après la géomorphologie de la région, on peut diviser la nappe en deux régions qui communiquent entre elles à travers le cordon dunaire de El Gantra , dont la texture est différente.

- La région Est présente une nappe superficielle continue, localisée dans la plaine Ouest d'El Hadjar ainsi que dans la région d'Allélik (Habes, 2006).
- La région Ouest est une nappe superficielle discontinue qui entoure le lac Fetzara. La lithologie de la nappe est constituée par des alluvions récents (sables, limons, argiles)
- avec une texture argilo-sableuse à argilo-limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10m, donc à potentialités hydrauliques très limitées.

La capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est moyenne, d'ordre de 0.05 à 0.10 m/j. La nappe superficielle est fortement exploitée par les puits surtout et quelques forages (figure 7). L'alimentation de cette nappe se fait par les précipitations et par les crues des oueds (Zenati, 1999).

4.2.2. Nappes profondes

Nous distinguons deux nappes aquifères d'inégales extensions, l'une à cipolins et l'autre à graviers.

4.2.2.1. Nappe des cipolins

Formation continue dans les lentilles des calcaires métamorphiques fissurés des massifs de Bouhamra et Belleilita, profonde de 12 à 80 m, avec une épaisseur qui ne dépasse pas les 70 m et leur superficie est inférieure à 100 ha (Hani, 2003). Les débits d'exploitation des forages sont de

l'ordre de 15 l/s, les transmissivités varient entre $5 \cdot 10^{-5}$ et 10^{-3} m/s et la perméabilité entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s (Derradji et al, 2005 ; Zenati, 2010).

4.2.2.2. Nappe des graviers

Cette nappe est captive dans la région d'Annaba, avec une épaisseur très variable selon les zones ; elle varie de 2 à 70 m, au-dessous de la nappe superficielle. Elle devient libre dans la région de Dréan. Elle est continue dans les graviers dans sa partie captive, par contre elle est constituée de sables et de galets du Plio-Quaternaire dans sa partie libre. La transmissivité est de $3,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s. L'épaisseur de la nappe ne dépasse pas les 70 m (Boudjemaa, 2010).

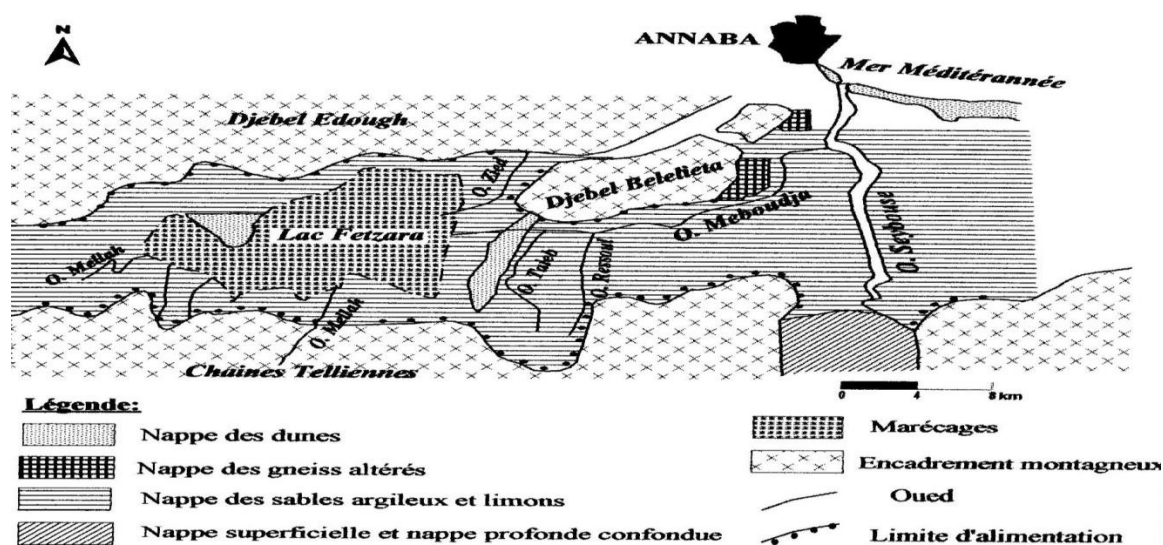


Figure 7 : Situation géographique des nappes superficielles de la plaine d'Annaba (Habes, 2006)

5. Pédologie

Il est évident que la qualité du sol dépend de ses propriétés intrinsèques, de son environnement géochimique et climatique et de son utilisation par l'homme (Badraoui et al, 1998). L'évaluation de cette qualité passe d'abord par la délimitation des propriétés du sol qui sont mesurables quantitativement et qui définissent les processus majeurs du fonctionnement du sol, ce sont les indicateurs physiques, chimiques et biologiques de la qualité des sols (Rahoui et al, 2000).

les sols du lac Fetzara ont fait l'objet de plusieurs études de mise en valeur agricole, qui ont toutes révélé des contraintes non négligeables quant à leur utilisation, telles que la salinisation et l'hydromorphie (Durand, 1950 ; Ifagraria, 1967 ; A.J.C.I, 1985 ;B.N.E.D.E.R, 2004 ; Djamai, 2007 ; Zahi, 2008 et 2014).

5.1. Différentes classes de sols :

Sur le lac Fetzara, il existe quatre classes de sols dominants (figure 8)

5.1.1. Sols peu évolués (SPE) :

Les sols peu évolués d'origine non climatique. Ils sont formés sur une couche d'apport constituée de sables et d'argiles. L'épaisseur varie selon leur position topographique ; leur superficie est de 5199 ha, soit 28% de la superficie totale du lac. Ils se situent essentiellement sur les terres onduleuses des pieds des montagnes et sur les terrasses. Ils se caractérisent par une faible rétention d'eau, une perméabilité très élevée et un taux de matière organique moyen.

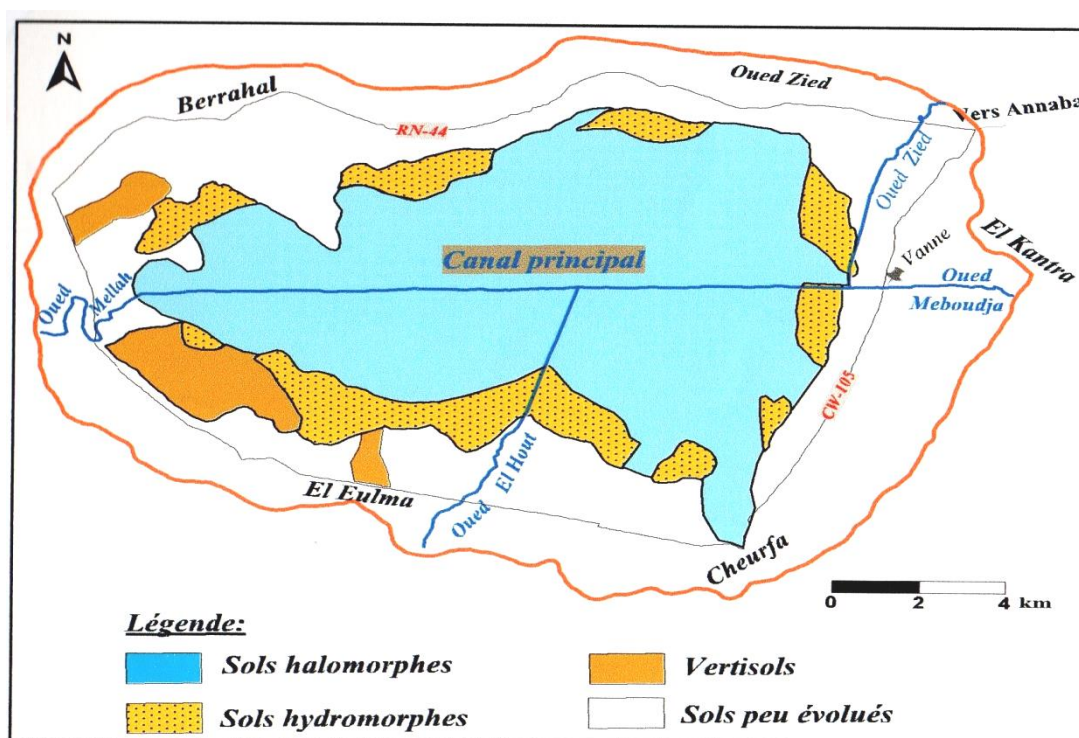


Figure 8 : Répartition des classes des sols du lac Fetzara (A.J.C.I , 1985)

5.1.2. Vertisols (SV)

Ces sols s'étendent sur une superficie de l'ordre de 625 ha, soit 3,3% de la superficie totale. Ils sont répartis dans la zone Ouest du lac et sont riches en argile gonflante. Les vertisols ont de mauvaises propriétés physiques (sols lourds). Ils possèdent une texture très fine et présentent un mauvais drainage.

5.1.3. Sols hydromorphes (SH)

Ce sont des sols peu humifères et salins, à texture très fine avec une très faible perméabilité. Ils occupent une superficie de 254 ha, soit 13,7% de la surface totale. Ils sont localisés dans la zone centrale du lac. Ces sols moyennement profonds, se caractérisent par la présence

d'une nappe qui explique l'hydromorphie temporaire ou permanente, ils sont fortement calcaires.

5.1.4. Sols halomorphes (SHA)

Ces sols sont fréquents dans la partie Est et Sud-Est du lac, sur une superficie de 10228ha, soit 55% de la surface totale. Ce sont des sols salins, caractérisés par la présence des sels solubles, une perméabilité moyenne, une texture lourde et riche en minéraux argileux gonflants.

5.2. La perméabilité

Les mesures de la perméabilité verticale selon la méthode de Henin montrent que les valeurs varient entre $0.11 \cdot 10^{-5}$ et $5 \cdot 10^{-5}$ m/s (Zenati, 1999). L'examen de la carte de la perméabilité verticale fait apparaître trois types de sols :

- Les sols peu perméables dont la valeur de la perméabilité verticale est de $0,11 \cdot 10^{-5}$ m/s, ils occupent la partie Nord-Est du lac Fetzara.
- Les sols moyennement perméables avec des valeurs de la perméabilité verticale qui oscillent entre $0.11 \cdot 10^{-5}$ et $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, caractérisant la majorité de la plaine.
- Les sols perméables dont la valeur de la perméabilité verticale est supérieure à $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, caractérisant les régions sableuses (Berrahal et Gantra) .

6. Occupation du sol

L'occupation actuelle du sol est à la fois anthropique et naturelle.

6.1. Occupation anthropique :

Cette occupation englobe à la fois :

- ✓ L'occupation agricole.
- ✓ L'occupation industrielle.
- ✓ L'occupation humaine

6.1.1. Occupation agricole :

D'après les formations superficielles, nous avons constaté une occupation agricole très limitée dans la région de Oued Zied alors que les autres lieux sont délaissés aux pâturages et aux maquis. La zone d'étude fait partie de la zone agricole méditerranéenne, les cultures qui sont pratiquées sont principalement :

- Les cultures céréalières : blé dur, blé tendre et orge constituent les principales cultures.
- Les cultures industrielles : ce sont généralement le tabac et la tomate.
- Les cultures maraichères et les légumes secs.
- L'arboriculture : représentée essentiellement par les agrumes, les espèces à noyaux et pépins et les oliviers.

6.1.2. Occupation industrielle :

Elle est très importante, ces entreprises industrielles sont réparties en cinq zones (tableau 5).

- Zone industrielle de Kalitoussa à Berrahal
- Zone industrielle de Chaiba
- Zone industrielle de Pont Bouchet
- Zone industrielle d'Allélick
- Complexe Siderurgique El Hadjar (Sider)

D'autres entreprises sont disséminées dans la plaine (figure 9). Ces différentes entreprises sont classées suivant leur activité et leur degré de pollution :

- Industrie particulièrement polluantes (Sider, Asmidal, Orelait et Genie-Sider)
- Industries alimentaires
- Entrepôt et entreprises de prestation
- Industries diverses

6.1.3. Occupation Urbaine

Les recensements de 1966, 1977, et 1987 ont permis d'apprécier la répartition de la population, qui présente une grande inégalité. Elle se concentre le plus souvent autour des zones industrielles, terres agricoles et des points d'eau. On distingue trois zones.

a) Zones faiblement peuplées

Elles se localisent aux alentours du lac Fetzara, et plus précisément au Sud. Elles comprennent les villages de El Eulma, Cheurfa, El Hashassia, Aziz Ahmed, Sidi Hamed et El Gantra.

b) Zones moyennement peuplées

Ce sont les sites d'El Kerma, Houraicha, Griche, Hadjar Ediss et Derradji Redjem.

c) Zones fortement peuplées

Elles correspondent aux chefs lieux des communes de Sidi Amar, El Bouni et El Hadjar. D'après le service communal recensement 2016 et la direction de planification et d'aménagement du territoire, la wilaya de Annaba comptabilise une population d'environ 609.500 habitants (tableau 6)

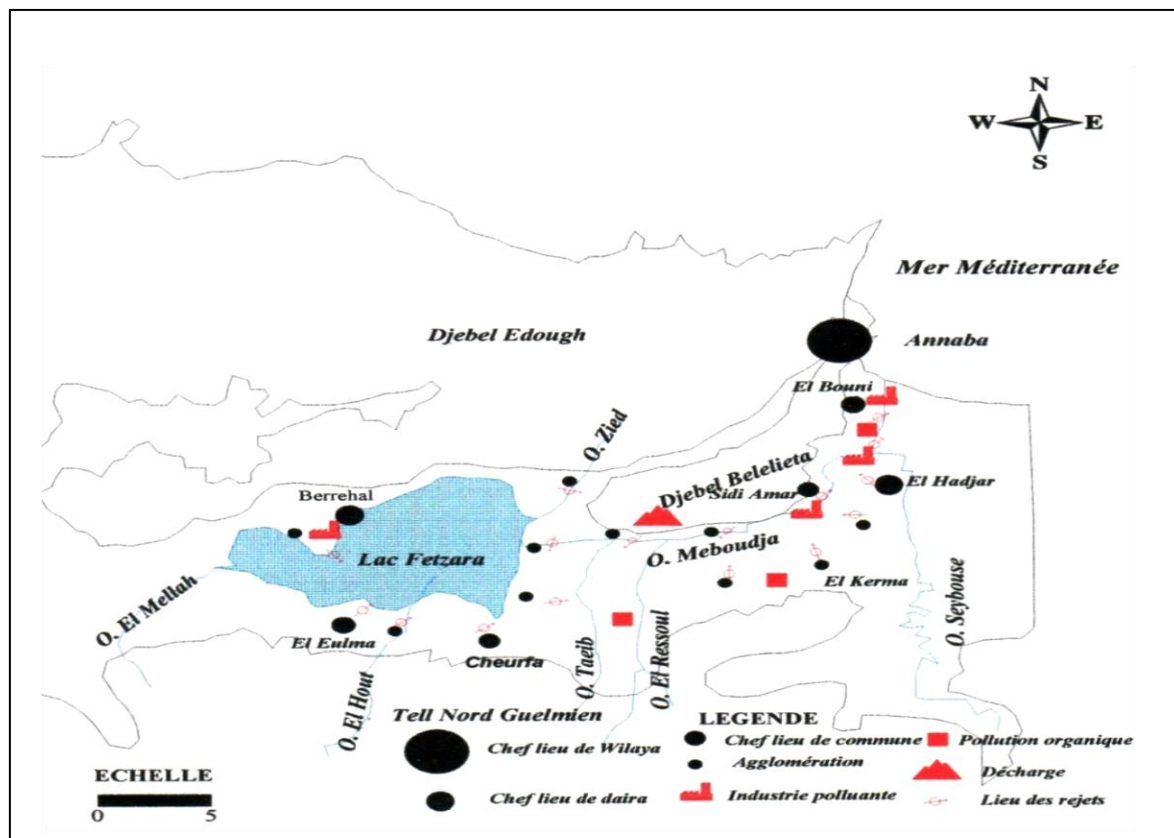


Figure 9 : Carte d'occupation du sol par l'industrie autour du lac Fetzara (Zenati, 2010).

Tableau 5 : Les unités industrielles contribuant à la pollution (A.N.A.T 1993)

Unites industrielles	Matières et produits utilisés	Principaux constituants des rejets	Milieux récepteurs
Sider ACO2	Fonte liquide 470 000 T/an	Eaux usées	Oued Meboudja
LAF	Bobine d'acier provenant du LAC	Eaux de rinçage contenant H2SO4, HCl, huiles	Oued Meboudja
Cokerie	Charbon en houille 1.04 MT/an 1.67MT/an	Eaux résiduaires provenant du lavage du gaz	Oued Meboudja
PMA	Minerai : 3.5MT/an Coke : 260 000T/an	Huiles usées provenant du circuit réfrigérant	Oued Meboudja
Ferroviail	Aciers, Boulonneries, Equipement de wagon	Eaux résiduaires	Oued Seybouse
E.N.T.P.L	Fil machine en provenance du laminoir à froid de Sider	Eaux usées domestiques	Oued Seybouse
C.N.A.B.U.A.B2	Mais, Orge, Soja, blé tendre	Eaux usées domestiques	Oued Seybouse
Hydro-Canal	Récupération des matériaux non ferreux 600 T/an	Eaux usées domestiques et lavage	Oued Seybouse
E.P.B.T.P	Huiles 5500 I/an Graisses 485 kg	Huiles, Graisses et eaux usées domestiques	Oued Seybouse
ORELAIT	Matières organiques	Eaux usées domestiques	Oued Seybouse
Prosider de Berrahal	Unité de galvanisation Unité des panneaux isothermes Unité tuiles-acier	Bains acides Minéraux (BaSO4, Ti2O3)	Lac Fetzara
Cimenterie de Hadjar Soud	Ciment	Poussières	Atmosphère

Tableau 6 : Répartition de la population de la wilaya d'Annaba (ONS 2016)

Code ONS	Commune	Population nb. habitants	Superficie km ²
2301	<u>Annaba</u>	257 359	49
2302	<u>Berrahal</u>	22 631	180
2303	<u>El Hadjar</u>	37 364	63
2304	<u>Eulma</u>	10 316	161
2305	<u>El Bouni</u>	125 265	93
2306	<u>Oued El Aneb</u>	21 088	190
2307	<u>Cheurfa</u>	9 875	98
2308	<u>Seraïdi</u>	7 626	138
2309	<u>Aïn Berda</u>	20 611	138
2310	<u>Chetaïbi</u>	8 035	134
2311	<u>Sidi Amar</u>	83 254	42
2312	<u>Treat</u>	6 076	126
total		609500	1412

6.2. Occupation naturelle

6.2.1. La montagne

C'est une zone occupée essentiellement par les maquis. Vu que les formations sont principalement métamorphiques où les pentes des versants sont fortes et l'altitude atteint 1002 m rendant l'accessibilité difficile pour l'homme. Cette couverture forestière de plus de 50 000 ha, soit près des trois quarts de l'espace où les chênes Zen des hauteurs, les oliviers, les pins maritimes et les eucalyptus des bordures viennent faire cortège à quelques unes des plus belles forêts d'Algérie (Zenati, 2010).

6.2. 2. La plaine

Elle est dominée par des terrasses alluviales présentant une formation sablo-lumineuse. La qualité des sols dépend pour l'essentiel de la roche mère et de la topographie.

7. Climatologie

La détermination des caractéristiques hydro-climatologiques est nécessaire pour l'évaluation et la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines. Elle permet également d'approcher les termes du bilan hydrique, qui sont les précipitations, la température et l'évapotranspiration.

7.1. Stations de mesures

Pour étudier les variations des caractéristiques climatiques de la région du lac Fetzara dans le temps et dans l'espace, nous avons pris en considération les données climatiques des stations météorologiques: Les Salines et Pont Bouchet pour une période de 34 ans (1980-2014). Les coordonnées des stations météorologiques sont consignées dans le tableau 7 :

Tableau 7 : Coordonnées géographiques des stations de mesure (1980-2014).

Station	X	Y	Z (m)	Période d'observation	Distance par rapport au lac Fetzara
Les Salines	955.80	403.80	03	1980-2014	15km au N.E
Pont Bouchet	950.25	402.8	06	1980-2014	12km au N.E

7.2. Principaux facteurs climatiques

7.2.1. Précipitations

Dans l'établissement du bilan hydrique, les précipitations constituent un facteur essentiel parce qu'elles jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des eaux superficielles et souterraines. De plus, la pluie est considérée comme un facteur qui conditionne l'écoulement saisonnier et par conséquent, le régime des cours d'eaux ainsi que celui des nappes.

7.2.1.1. Précipitations mensuelles

Les moyennes mensuelles des précipitations sont résumées dans le tableau 8 :

Tableau 8 : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

Mois Stations	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Total
Les Salines 1980-2014	37.75	63.92	85.54	113.76	100.36	80.84	74.94	55.45	35.77	11.91	2.56	7.86	670.8
Pont Bouchet 1980-2014	37.13	59.71	88.12	107.63	91.81	74.85	64.41	52.56	34.24	11.37	2.11	9.94	633.9

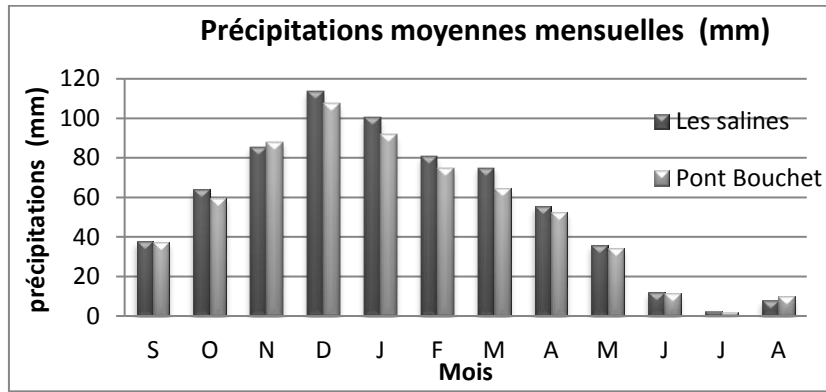


Figure 10 : Précipitations moyennes mensuelles (Les Salines et Pont Bouchet, 1980-2014).

On remarque que les mois les plus pluvieux sont novembre, décembre, janvier, février et avril. Par contre les mois de juin, juillet et août sont les plus secs. Les histogrammes des précipitations moyennes mensuelles montrent une variation d'un mois à un autre. Le maximum des précipitations est enregistré au mois de décembre (135.28 mm) par contre le minimum est enregistré au mois de juillet avec une valeur de 3.23 mm (figure 10).

7.2.1.2. Précipitations annuelles

Les valeurs des précipitations annuelles moyennes dans les deux stations sont de l'ordre de 670.7mm pour la station des salines et 633.9mm pour celle de Pont Bouchet.

7.2.1.3. Coefficient pluviométrique (Cp)

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (Cp), ce paramètre est très important dans la détermination des années excédentaires et déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série à une station donnée (tableau 9).

Avec : $Cp = P/P_{moy}$

Cp : coefficient pluviométrique

P : pluviométrie annuelle de l'année (mm)

P_{moy} : pluviométrie moyenne annuelle (mm)

Deux possibilités



$Cp > 1$ \longleftrightarrow Année excédentaire (AE)

$Cp < 1$ \longleftrightarrow Année déficitaire (AD)

Tableau 9 : Précipitations annuelles (mm) et coefficient pluviométrique des stations Les Salines et Pont Bouchet (1980-2014).

Années	Station Pont Bouchet			Station Les Salines		
	Hauteur de pluie mm	Cp		Hauteur de pluie mm	Cp	
80-81	557.5	0.88	AD	642.90	0.96	AD
81-82	665.4	1.05	AE	741.60	1.11	AE
82-83	529.8	0.84	AD	623.40	0.93	AD
83-84	757.9	1.20	AE	934.60	1.39	AE
84-85	870.8	1.37	AE	961.20	1.43	AE
85-86	433.7	0.68	AD	534.20	0.80	AD
86-87	737.4	1.16	AE	918.80	1.37	AE
87-88	366.5	0.58	AD	409.50	0.61	AD
88-89	487.8	0.77	AD	553.8	0.83	AD
89-90	489.5	0.77	AD	534.20	0.80	AD
90-91	672.4	1.06	AE	686.30	1.02	AE
91-92	655.1	1.03	AE	682.80	1.02	AE
92-93	638.4	1.01	AE	647.00	0.96	AD
93-94	488.6	0.77	AD	550.50	0.82	AD
94-95	531.8	0.84	AD	547.50	0.82	AD
95-96	727.5	1.15	AE	804.00	1.20	AE
96-97	382.7	0.60	AD	627.00	0.93	AD
97-98	777.1	1.23	AE	604.70	0.90	AD
98-99	700.4	1.10	AE	592.90	0.88	AD
99-00	470.5	0.74	AD	651.40	0.97	AD
00-01	521.4	0.82	AD	692.32	1.03	AE
01-02	410.5	0.65	AD	471.00	0.70	AD
02-03	933.6	1.47	AE	854.30	1.27	AE
03-04	642.7	1.01	AE	704.40	1.05	AE
04-05	939.9	1.48	AE	993.60	1.48	AE
05-06	536.5	0.85	AD	612.6	0.91	AD
06-07	651.8	1.03	AE	647.9	0.97	AD
07-08	587	0.93	AD	539.7	0.80	AD
08-09	864.1	1.36	AE	853.6	1.27	AE
09-10	697.6	1.10	AE	627.1	0.93	AD
10-11	776.4	1.22	AE	697.4	1.04	AE
11-12	759.8	1.20	AE	613.5	0.91	AD
12-13	648.8	1.02	AE	638.2	0.95	AD
13-14	641.4	1.01	AE	608.5	0.91	AD

7.2.2. Températures

La température joue un rôle déterminant dans l'étude de l'évaporation et de l'évapotranspiration. La station Les salines est la seule où ce paramètre a été enregistré (tableau 10).

Tableau 10 : Températures moyennes mensuelles (°C) à la station Les Salines (1980-2014).

T°C Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout
Températures (°C)	23.44	19.70	15.92	12.41	11.44	11.58	13.14	15.26	18.32	22.27	24.60	25.56

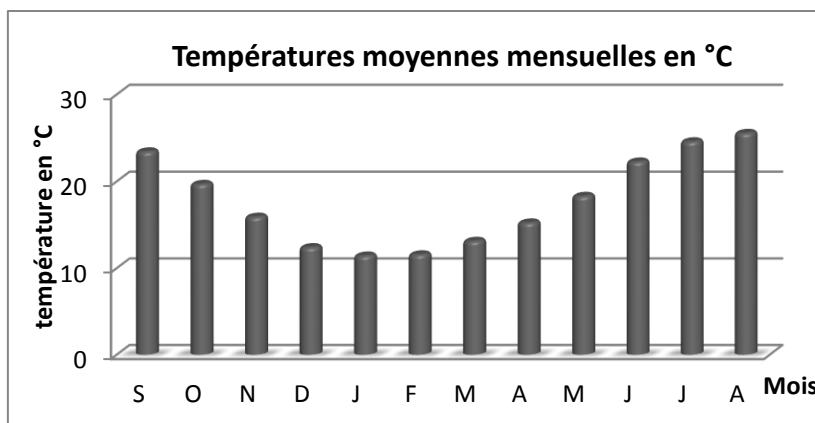


Figure 11 : Températures moyennes mensuelles (Les Salines 1980-2014).

D'après l'histogramme des températures moyennes mensuelles (figure10), le mois de Janvier est le plus froid (11.44°C), alors que le mois d'Août est le plus chaud (25.56°C) (figure 11).

7.2.3. Diagramme pluviothermique

Ce diagramme est obtenu par la combinaison des températures et des précipitations moyennes mensuelles sur la même période d'observation, selon la relation $P(\text{mm}) = 2T(^{\circ}\text{C})$. Il permet de déterminer les périodes sèches et humides (figure 12 et figure 13).

Lorsque les températures passent au-dessus de la courbe des précipitations, la saison est sèche ou déficitaire en eau, et lorsque la courbe des précipitations passe au dessus de celle des températures, la saison correspondante est humide.

Ce diagramme pluviothermique montre l'existence de deux saisons :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale de Mai à Septembre, marquée par une forte évaporation provoquée par l'augmentation de la température.
- Une saison humide plus longue s'étend d'octobre jusqu'à Mai, caractérisée par des précipitations importantes avec un maximum au mois de décembre avec respectivement 107.63 mm et 113.76 mm aux stations Pont Bouchet et Les Salines.

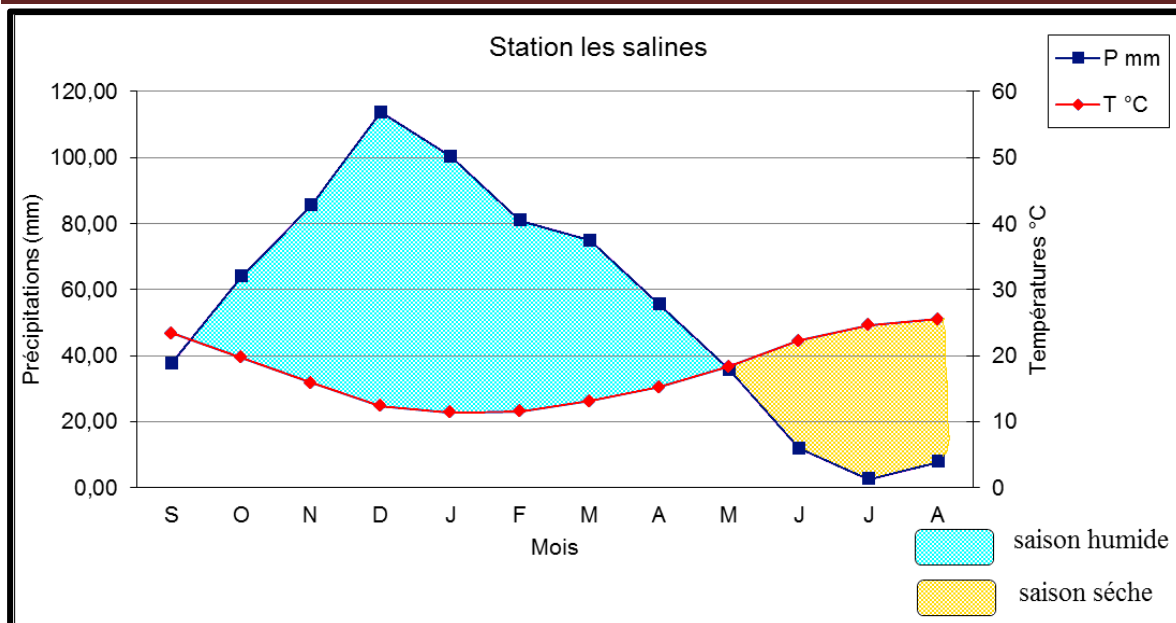


Figure 12 : Diagramme pluviothermique de la station Les Salines 1980-2014.

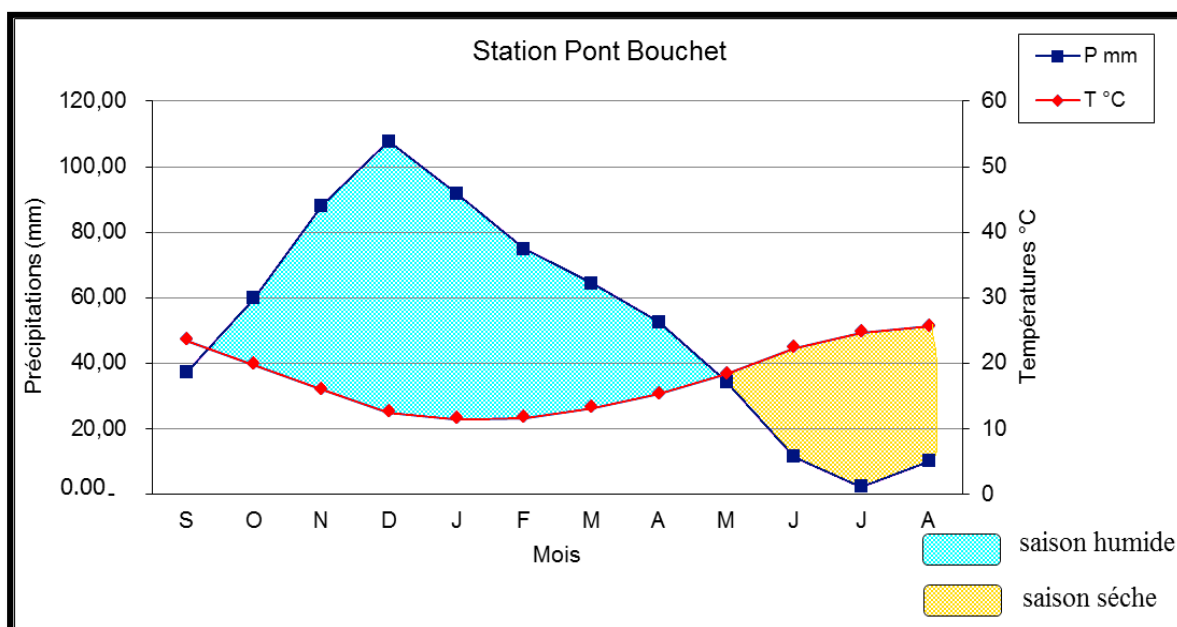


Figure 13 : Diagramme pluviothermique de la station Pont Bouchet 1980-2014.

7.2.4. Humidité relative

L'humidité relative est l'un des principaux paramètres du cycle hydrologique. Elle est la source de toutes les précipitations, elle conditionne l'évaporation. Elle correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température. La moyenne annuelle est de l'ordre de 74.84 % (figure14)

L'humidité relative mensuelle atteint son minimum au mois de juillet avec une valeur de **72.0 %** et un maximum au mois de janvier avec une valeur de **79.57 %** (tableau 11).

Tableau 11 : Moyennes mensuelles de l'Humidité relative (Les Salines 1984-2013).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Moy
H%	72.39	75.78	76.68	70.91	79.57	76.87	75.76	75.32	76.34	74.28	72.0	72.25	74.84

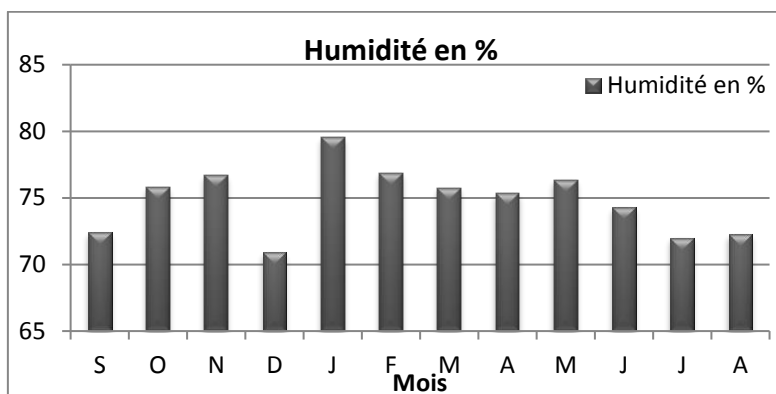


Figure 14 : Humidité relative (Les Salines 1980-2014).

7.2.5. Vents

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat.

D'après la station météorologique Les Salines, les vents dominants sont de direction NW-SE, avec des vitesses moyennes de 3.28 m/s (Tableau 10). Ces vents en contact avec le massif de l'Edough et la barrière montagneuse du Sud, déversent des pluies au passage (figure 12).

Tableau 12 : Moyennes mensuelles de la vitesse des vents (Les Salines 1984-2013).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout
Vitesse du vent (m/s)	3.68	2.74	2.58	3.23	3.34	3.56	3.51	3.51	3.26	3.06	3.45	3.40

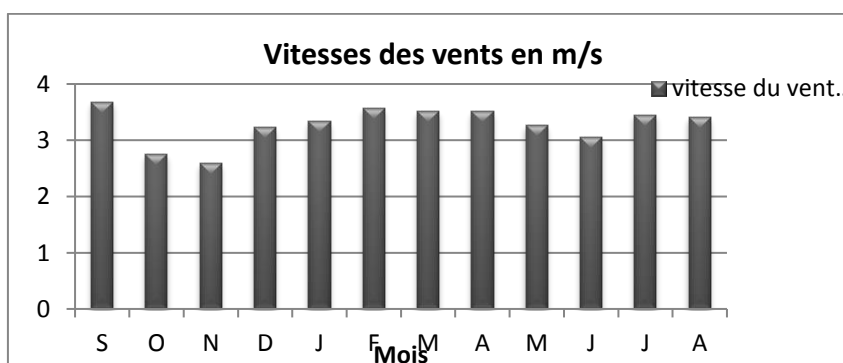


Figure 15 : Vitesse des vents (Les Salines 1984-2014).

7.3. Calcul du bilan hydrique

Le but de l'étude du bilan hydrique est d'évaluer la répartition des quantités d'eau entre ses différents composants (écoulement, infiltration et évaporation).

Il est calculé par la formule suivante :

Avec :
$$P = ETR + I + R$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement moyenne annuelle (mm).

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

7.3.1. L'évapotranspiration

C'est l'ensemble des deux phénomènes, l'une physique « évaporation » et l'autre biologique « transpiration ».

7.3.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP).

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

Elle est estimée par la formule de « Thornthwaite » appliquée par la formule suivante : (tableau 13) :

$$ETP = 16 (10t / i) a.k$$

Avec: $a = 0.016I + 0.5$, $I = \sum i$, $i = (t/5)^{1.514}$

I : somme des indices mensuels de l'année.

i : indice thermique mensuelle.

K : facteur correctif intégrant la durée d'insolation et la température.

Tableau 13. ETP obtenue par la formule de Thornthwaite (Les Salines (1980-2014)).

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

7.3.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la somme de l'évaporation et la transpiration réelle pour une surface donnée à une période définie.

La méthode de Thornthwaite est la plus utilisée où l'estimation de l'ETR en (mm) est liée au volumes de précipitations.

Trois cas peuvent se présenter :

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

Il y a une reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus va représenter l'écoulement superficelle.

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

Dans ce cas, la RFU (Réserve Facilement Utilisable) va s'épuiser jusqu'à satisfaction de l'ETP.

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

Il y aura donc un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation.

Les résultats sont représentés dans le tableau du bilan hydrique (tableau 14)

7.3.4. Ruissellement (R)

Le ruissellement (R) peut être calculé par deux formules :

Tixeront Berkallof, pour $P < 600$ mm $R = P^3/3 \cdot (ETP)^2$

Tixeront Berkallof modifiée par Romantchouk (1974) pour $P > 600$ mm $R = P^3/3$

Avec : P : Précipitations (mm).

R : Ruissellement (mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

Les précipitations enregistrées dans la région d'étude dépassent 600 mm pour Les Salines et Pont Bouchet ; la formule utilisée est celle de Tixeront Berkallof modifiée par Romantchouk (1974).

Les résultats obtenus sont enregistrés dans le tableau 14.

Tableau14. Ruissellements pour les deux stations (1980-2014)

Stations \ Paramètres	P(mm)	R(mm)
Les Salines	670.7	100.7
Pont Bouchet	633.9	84.9

7.3.5. Infiltration

Il s'agit de la quantité d'eau franchissant la surface du sol. Elle renouvelle les réserves d'eau souterraines et entretient le débit de l'écoulement souterrain des sorties, après circulation dans

les formations hydrogéologiques perméables du sous-sol (tableau 15) (Castany, 1982). Elle est déduite de l'équation fondamentale du bilan hydrique (tableau 15) :

$$P = ETR + R + I \quad \Longrightarrow \quad I = P - (R + ETR)$$

Avec : I : Infiltration (mm)

P : Précipitations (mm).

R : Ruissellement (mm)

ETP : Evapotranspiration annuelle (mm)

Tableau 15. Infiltration pour les deux stations (1980-2014)

Paramètres Stations	P(mm)	R(mm)	ETR(mm)	I(mm)
Les Salines	670.7	100.7	469	101
Pont Bouchet	633.9	84.9	463.8	85.2

7.4. Bilan hydrique

L'estimation du bilan hydrique par la méthode de « Thornthwaite » prend en considération la réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), cette eau peut être reprise par les plantes. Pour notre cas, on prend RFU= 100 mm (tableau 16 et tableau 17).

En fonction de la RFU, les bilans des deux stations : Les Salines et Pont Bouchet (1980-2014) ont été établis (figure 16 et figure 17).

Tableau 16. Bilan hydrique par la méthode de « Thornthwaite » (Les Salines 1980-2014)

Paramètres (mm) Mois	T(°C)	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Défi	Exe
S	23.4	10.4	1.03	109.0	37.75	-71.2	-0.7	0.0	0.0	37.8	71.2	0.0
O	19.7	8.0	0.97	74.4	63.92	-10.4	-0.1	0.0	0.0	63.9	10.4	0.0
N	15.9	5.8	0.86	44.4	85.54	41.1	0.9	41.1	41.1	44.4	0.0	0.0
D	12.4	4.0	0.81	26.4	113.8	87.4	3.3	58.9	100.0	26.4	0.0	28.5
J	11.4	3.5	0.87	24.4	100.4	76.0	3.1	0.0	100.0	24.4	0.0	76.0
F	11.6	3.6	0.85	24.3	80.84	56.5	2.3	0.0	100.0	24.3	0.0	56.5
M	13.1	4.3	1.03	37.3	74.94	37.7	1.0	0.0	100.0	37.3	0.0	37.7
A	15.3	5.4	1.10	52.5	55.45	2.9	0.1	0.0	100.0	52.5	0.0	2.9
M	18.3	7.1	1.21	81.1	35.77	-45.3	-0.6	-45.3	54.7	81.1	0.0	0.0
J	22.3	9.6	1.22	117.4	11.91	-105.5	-0.9	-54.7	0.0	66.6	50.8	0.0
J	24.6	11.2	1.24	143.5	2.56	-140.9	-0.1	0.0	0.0	2.6	140.9	0.0
A	25.6	11.8	1.16	144.1	7.86	-136.2	-0.9	0.0	0.0	7.9	136.2	0.0
Annuelle	17.8	84.6		878.6	670.7	-208.0				469.0	409.6	201.6

Tableau17. Bilan hydrique par la méthode de « Thornthwaite » (Pont Bouchet 1980-2014)

Paramètres (mm) Mois	T(°C)	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Défi	Exe
S	23.4	10.4	1.03	109.0	37.13	-71.8	-0.7	0.0	0.0	37.1	71.8	0.0
O	19.7	8.0	0.97	74.4	59.71	-14.6	-0.2	0.0	0.0	59.7	14.6	0.0
N	15.9	5.8	0.86	44.4	88.12	43.7	1.0	43.7	43.7	44.4	0.0	0.0
D	12.4	4.0	0.81	26.4	107.6	81.3	3.1	56.3	100.0	26.4	0.0	25.0
J	11.4	3.5	0.87	24.4	91.81	67.5	2.8	0.0	100.0	24.4	0.0	67.5
F	11.6	3.6	0.85	24.3	74.85	50.5	2.1	0.0	100.0	24.3	0.0	50.5
M	13.1	4.3	1.03	37.3	64.41	27.1	0.7	0.0	100.0	37.3	0.0	27.1
A	15.3	5.4	1.10	52.5	52.56	0.0	0.0	0.0	100.0	52.5	0.0	0.0
M	18.3	7.1	1.21	81.1	34.24	-46.8	-0.6	-46.8	53.2	81.1	0.0	0.0
J	22.3	9.6	1.22	117.4	11.37	-106.0	-0.9	-53.2	0.0	64.5	52.8	0.0
J	24.6	11.2	1.24	143.5	2.11	-141.4	-1.0	0.0	0.0	2.1	141.4	0.0
A	25.6	11.8	1.16	144.1	9.94	-134.2	-0.9	0.0	0.0	9.9	134.2	0.0
Annuelle	17.8	84.6		878.6	633.9	-244.7				463.8	414.9	170.1

7.4.1. Représentation graphique du bilan hydrique

Afin d'éclairer les résultats obtenus, une représentation graphique des données a été établie :

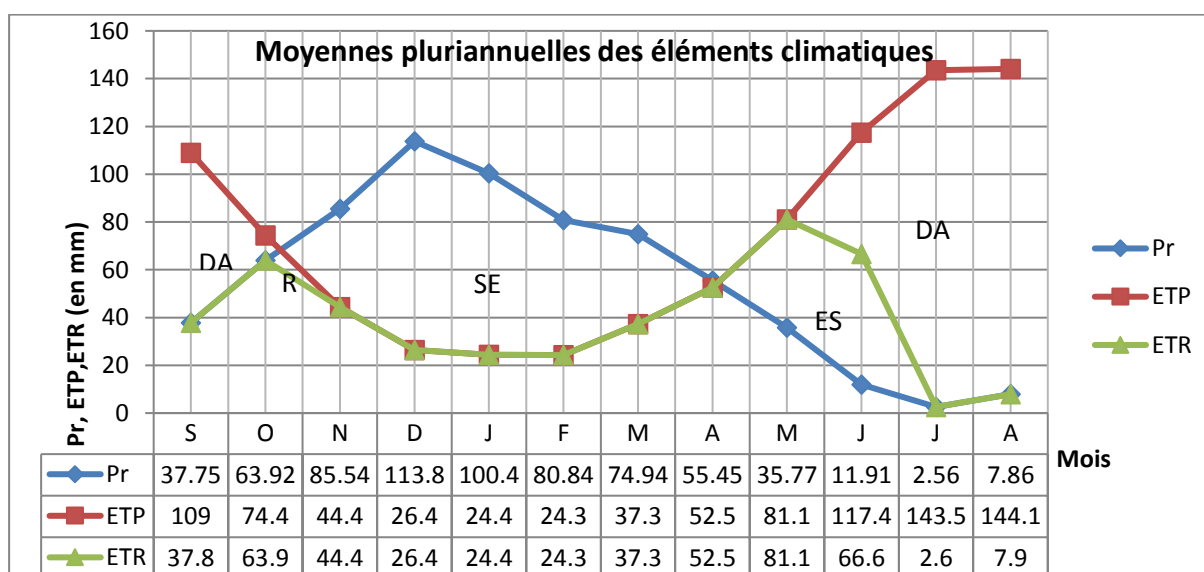


Figure 16 : Représentation graphique du bilan hydrique pour la station les Salines (1980-2014).

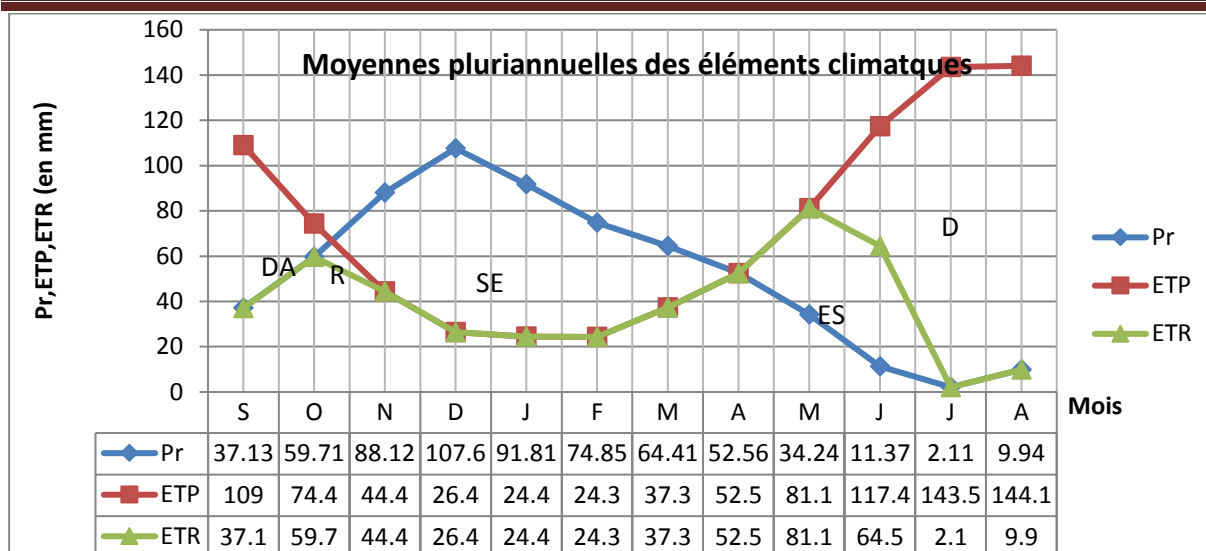


Figure 17: Représentation graphique du bilan hydrique pour la station de Pont Bouchet (1980-2014).

Légende :

SE : Surplus d'eau

DA : Déficit Agricole

ES : Epuisement du stock

R : Recharge du sol

7.4.2. Interprétation du bilan hydrique

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

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est totale, il y a un surplus d'eau accompagné généralement d'un écoulement ; dès que la RFU diminue, il y a un épuisement du stock, il y aura un déficit agricole (DA).

Les résultats obtenus du bilan hydrique des deux stations (Les Salines et Pont Bouchet) respectivement illustrés dans les tableaux et les graphismes précédents, nous permettent de tirer les observations suivantes :

7.4.2.1. Station Les Salines

L'ETP atteint son maximum en août (144.1mm) et son minimum en février (24.3mm).

La reconstitution de la RFU commence en Novembre et atteint son maximum (100mm) en décembre et se poursuit jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU, c'est-à-dire en décembre et se termine en avril, avec un maximum en janvier (76mm) et un minimum en avril (2.9mm).

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

L'excédent (201.6 mm) représente 31 % des précipitations annuelles (670.7mm) et l'ETR (469mm) 69% des précipitations.

7.4.2.2. Station Pont Bouchet

L'ETP atteint son maximum en août (144.1mm) et son minimum en février (24.3mm).

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

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU, c'est-à-dire en décembre et se termine en mars, avec un maximum en janvier (67.5mm)

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

L'excédent (170.1 mm) représente 26 % des précipitations annuelles et l'ETR (463.8mm) représente 74% des précipitations.

Conclusion

La zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 670.7mm (Les Salines) à 633.9 mm (Pont Bouchet) et par une température moyenne modérée de 17.8°C. Ces deux paramètres climatiques ont permis de distinguer deux saisons hydriques du climat méditerranéen, l'une sèche et l'autre humide.

Le bilan hydrique nous a permis d'évaluer les quantités d'eau entrées et sorties de la surface étudiée. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de 878.6mm pour l'ensemble des stations. La reconstitution de la recharge commence en octobre et s'achève en novembre. L'épuisement

du stock du sol s'observe en mai et la nécessité d'irriguer s'impose surtout pour la période allant de juin à octobre où l'on constate un déficit agricole pouvant atteindre 409.6mm (Les Salines), 424.9mm (Pont Bouchet). Les résultats obtenus sur l'infiltration efficace sont de 90mm (Les Salines) et 131.75mm (Pont Bouchet) ceux du ruissellement sont de 113.3mm (Les Salines), 115mm (Pont Bouchet).

Chapitre III :
Matériel et Méthodes

Chapitre III : Matériel et méthodes

Généralement le mécanisme naturel de la chimie des eaux dépend principalement de la nature des formations géologiques, des milieux traversés et du temps de séjour des eaux ; en effet l'interaction eau/roche est responsable de la modification des teneurs des éléments majeurs constitutifs tels que : azote, calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorure, sulfate, carbonate et bicarbonate... etc.

Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs, climatiques, anthropiques, les échanges entre l'aquifère et les eaux de surface. Dans la région du lac Fetzara, ce mécanisme des eaux (souterraines et superficielles) est influencé par l'effet de la dissolution des formations géologiques, l'évapotranspiration des eaux du lac, les rejets industriels et l'activité agricole.

1. Echantillonnage :

Cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux du lac Fetzara (eaux souterraines et surface) et l'influence des ions azotés sur la dynamique des sels solubles de ces eaux, ainsi que l'origine de la salinité et son évolution spatio-temporelle .

Le prélèvement des échantillons d'eau a été effectué à une profondeur d'environ 50 cm. Les volumes d'eau prélevés sont ensuite transvasés dans des bouteilles en plastique de 500 ml préalablement lavées puis rincées à l'eau de l'échantillon.

Deux campagnes de prélèvements (décembre 2013, mai 2014) ont été effectuées, pour un total de 56 échantillons. Ces échantillons se rapportent aux eaux souterraines et surface dans la cuvette du lac Fetzara (figure 18). Les prélèvements sont répartis de la façon suivante :

Eaux de surface : 33 échantillons, les prélèvements ont été effectués sur tous les effluents, le canal principal et les oueds (Zied, El-Hout et Mellah) qui alimentent le lac et l'oued Meboudja qui assure le drainage des eaux du lac. Les échantillons sont répartis de la façon suivante : 18 échantillons pour la première campagne (décembre 2013) et 15 pour la deuxième campagne (mai 2014).

Eaux souterraines : 23 échantillons au total pour les eaux souterraines soit : 13 échantillons pour la première campagne (décembre 2013) et 10 échantillons pour la deuxième campagne (mai 2014).

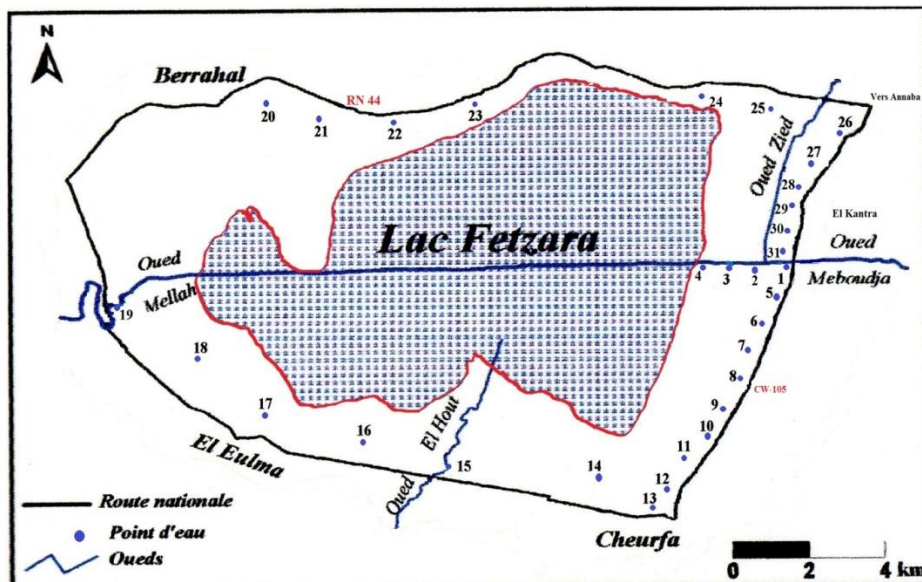


Figure 18 : Situation des sites d'échantillonnage des eaux

2. Etude au laboratoire

Les échantillons d'eau ramenés au laboratoire sont filtrés avant d'être analysés, afin d'empêcher d'une part l'action des micro-organismes sur la solution et d'autre part pour retirer les éléments solides en suspension pouvant interagir ultérieurement avec les sels solubles de la solution. Les paramètres étudiés sont les suivants :

- **pH** : mesuré à l'aide d'une électrode spécifique reliée à un pH mètre .
- **Conductivité électrique (CE)** : mesurée en mS/cm à 25 °C à l'aide d'une électrode spécifique.
- ❖ **Dosage des anions** :
 - Chlorures (Cl^-) : par titrimétrie à l' AgNO_3 .
 - Sulfates (SO_4^{2-}) : par gravimétrie au BaCl_2
 - Carbonates (CO_3^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-) : par titrimétrie à H_2SO_4 .
 - Nitrites (NO_2^-) : par spectrophotomètre. La méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Zambelli (Rodier, 1978)
 - Nitrates (NO_3^-) : par spectrophotomètre. La méthode utilisée pour le dosage est celle de la méthode au salicylate de sodium (Rodier, 1978)
- ❖ **Dosage des cations** :
 - Calcium (Ca^{++}) et Magnésium (Mg^{++}) : par complexométrie à l'EDTA
 - Sodium (Na^+) et Potassium (K^+) : par spectrophotomètre à flamme
 - Ammonium (NH_4^+) : par spectrophotomètre. La méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Nessler (Rodier, 1978)

Les échantillons des eaux prélevées dans les différentes stations ont été traités selon les protocoles appropriés en fonction des moyens disponibles au niveau de notre laboratoire.

2. Méthodes d'étude

3.1. Traitement statistique

Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique, les différents paramètres soumis à l'analyse, constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des deux campagnes analysées a donc été traitée statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel XLSTAT (version 2015).

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

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

3.2. Classification hiérarchique ascendante (CHA)

La classification ascendante hiérarchique part d'une situation où tous les individus sont seuls dans une classe, puis sont rassemblés en classes de plus en plus grandes. On parle de la classification hiérarchique car chaque classe d'une partition donnée est incluse dans la classe de la partition suivante, ceci suppose savoir calculer à chaque étape ou regroupement, la distance entre un individu et un groupe ou la distance entre deux groupes. Pour l'utilisation de cette méthode, il faut faire un choix supplémentaire, comment définir la distance entre deux groupes et quel est le critère d'agrégation à retenir, le résultat de classification est présenté sous forme graphique appelé « dendogramme » (Sekiou, 2014).

3.3. Diagrammes interprétatifs

L'outil le plus fréquent est le diagramme de Piper pour exprimer le faciès chimique des eaux, basé sur les concentrations équivalentes (en meq/l) et relatives par rapport à la somme des cations voire anions. Il comporte deux diagrammes triangulaires pour les cations et les anions ainsi qu'un losange qui combine la somme des cations monovalents ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), celle des cations bivalents ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$), et les bicarbonates plus carbonates ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) et ($\text{Cl}^- +$

$\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$)(figure 19). C'est le losange qui est utilisé pour différencier les faciès hydrochimiques rencontrés (tableau 18).

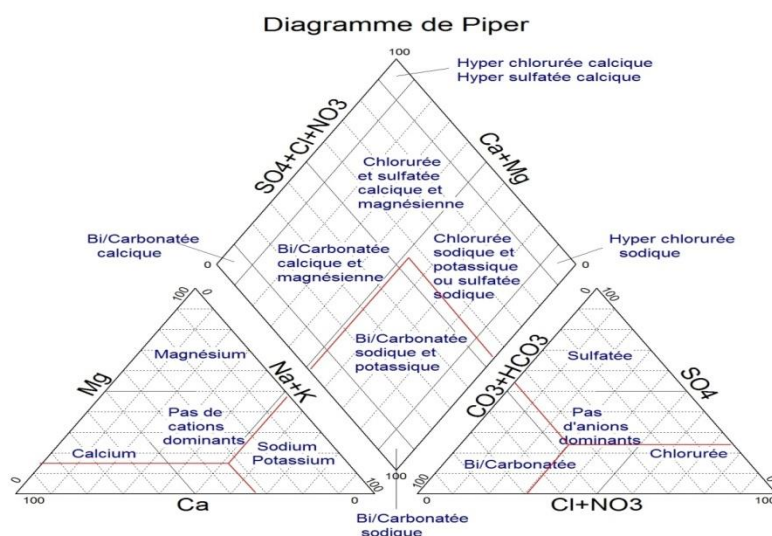


Figure 19. Différents faciès hydrochimiques dans le diagramme de Piper

Tableau 18. Faciès hydrochimiques et contextes géologiques (Banton et Bangoy, 1999)

Faciès hydrochimiques	Environnement géologique et géochimique
Bicarbonaté-calcique et/ou magnésien	Faciès fréquent dans les eaux douces continentales et dans les environnements calcaires, la présence des formations dolomitiques est à l'origine de la tendance magnésienne.
Bicarbonaté-sodique et/ou potassique	Faciès fréquent dans les environnements riches en formations volcaniques. Il se trouve aussi dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange Ca^{++} contre Na^+ sur des argiles).
Sulfaté	Faciès fréquent dans les environnements riches en minéraux évaporitiques (gypse [$\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$]) ou minéraux sulfurés (pyrite [FeS_2]).
Chloruré-sodique	Faciès fréquent dans les milieux riches en évaporites (exemples : halite [NaCl]). Faciès rencontré également dans les secteurs pétrolifères et certaines zones d'activités volcaniques. L'eau de mer et les eaux salines issues des intrusions marines sont des faciès $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{++} - \text{Cl}^-$ mais peuvent évoluer dans les aquifères côtiers, vers un faciès alcalino-terreux chloruré par échange cationique.
Chloruré-calcique	Faciès fréquent dans les milieux riches en minéraux argileux contaminés par une solution saline de type $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (dissolution d'halite ou intrusion marine). Les interactions eau-roche se manifestent alors par des échanges cationiques entre ions bivalents (Ca^{++} et Mg^{++} relâchés dans la solution) et monovalents (Na^+ et K^+ adsorbés sur les argiles). Des saumures profondes de type $\text{Ca}^{++} - \text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ sont présents dans la plupart des boucliers cristallins du monde (Canada, Scandinavie, Russie...) et leur origine a été discutée dans la littérature (Leybourne et Goodfellow, 2007)

3.4.Indice de saturation (IS)

Il est exprimé par l'équation suivante :

$$\text{SI} = \text{Log} (\text{IAP}/\text{Ks})$$

C'est le rapport de l'activité ionique IAP au produit de solubilité à une température donnée. Cet indice indique les tendances des phases à se dissoudre ou précipiter, et permet de suivre l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère, en traduisant les différents processus réactionnels, dont le siège est l'interaction de l'eau avec les matériaux aquifères.

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

Quand SI est positif, il signifie que la solution est saturée ou sursaturée à l'égard du minéral qui a tendance à la précipitation. Par contre, quand SI est négatif, la solution est sous-saturée vis-à-vis du minéral qui a tendance à la dissolution donc l'eau est en équilibre avec le minéral étudié (Peter-Borie et al, 2009).

3.5. Les relations ions azotés- sels solubles

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

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

Chapitre IV :
L'approche statistique

Chapitre IV : L'approche statistique

Le but de cette étude statistique est de déterminer les différentes sources de variabilités de la chimie des eaux du lac Fetzara, dégager les associations qui peuvent éventuellement exister, ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport aux autres, cela nous permet de donner une idée sur l'influence des ions azotés sur la dynamique des sels solubles.

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les deux campagnes d'échantillonnage (Décembre 2013, Mai 2014), et qui se présentent en deux parties : analyses des eaux de surface et souterraines. Les données ont été traitées statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel XLSTAT (version 2015).

Pour chaque échantillon, les données traitées portent sur les mesures du pH, la conductivité électrique (CE en mS/cm), les teneurs en Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- et NH_4^+ dont les concentrations ioniques sont exprimées en méq/l. Ce sont donc au total 13 paramètres qui seront traités grâce à l'Analyse en Composantes Principales.

1. Etude statistique des eaux de surface

Tableau 19 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Décembre 2013)

Axes	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	5.16	2.21	1.69	1.43
Variance	39.72	17.03	13.04	11.00
% cumulé	39.72	56.76	69.81	80.81

Tableau 20 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Mai 2014)

Axe	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	5,94	2,75	1,48	1,15
Variance	45,73	21,15	11,43	8,91
% cumulé	45,73	66,88	78,31	87,22

L'analyse des données durant la première campagne est effectuée sur 13 variables et 18 échantillons d'eau de surface, le tableau 19 rend compte des valeurs propres et des variances expliquées par les premiers axes factoriels. Il montre une variance de 56.75 % sur le premier plan F1F2, plusieurs relations entre les éléments chimiques ont été observées. Pour le traitement, nous avons choisi deux axes qui expriment 56.75 % des renseignements (tableau 19). Pour la deuxième campagne, l'étude statistique est effectuée sur 13 variables et 15 échantillons d'eau de surface, le tableau 20 montre des valeurs propres et des variances expliquées par les premiers axes factoriels. Il montre une variance de 66.88 % sur le premier plan F1F2, donc nous avons choisi deux axes qui expriment 66.88 % des renseignements (tableau 20).

1.1. Matrice des corrélations

Tableau 21: Matrice des corrélations eaux de surface (Décembre 2013)

Variables	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	CE	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Cl ⁻	1												
Na ⁺	0,496	1											
K ⁺	-0,552	-0,024	1										
Ca ⁺⁺	0,834	0,238	-0,568	1									
Mg ⁺⁺	0,685	0,652	-0,270	0,515	1								
CO ₃ ²⁻	-0,201	-0,202	0,077	-0,132	-0,266	1							
HCO ₃ ⁻	-0,241	-0,289	-0,390	-0,132	-0,246	0,388	1						
SO ₄ ²⁻	0,261	-0,048	-0,096	0,392	0,213	0,285	-0,180	1					
pH	-0,381	-0,047	0,426	-0,423	-0,114	-0,277	-0,496	-0,047	1				
CE	0,989	0,440	-0,614	0,820	0,699	-0,196	-0,186	0,218	-0,388	1			
NO ₂ ⁻	0,600	-0,043	-0,284	0,738	0,356	0,034	-0,329	0,606	-0,170	0,570	1		
NO ₃ ⁻	0,705	0,308	-0,205	0,502	0,462	-0,187	-0,322	0,326	-0,053	0,653	0,647	1	
NH ₄ ⁺	-0,050	-0,206	-0,283	-0,085	-0,207	-0,161	-0,214	0,105	0,430	-0,032	-0,080	-0,097	1

Tableau 22 : Matrice des corrélations eaux de surface (Mai 2014)

Variables	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	CE	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Cl ⁻	1												
Na ⁺	0,945	1											
K ⁺	0,052	-0,074	1										
Ca ⁺⁺	0,931	0,839	0,220	1									
Mg ⁺⁺	0,671	0,560	0,042	0,613	1								
CO ₃ ²⁻	0,112	0,243	0,164	0,041	0,203	1							
HCO ₃ ⁻	-0,594	-0,726	0,422	-0,515	-0,297	-0,079	1						
SO ₄ ²⁻	0,132	0,154	-0,478	-0,001	0,319	-0,173	-0,428	1					
pH	0,765	0,866	-0,448	0,578	0,471	0,349	-0,766	0,341	1				
CE	0,982	0,927	0,146	0,922	0,722	0,146	-0,525	0,135	0,704	1			
NO ₂ ⁻	0,693	0,608	-0,028	0,566	0,704	0,032	-0,118	0,100	0,536	0,717	1		
NO ₃ ⁻	-0,113	-0,137	-0,292	-0,107	0,402	0,118	-0,224	0,504	-0,013	-0,093	-0,230	1	
NH ₄ ⁺	0,219	0,100	0,835	0,355	0,330	0,128	0,212	-0,155	-0,246	0,304	0,252	-0,125	1

Les résultats de la première campagne montrent qu'il existe des corrélations positives et significatives entre Ca⁺⁺, Cl⁻, CE, NO₂⁻, NO₃⁻ (Tableau 21). Donc pour les eaux de surface du lac Fetzara, les plus fortes valeurs du coefficient de corrélation correspondent aux couples Ca⁺⁺/CE, Cl⁻/CE, Ca⁺⁺/Cl⁻ ce sont des valeurs en relation avec la CE, donc sous l'influence de la salinité. Certains coefficients peuvent être également considérés comme importants, c'est le cas des couples NO₂⁻/Ca⁺⁺, NO₃⁻/Cl⁻, Mg⁺⁺/Cl⁻, Mg⁺⁺/Na⁺, CE /NO₃⁻, NO₂⁻/SO₄²⁻. Les valeurs négatives impliquent particulièrement les couples en relation avec pH, mais elles ne sont pas significatives.

Pour la deuxième campagne, la matrice de corrélation montre qu'il existe des corrélations positives et significatives entre Ca^{++} , Cl^- , CE, Na^+ (Tableau 22). Donc les plus fortes valeurs du coefficient de corrélation correspondent aux couples Ca^{++}/CE , Cl^-/CE , $\text{Ca}^{++}/\text{Cl}^-$, Na^+/CE , Na^+/Cl^- . Certains coefficients peuvent être également considérés comme importants, c'est le cas des couples $\text{Mg}^{++}/\text{Cl}^-$, $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$, Ca^+/Na^+ , $\text{NO}_2^-/\text{Na}^+$, CE/NO_2^- et NH_4^+/K^+ .

1.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des eaux de surface

L'ACP de la première campagne montre un premier axe factoriel représentant à lui seul 39.72% de la variabilité totale. Il est suivi ensuite par trois autres axes qui sont : 17.03%, 13.04% et 11% (tableau 19). Les autres axes avec des pourcentages de variance inférieurs à 11%, sont négligeables et portent probablement sur des imprécisions analytiques. Celui de la deuxième campagne montre un premier axe factoriel représentant 45.73% de la variabilité totale. Il est suivi ensuite par trois autres axes qui sont : 21.15%, 11.43% et 8.91% (tableau 20). Ainsi pour le lac Fetzara, un mécanisme semble prédominant pour la chimie des eaux, puis viennent ensuite trois processus ou sources de variation d'importance secondaire. Il convient maintenant de tenter de déterminer quels sont ces processus ou sources de variation de la composition chimique des eaux de surface. Pour cela le plan factoriel sera examiné.

1.2.1. Plans factoriels de la première campagne

1.2.1.1. Premier plan factoriel

Pour la première campagne, il existe une opposition des principaux sels solubles qui sont : SO_4^- , Cl^- , Na^+ , Mg^{++} , NO_3^- , NO_2^- , Ca^{++} et CE qui représente le pôle de la minéralisation face aux HCO_3^- , K^+ , CO_3^{2-} et pH, localisé dans la partie négative (figure 20). Sur le plan des individus c'est l'échantillon P3 (Est du lac) qui est un canal secondaire lié avec oued Meboudja qui présente l'eau fortement minéraliser (figure 21), cette opposition est expliquée par le processus de salinisation des eaux sous l'effet de l'évaporation, c'est un processus naturel très fréquent dans le bassin méditerranéen .

1.2.1.2. Deuxième plan factoriel

Dans le deuxième axe factoriel, on remarque également une opposition entre d'une part HCO_3^- et CO_3^{2-} dans le pôle positif et d'autre part NH_4^+ , K^+ et pH. Sur le plan des individus les échantillons : P12, P13, P14, P15 (Sud-Est du lac) présentent les eaux carbonatées et ce sont les eaux de la commune de Cheurfa. Ceci traduit probablement des phénomènes d'oxydo – réduction.

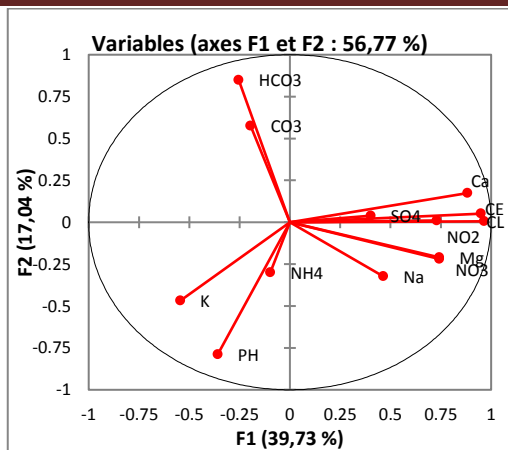


Figure 20: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (décembre 2013).

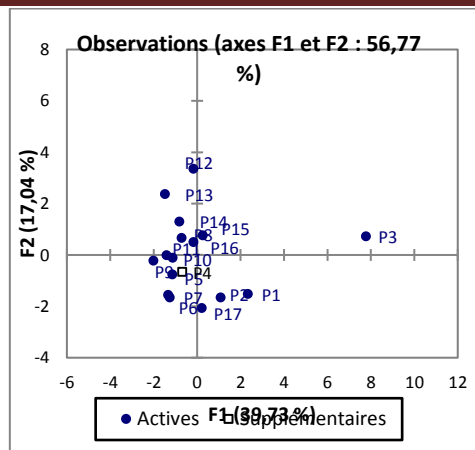


Figure 21: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (décembre 2013).

1.2.2 Plans factoriels de la deuxième campagne

1.2.2.1. Premier plan factoriel

Le premier axe factoriel de la deuxième campagne montre une opposition des principaux sels solubles qui sont : SO_4^- , Cl^- , Na^+ , Mg^{++} , NO_2^- , NH_4^+ , CO_3^{2-} , Ca^{++} et CE aux HCO_3^- (figure 22), et c'est le même échantillon P3 qui présente la forte minéralisation de ces eaux (figure 23), ceci montre que les eaux sont fortement minéralisées en période hivernale qu'en période estivale. Le climat a joué certainement un rôle important pour le chargement des eaux avec les pluies et les eaux de ruissellement.

1.2.2.2. Deuxième plan factoriel

Dans le deuxième axe factoriel, on remarque une opposition entre d'une part HCO_3^- , NH_4^+ , K^+ dans le pôle positif et d'autre part SO_4^{2-} et NO_3^- . Sur le plan des individus, les échantillons P5, P12, P4, P15 (Est et Sud-Est du lac) présentent des eaux carbonatées, ce sont les eaux de la commune de Cheurfa. Ceci traduit probablement des phénomènes d'oxydo-réduction affectant les espèces ioniques azotées et peut-être une fixation des ions K^+ par les minéraux argileux. Surtout que ces sols sont des sols halomorphes fréquents dans la partie Est et Sud-Est du lac, caractérisés par la présence des sels solubles, une texture lourde et riches en minéraux argileux gonflants.

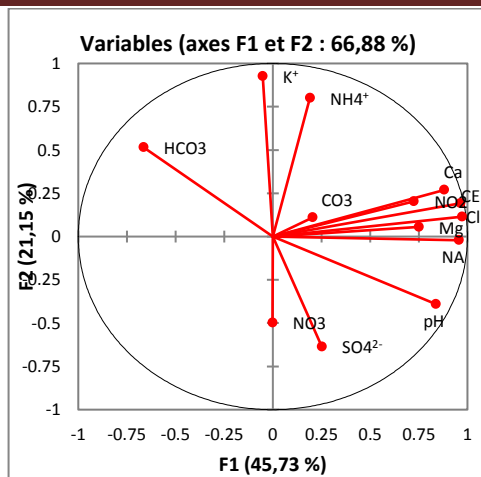


Figure 22: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (Mai 2014).

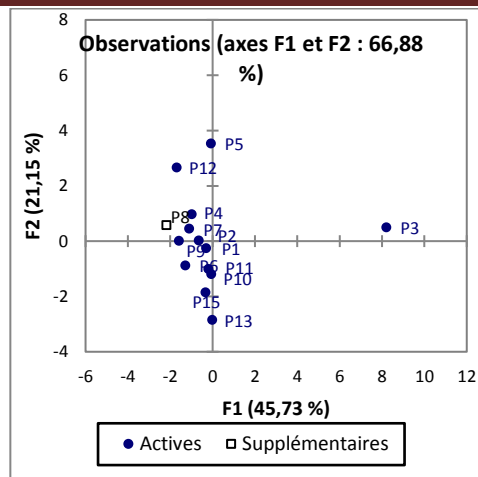


Figure 23: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (Mai 2014).

2. Etude statistique des eaux souterraines

Tableau 23 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Décembre 2013)

Axes	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	3,538	3,110	1,830	1,570
Variance (%)	27,216	23,924	14,074	12,076
% cumulé	27,216	51,140	65,214	77,289

Tableau 24 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Mai 2013)

Axes	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	5,391	2,758	2,414	1,252
Variance (%)	41,472	21,219	18,571	9,631
% cumulé	41,472	62,691	81,262	90,893

L'analyse des données durant la première campagne est effectuée sur 13 variables et 13 échantillons d'eaux souterraines. Le tableau 23 rend compte des valeurs propres et des variances expliquées par les premiers axes factoriels. Il montre une variance de 51.14 % sur le premier plan F1F2, plusieurs relations entre les éléments chimiques ont été observées. Pour le traitement, nous avons choisi deux axes qui expriment 51.14 % des renseignements.

Pour la deuxième campagne, l'étude statistique est effectuée sur 13 variables et 10 échantillons d'eaux souterraines. Le tableau 24 montre des valeurs propres et des variances expliquées par les premiers axes factoriels. Il montre une variance de 62.69 % sur le premier plan F1F2.

2.1. Matrice des corrélations

Tableau 25 : Matrice des corrélations des eaux souterraines (Décembre 2013)

Variables	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	CE	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Cl ⁻	1												
Na ⁺	0,084	1											
K ⁺	0,015	-0,497	1										
Ca ⁺⁺	0,180	-0,270	0,194	1									
Mg ⁺⁺	0,785	0,014	0,349	0,175	1								
CO ₃ ⁻	0,448	-0,094	-0,370	-0,397	0,039	1							
HCO ₃ ⁻	0,376	0,112	-0,447	-0,376	0,131	0,820	1						
SO ₄ ²⁻	0,006	-0,170	0,171	-0,133	0,063	-0,215	-0,367	1					
pH	0,081	-0,094	-0,147	-0,664	0,068	0,467	0,412	0,211	1				
CE	0,898	0,227	-0,131	0,399	0,668	0,225	0,202	0,014	-0,123	1			
NO ₂ ⁻	0,081	-0,276	0,058	0,418	0,151	-0,122	0,282	-0,151	-0,041	0,091	1		
NO ₃ ⁻	-0,227	-0,315	0,317	0,352	-0,125	-0,261	-0,263	-0,139	-0,463	-0,109	0,041	1	
NH ₄ ⁺	0,739	-0,329	0,341	0,183	0,674	0,166	-0,016	0,187	0,084	0,581	0,092	-0,088	1

Tableau 26 : Matrice des corrélations des eaux souterraines (Mai 2013)

Variables	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	CE	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Cl ⁻	1												
Na ⁺	0,810	1											
K ⁺	-0,407	-0,356	1										
Ca ⁺⁺	-0,288	-0,182	-0,687	1									
Mg ⁺⁺	0,370	0,684	-0,507	0,374	1								
CO ₃ ⁻	-0,259	-0,196	-0,573	0,704	0,223	1							
HCO ₃ ⁻	0,791	0,747	-0,465	0,032	0,694	-0,290	1						
SO ₄ ²⁻	0,492	0,723	-0,546	0,290	0,593	0,370	0,349	1					
pH	-0,407	-0,211	0,461	-0,412	-0,210	-0,207	-0,352	-0,546	1				
CE	0,680	0,887	-0,602	0,134	0,670	0,203	0,542	0,920	-0,397	1			
NO ₂ ⁻	-0,163	0,016	0,453	-0,325	-0,405	-0,165	-0,471	0,237	0,096	0,031	1		
NO ₃ ⁻	-0,517	-0,310	0,359	0,027	-0,410	0,175	-0,685	0,122	0,139	-0,178	0,884	1	
NH ₄ ⁺	0,217	-0,123	-0,518	0,499	0,045	0,082	0,429	-0,068	-0,486	-0,120	-0,375	-0,248	1

Les résultats de la première campagne montrent qu'il existe des corrélations positives et significatives avec des fortes valeurs du coefficient de corrélation entre les couples, CE/Cl⁻, NH₄⁺/Cl⁻, Mg⁺⁺/Cl⁻ et HCO₃⁻/CO₃²⁻. D'autres coefficients peuvent être considérés comme importants, c'est le cas des couples CE/ Mg⁺⁺, NH₄⁺/ Mg⁺⁺, CE / NH₄⁺ (tableau 25).

Les résultats de la deuxième campagne donnent des corrélations positives et significatives avec des fortes valeurs du coefficient de corrélation aux couples Na⁺/CE, Na⁺/Cl⁻, SO₄²⁻/CE, NO₂⁻/NO₃⁻. Certains coefficients peuvent être également considérés comme importants, c'est le cas des couples HCO₃⁻/ Cl⁻, HCO₃⁻/Na⁺ et Ca⁺⁺ /CO₃²⁻(tableau 26).

2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des eaux souterraines

L'ACP montre un premier axe factoriel représentant à lui seul 41.47% de la variabilité totale. Il est suivi ensuite par trois autres axes qui sont : 21.21%, 18.57% et 9.63%. Les autres axes avec des pourcentages de variance inférieurs à 9 %, sont négligeables. Donc, pour les eaux souterraines du lac Fetzara, un mécanisme semble prédominant pour la chimie des eaux, puis viennent ensuite trois processus ou sources de variation d'importance secondaire.

2.2.1. Plans factoriels de la première campagne

2.2.1.1. Premier plan factoriel

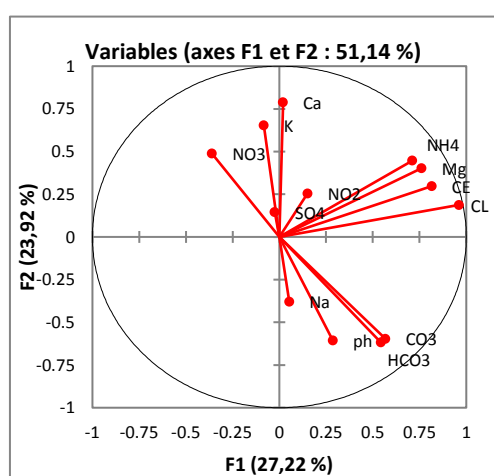


Figure 24: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (décembre 2013).

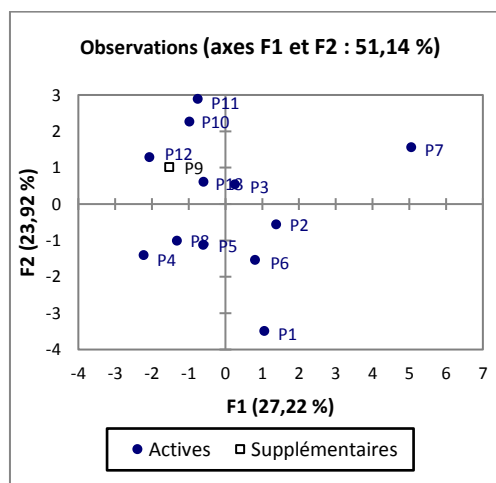


Figure 25: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (décembre 2013).

Le premier axe factoriel de cette campagne indique un pôle positif de minéralisation des principaux sels solubles qui sont : NH_4^+ , CO_3^{2-} , Cl^- , Mg^{++} , CE et HCO_3^- (figure 24), face aux ions azotés tels que NO_3^- . Dans le pôle négatif, sur le plan des individus, les échantillons P1, P2, P6 et P7 (Est du lac) présentent l'eau fortement minéralisée, ce sont les eaux de Cheurfa, sous l'effet de la forte évaporation en saison sèche.

2.2.1.2. Deuxième plan factoriel

Dans le deuxième axe factoriel, on remarque une opposition entre d'une part NO_3^- , K^+ , Ca^{++} dans le pôle positif et d'autre part CO_3^{2-} , HCO_3^- et pH. Sur le plan des individus, les échantillons P7, P9, P10, P11, P12 présentent les eaux carbonatées (figure 25) et ce sont les eaux de la commune de Cheurfa. Ceci traduit probablement des phénomènes d'oxydo-réduction.

2.2. 2. Plans factoriels de la deuxième campagne

2.2.2.1. Premier plan factoriel

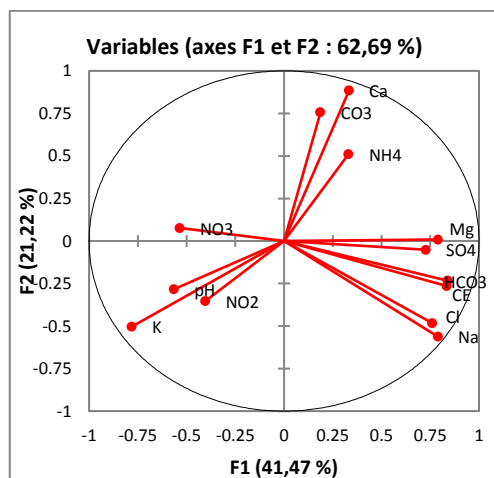


Figure 26: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (Mai 2014).

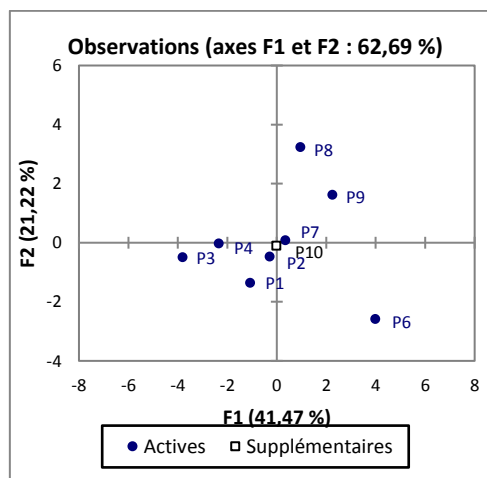


Figure 27: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (Mai 2014).

Le premier axe factoriel de cette campagne montre une opposition des principaux sels solubles qui sont : Cl^- , NH_4^+ , Mg^{++} , CE , CO_3^{2-} et HCO_3^- (figure 26), face aux ions nitrates (NO_3^-) dans le pôle négatif, sur le plan des individus, les échantillons P6, P9 et P8 présentent l'eau fortement minéralisée, ce sont les eaux de l'oued Meboudja et Cheurfa (figure 27).

2.2.2.2. Deuxième plan factoriel

Dans le deuxième axe factoriel, on remarque une opposition entre d'une part K^+ , Ca^{++} , NO_3^- dans le pôle positif et d'autre part Na , pH , CO_3^{2-} et HCO_3^- . Sur le plan des individus les échantillons P8, P9 (Est du lac) présentent les eaux carbonatées et ce sont les eaux de la commune de Cheurfa. Ceci est due aux phénomènes d'oxydo - réduction.

3. Classification hiérarchique ascendante (CHA)

Le dendrogramme de classification hiérarchique (méthode de Ward, distance Euclidienne) des eaux du lac Fetzara montre 04 groupes : le premier représente la classe des eaux à forte salinité (C1), ce sont les eaux de la région Sud-Est du lac, le deuxième groupe (C2) celui de salinité excessive situé au centre du lac, le troisième groupe (C3) les eaux à salinité moyenne caractérise le Nord-Est du lac et le quatrième groupe (C4), ce sont les eaux à forte salinité comme le premier groupe mais avec des teneurs en sulfates plus élevées, localisé dans le Sud du lac (figure 28).

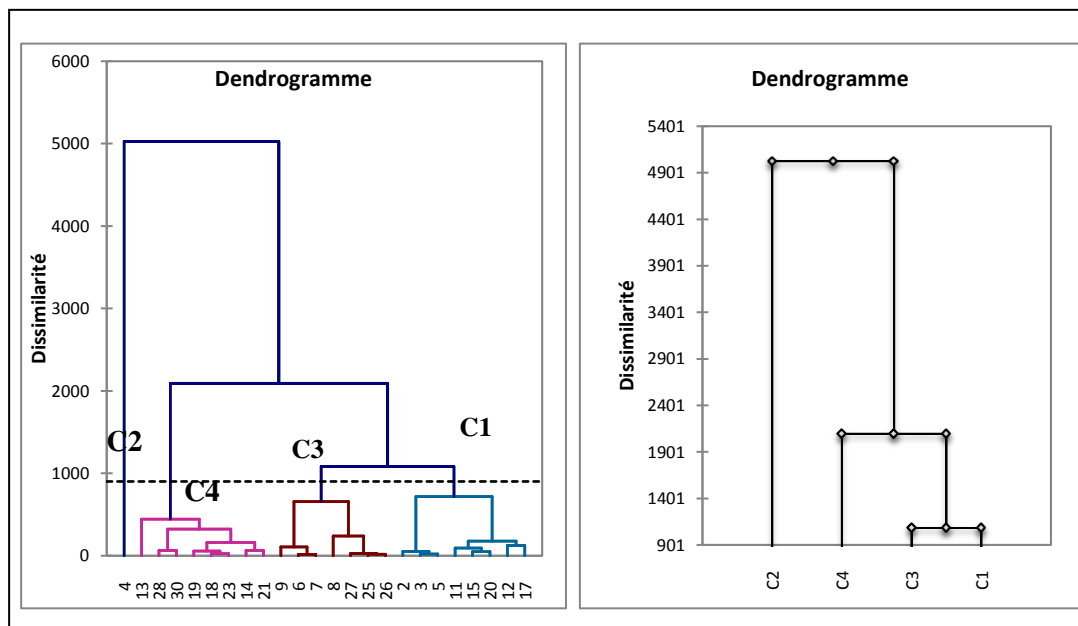


Figure 28: Dendrogramme de classification hiérarchique

Chapitre V :
Etude hydrochimique

Chapitre V : Etude hydrochimique

1. Faciès chimiques :

Pour déterminer le faciès chimique des eaux superficielles et souterraines du lac Fetzara, on utilise le diagramme de Piper, qui permet de comprendre le chimisme des eaux.

Deux diagrammes ont été réalisés pour les eaux de surface, un pour la période de Décembre 2013, et l'autre en Mai 2014. Les deux campagnes ont le même faciès chimique, qui est chloruré-sodique et potassique à sulfaté sodique, sauf quelques échantillons qui sont bicarbonatés sodiques et potassiques, c'est le cas de l'échantillon 17 dans la région de El-Eulma pour la première campagne et l'échantillon 11 de la région de Cheurfa (figure 29 et figure 30).

Les deux autres diagrammes représentent les eaux souterraines des deux campagnes (Décembre 2013 et Mai 2014), on remarque la dominance du faciès chimique chloruré sodique et potassique à sulfaté sodique sauf quelques échantillons de la deuxième campagne (7,9 et 13) de la région de Cheurfa qui sont bicarbonatés sodiques et potassiques (figure 31 et figure 32).

Les faciès chlorurés sodiques et potassiques sont fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple : halite (NaCl)) et les faciès bicarbonatés sodiques et potassiques se trouvent dans certains aquifères du bassin sédimentaire et témoignent l'interaction eau-roche (échange Ca^{++} contre Na^+ sur des argiles) (Bourhane , 2010).

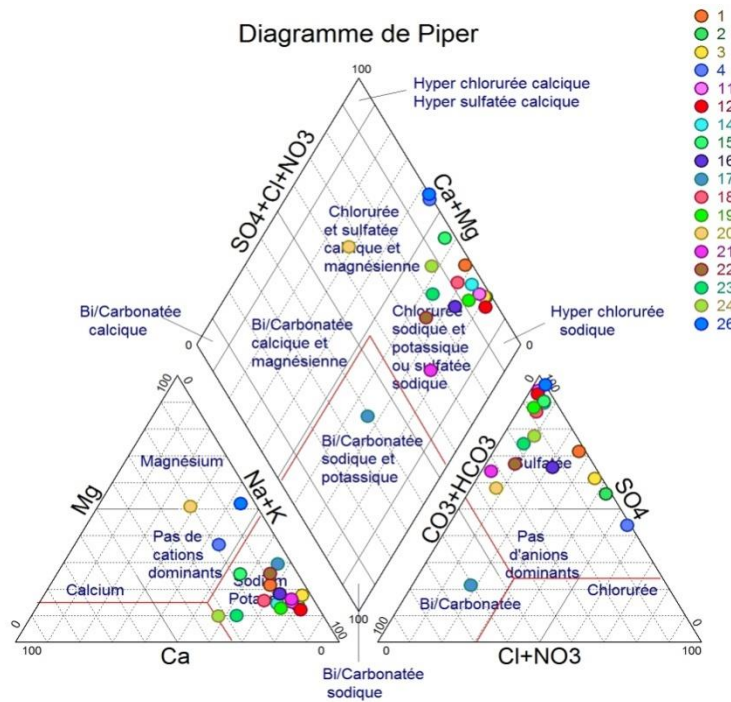


Figure 29: Diagramme de Piper des eaux de surface (Décembre 2013)

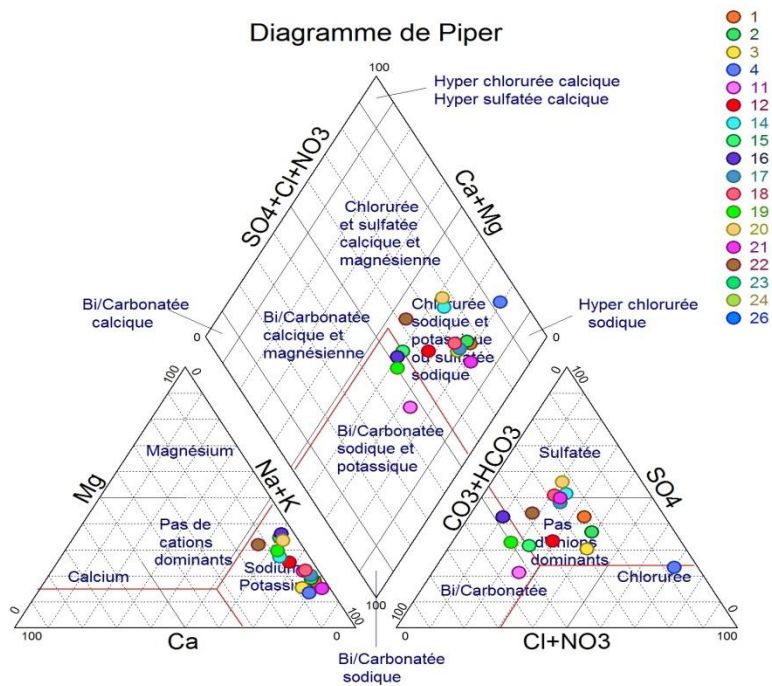


Figure 30: Diagramme de Piper des eaux de surface (Mai 2014)

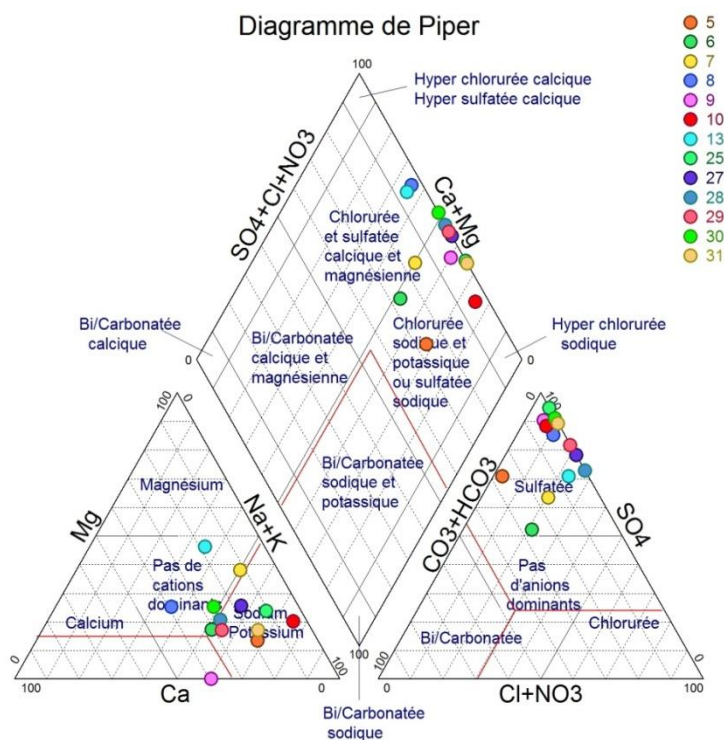


Figure 31: Diagramme de Piper des eaux souterraines (Décembre 2013)

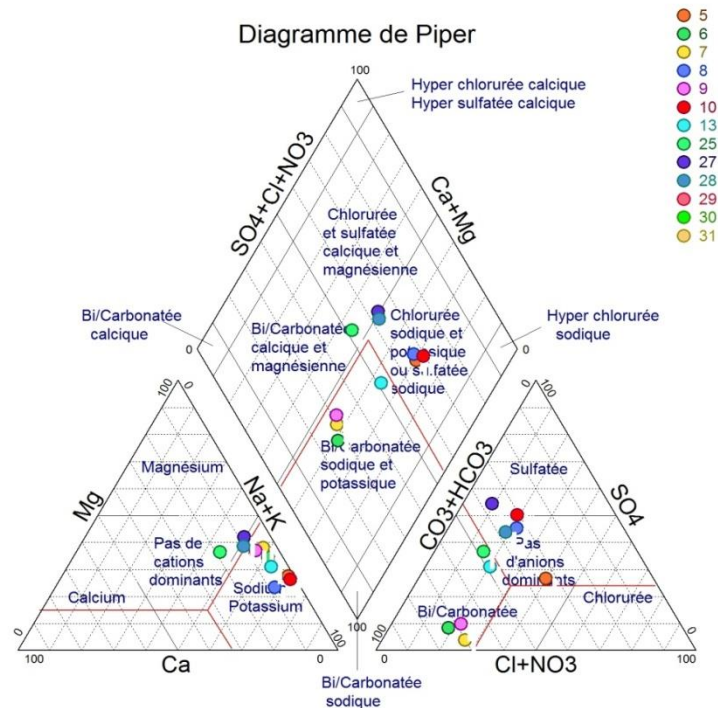


Figure 32: Diagramme de Piper des eaux souterraines (Mai 2014)

2. Etude des paramètres physico-chimiques :

Le lac Fetzara se situe en contre bas du massif de l'Edough, donc ce dernier alimente le lac à partir des eaux de ruissellement ; de plus, selon l'étude climatique, la saison humide s'étale plus que la saison sèche, donc le contact eau-roche est presque permanent ce qui conduit à l'accélération de la dilution, entraînant l'enrichissement des eaux par certains éléments chimiques.

Les eaux issues du massif de l'Edough sont riches en potassium, ce qui laisse supposer que cet élément provient du massif. Sa présence dans l'eau est engendrée par l'hydrolyse des roches (Zenati, 1990 ; Majour, 1996 et 2010 ; Habes 2006 et 2013).

- Il est admis d'après l'altération et la mise en solution des silicates conduit en premier lieu à enrichir l'eau en cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et en silice. Cette réaction consomme de l'acide et s'accompagne d'une augmentation du pH avec production du bicarbonate (Appelo et Postma, 1993).

Mécanismes de l'altération de différents minéraux silicatés en kaolinite :

- Albite + 2H^+ + $9\text{H}_2\text{O}$ \longleftrightarrow Kaolinite + 2Na^+ + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$
- K- feldspath + 2H^+ + $9\text{H}_2\text{O}$ \longleftrightarrow Kaolinite + 2K^+ + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$
- Anorthite + 2H^+ + H_2O \longleftrightarrow Kaolinite + Ca^{2+}
- Pyroxene + 3H^+ + $1.1 \text{H}_2\text{O}$ \longleftrightarrow 3 Kaolinite + Ca^{2+} + 7Mg^{2+} + $1.1 \text{H}_4\text{SiO}_4$
- Biotite + 10H^+ + 5O_2 + $7\text{H}_2\text{O}$ \longleftrightarrow Kaolinite + 2k^+ + 7Mg^{2+} + $2\text{Fe}(\text{OH})_3$ + $4\text{H}_4\text{SiO}_4$



Il y a libération de Na, K, Ca, Mg, ces réactions se produisent lors des précipitations, par ailleurs la discontinuité des pluies conduit à une forte évapotranspiration, ce qui entraîne un accroissement de la minéralisation des eaux.

2.1. La conductivité électrique

Tableau 27: Echelle de salinité des eaux (d'après USSL, 1954)

Classes	Qualité	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C)
C1	Eaux non salines	CE < 250
C2	Eaux à salinité moyenne	250 < CE < 750
C3	Eaux à forte salinité	750 < CE < 2250
C4	Eaux à très forte salinité	2250 < CE < 5000
C5	Eaux à salinité excessive	5000 < CE < 20000

2.1.1 Les eaux de surface

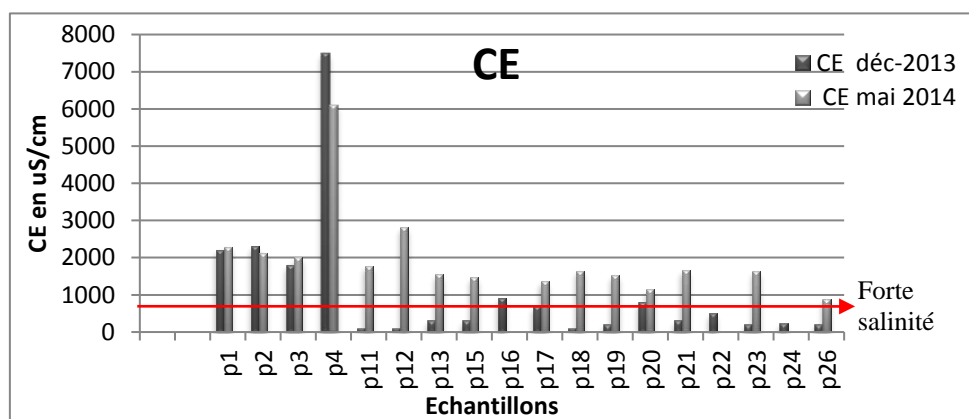


Figure 33: Variations de la conductivité électrique des eaux de surface.

Les résultats des analyses montrent que les valeurs de la conductivité électrique dans la deuxième campagne c'est-à-dire en période humide sont plus élevées que ceux de la première campagne (période sèche) (figure 33), ces valeurs arrivent jusqu'à 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la première campagne, donc une très forte salinité (tableau 27). Par contre dans la deuxième campagne la majorité des valeurs de la conductivité électrique sont presque inférieures à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sauf quelques points comme P1, P2, P3 et P4 qui arrivent jusqu'à 7500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce sont des points situés à l'exutoire du lac, au niveau du canal principal et l'oued Meboudja, liés aux apports plus riches en éléments salifères, dûs à l'effet de l'évaporation au niveau du lac. Les eaux du lac Fetzara sont plus salées en période humide, car les eaux sont plus chargées en sels dissous issus des précipitations durant la période humide.

2.1.2 Les eaux souterraines

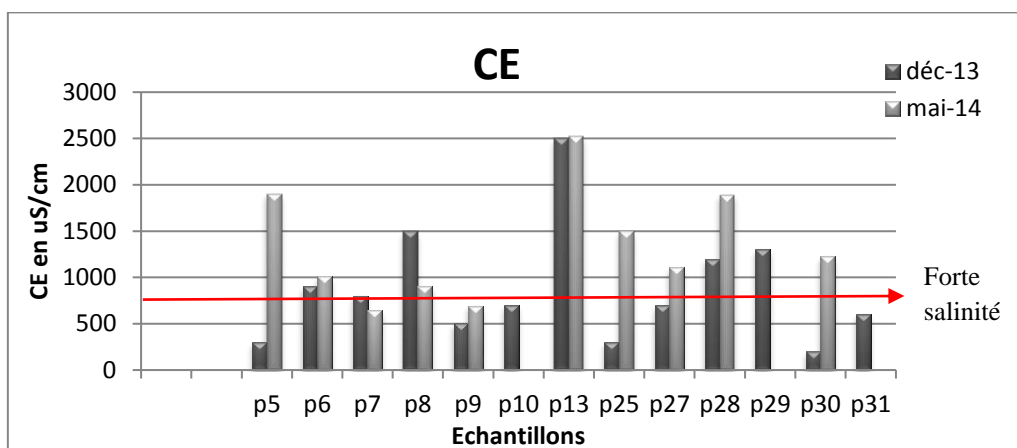


Figure 34: Variations de la conductivité électrique des eaux souterraines.

La conductivité électrique varie entre 200 à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les deux campagnes, les eaux souterraines sont moins salées que ceux des eaux de surface, puisque elles sont moins exposées aux facteurs climatiques. L'échantillon P13 représente la valeur la plus élevée qui est 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, c'est un puits non construit donc exposé aux facteurs climatiques (figure 34).

2.2.L'acidité (pH)

Le pH indique la concentration en ions H^+ présents dans l'eau. La réaction d'hydratation du CO_2 libère de l'acide carbonique qui attaque les roches. L'altération des minéraux conduit à une consommation de CO_2 et induit par conséquent une augmentation du pH (Ahmed Salem , 2012)

Le pH résume l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique, il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Azzaoui ,1999 ; El Blidi et al, 2003). Le système carbonate doit théoriquement jouer un rôle dominant dans le changement du pH de l'eau (Groleau et al , 2008).

2.2.1 Les eaux de surface

Le potentiel d'hydrogène varie pour la première campagne entre 7.15 et 7.34, alors pour la deuxième campagne les valeurs passent de 7.15 à 9.54. Le pH des eaux de la deuxième campagne est plus basique que celui de la première campagne en raison du chargement des eaux en sels dissous et surtout les ions carbonatés (figure 35). C'est toujours l'échantillon P4 qui présente la valeur la plus forte 9.54, c'est un canal secondaire très proche du lac, c'est-à-dire le plus touché par le phénomène d'évaporation au niveau du lac.

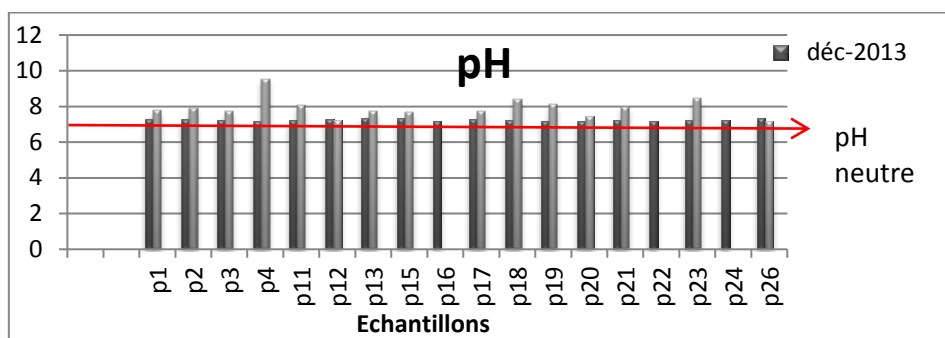


Figure 35: Variations du pH des eaux de surface.

2.2.2 Les eaux souterraines

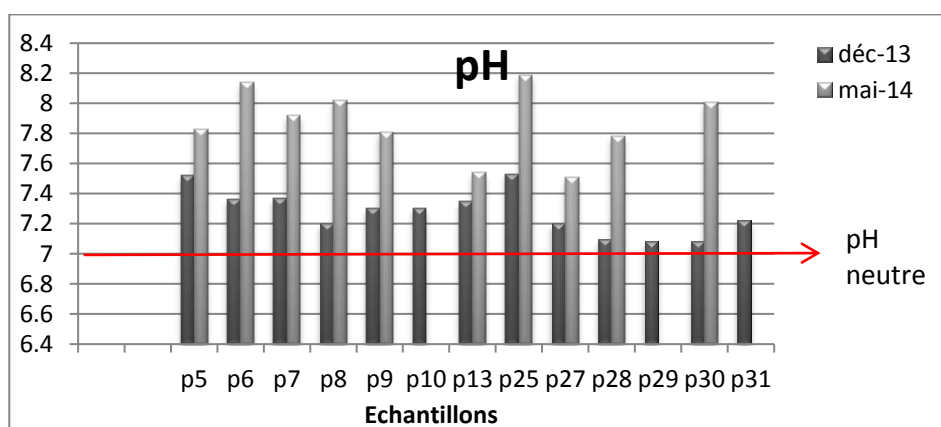


Figure 36: Variations du pH des eaux souterraines.

Les eaux de la deuxième campagne ont un pH plus élevé qui varie entre 7.51 à 8.19, par rapport à ceux de la première campagne qui sont compris entre 7.08 et 7.52 (figure 36). Les eaux souterraines de la deuxième campagne sont plus basiques que ceux de la première campagne, la valeur la plus forte est celle de l'échantillon P25, puits situé près de oued Zièd, ceci est dû aux facteurs climatiques, surtout les pluies permettant la dilution des eaux.

2.3. Les anions :

2.3.1 Les chlorures (Cl⁻)

Le chlore se dissout lorsqu'il est mélangé à l'eau. Il peut aussi s'extraire de l'eau et se retrouver dans l'air sous certaines conditions. La plupart des rejets directs de chlore dans l'environnement se font dans l'air et les eaux de surface. Une fois dans l'air ou dans l'eau, le chlore réagit avec d'autres produits chimiques. Ils se combinent avec des éléments inorganiques pour former des sels de chlorure, et avec des composés organiques pour former des produits organiques chlorés. Du fait de sa réactivité, les chlorures ne sont pas susceptibles de se déplacer dans le sol et de pénétrer dans les eaux souterraines.

2.3.1.1 Les eaux de surface

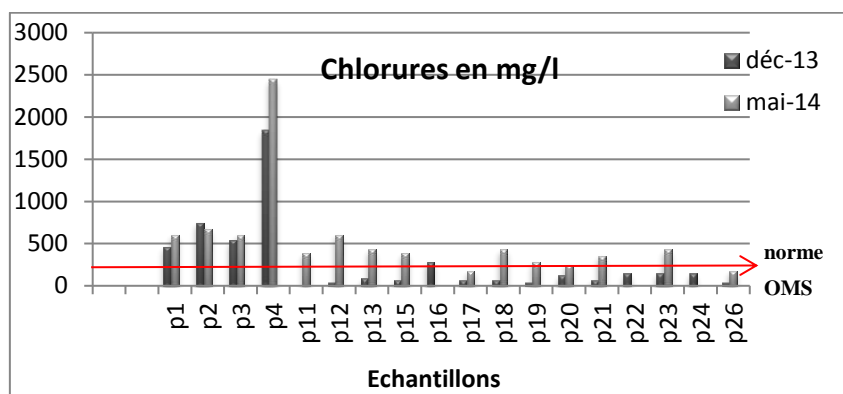


Figure 37: Variations des teneurs en chlorures des eaux de surface.

Les concentrations des eaux de surface en chlorures varient entre 35.45 et 1843.4 mg/l avec une moyenne de 271.78 mg/l pour la première campagne, et pour la deuxième campagne entre 177.25 à 2446.05mg/l avec une moyenne de 456.91mg/l. Les eaux pendant la période humide sont plus chargées en chlorures, le point P4 qui présente la valeur la plus élevée : 2446.05mg/l (figure 37) due à l'évaporation au niveau du lac. La présence des chlorures dans ces eaux peut être liée à la pollution provenant des rejets urbains et industriels et à l'existence de forts apports salifères du lac.

2.3.1.2. Les eaux souterraines

Les valeurs en chlorures des eaux souterraines pour la première campagne comprennent entre 35.45 et 496.3mg/l avec une moyenne de 155.43mg/l, et passent dans la deuxième campagne à 70.9 - 638.1mg/l avec une moyenne de 193.61mg/. La deuxième campagne présente les concentrations les plus élevées, car les eaux de pluie pénètrent le sol et arrivent aux eaux souterraines pour les charger en sels minéraux (figure 38).

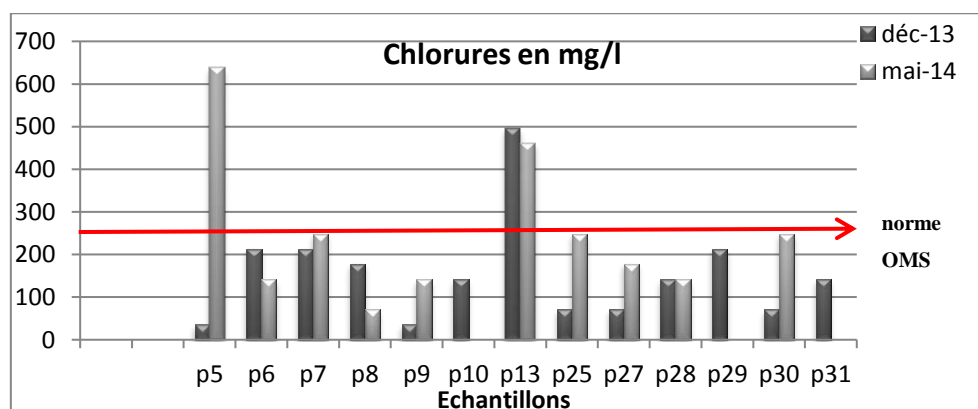


Figure 38: Variations des teneurs en chlorures des eaux souterraines.

2.3.2 Les sulfates (SO₄⁻)

Les sulfates (SO₄⁻) peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfatés est l'oxydation des minerais de sulfites, la présence de schistes, ou de déchets industriels. Le sulfate est un des éléments majeurs des composés dissous dans l'eau de pluie.

Le niveau maximum de sulfates suggéré par l'OMS (1993) dans les lignes directrices de la qualité demandée pour l'eau destinée à la consommation, est de 500 mg/l. Les normes de l'UE (1998) qui sont plus récentes, complètes et strictes que les normes de l'OMS suggérant un maximum de 250 mg/l en sulfates dans l'eau destinée à la consommation humaine. Certains sols et certaines roches contiennent des minéraux de sulfates.

2.3.2.1 Les eaux de surface

Les teneurs en sulfates pour la première campagne varient entre 152.25 et 2738.67mg/l avec une moyenne de 1973.12mg/l, et entre 596.05 à 1938.01mg/l avec une moyenne de 1044.59mg/l pour la deuxième campagne, c'est durant la première campagne que les valeurs restent les plus élevées (figure 39), où elles atteignent jusqu'à 2738.67mg/l en P4 avec les P21, P23 et P26 dans la région de Berrahal, où l'activité industrielle est intense.

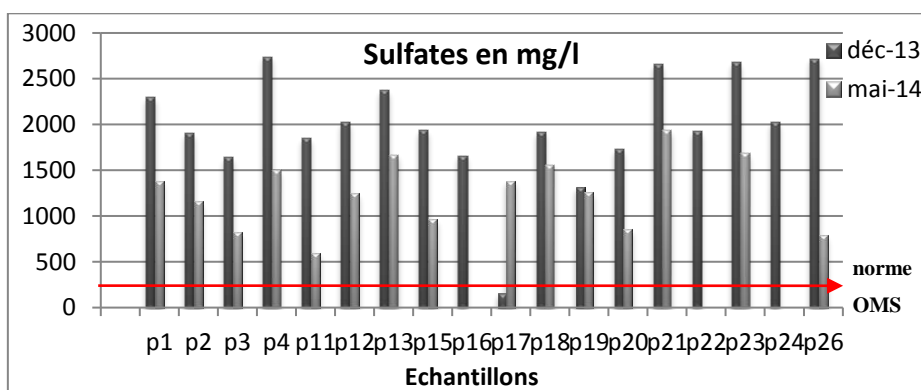


Figure 39: Variations des teneurs en sulfates des eaux de surface.

2.3.2.2 Les eaux souterraines

Les sulfates montent jusqu'à 3268.44mg/l avec une moyenne de 2011.16mg/l pour la première campagne, et restent entre 66.28 à 2221.38mg/l avec une moyenne de 690.48mg/l. Les teneurs sont considérées plus importantes par rapport aux eaux de surface (figure 40), ceci est dû aux formations géologiques, qui fournissent cet élément à partir des argiles, des marnes et du gypse.

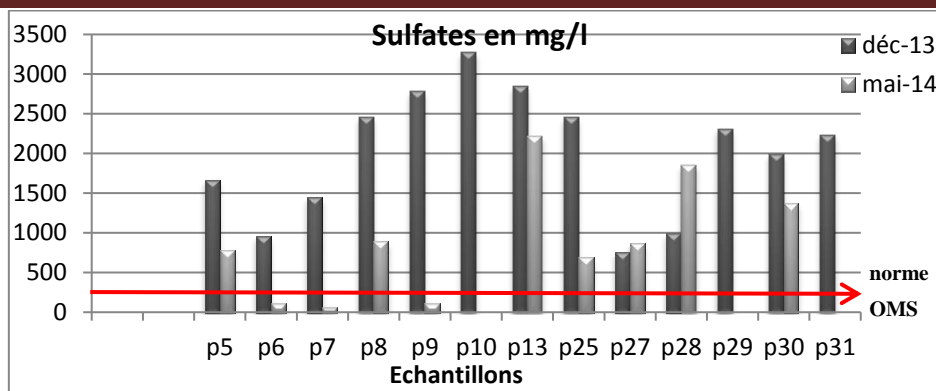


Figure 40: Variations des teneurs en sulfates des eaux souterraines.

2.3.3 Les carbonates (CO₃²⁻)

Les ions carbonates et bicarbonates combinés au calcium ou au magnésium précipiteront sous forme de carbonate de calcium (CaCO₃) ou carbonate de magnésium (MgCO₃) dans des conditions de sécheresse.

Lorsque la concentration en Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ décroît, la teneur en Na⁺ et le SAR deviennent plus importants. Ceci causera un effet d'alcalisation et augmentera le pH. Par conséquent, lorsqu'une analyse d'eau indique un pH élevé, ceci peut être un signe d'une teneur élevée en ions carbonates et bicarbonates (Fekrache, 2015).

2.3.3.1. Les eaux de surface

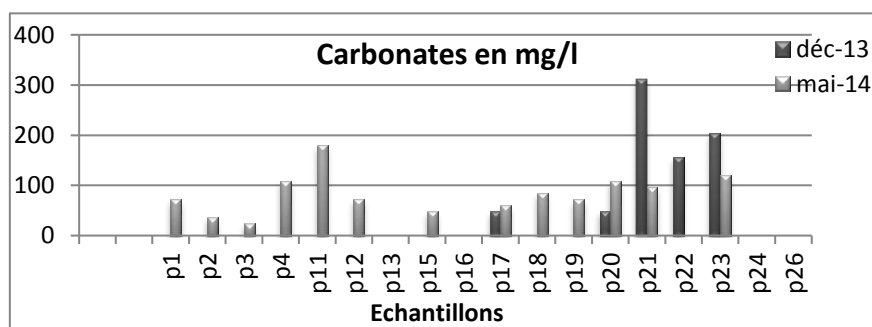


Figure 41: Variations des teneurs en carbonates des eaux de surface.

Les teneurs en carbonates dans la première campagne sont comprises entre 0 et 312 mg/l avec une moyenne de 42.66 mg/l ; dans la deuxième campagne entre 0-180 mg/l avec une moyenne de 60mg/l (figure 41). C'est dans la saison hivernale que les concentrations restent les plus élevées.

2.3.3.2 Les eaux souterraines

Durant la première campagne, les concentrations en carbonates restent comprises entre 0 et 84 mg/l avec une moyenne de 16.61mg/l. Pendant la deuxième campagne c'est entre 48.144mg/l et 142 mg/l avec une moyenne de 71.07mg/l (figure 42). Les valeurs pendant la deuxième

campagne marquent une avance par rapport à ceux de la première campagne, où la valeur la plus élevée est celle du point P28 dans la région d'El Gantra.

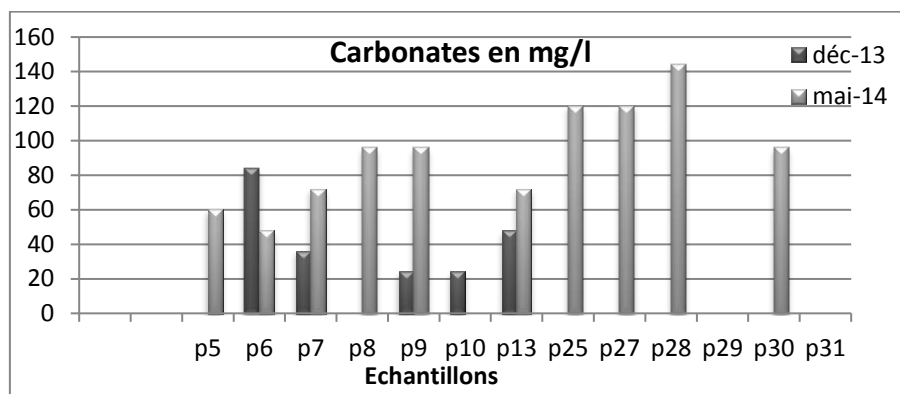


Figure 42: Variations des teneurs en carbonates des eaux souterraines.

2.3.4 Les bicarbonates (HCO_3^-)

2.3.4.1 Les eaux de surface

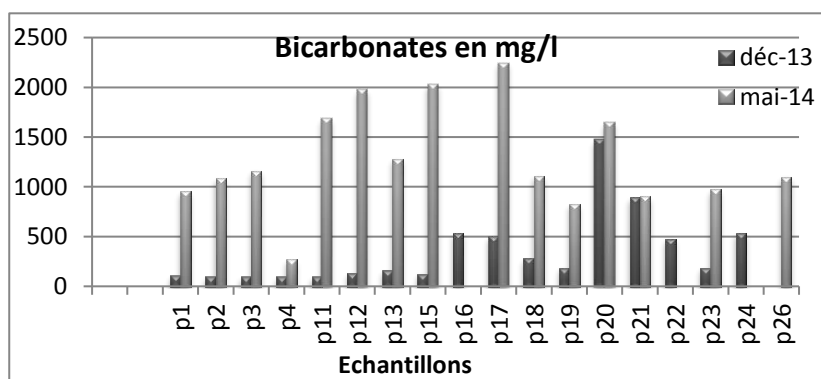


Figure 43: Variations des teneurs en bicarbonates des eaux de surface.

La première campagne indique des valeurs en bicarbonates entre 97.6 à 1476.2 mg/l, la moyenne est de 322.11mg/l ; par contre dans la deuxième campagne elles sont entre 268.4 à 2244.8 mg/l avec une moyenne de 1068.85mg/l (figure 43). Ces résultats confirment ceux des carbonates. La présence de cet élément dans ces eaux est liée à la dissolution des cipolins de djebel Edough.

2.3.4.2 Les eaux souterraines

Dans les eaux souterraines et durant la campagne de décembre 2013, les concentrations en bicarbonates varient de 0 à 1012.6 mg/l avec une moyenne de 190.50 (figure 44). Dans la campagne de Mai 2014, ces concentrations montent jusqu'à 1903.2 mg/l particulièrement dans le point P13 avec une moyenne de 1038.87mg/l, ceci est dû à la dissolution accentuée avec les précipitations durant la période humide.

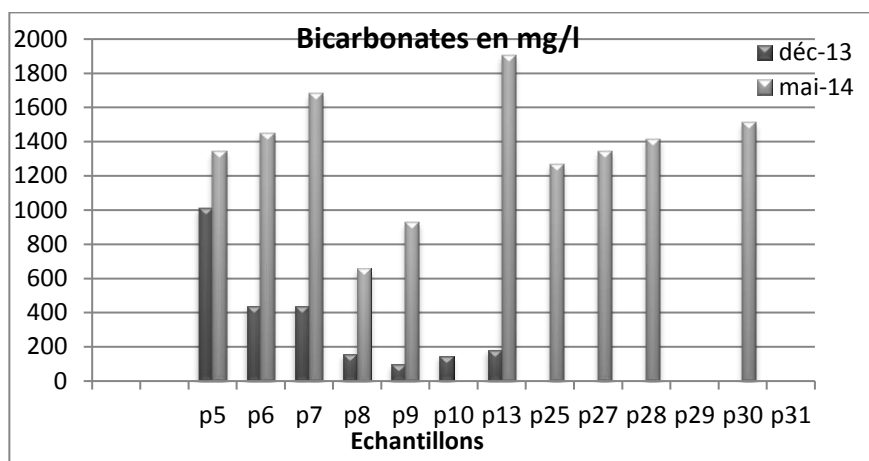


Figure 44: Variations des teneurs en bicarbonates des eaux souterraines.

2.3.5 Les nitrites (NO₂⁻)

2.3.5.1 Les eaux de surface

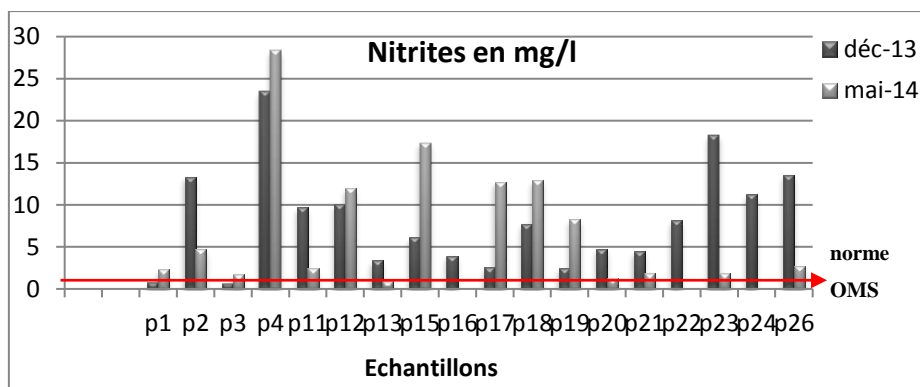


Figure 45: Variations des teneurs en nitrites des eaux de surface.

Les concentrations des nitrites dans les eaux de surface du lac Fetzara varient de 0.59 et 23.57mg/l avec une moyenne de 8.02 mg/l pour la première campagne, et 0.87 à 8.33mg/l avec une moyenne de 6.18mg/l, la deuxième campagne présente des valeurs plus faibles en raison de l'assimilation de l'azote par la végétation en période hivernale. La valeur la plus importante est signalée dans l'échantillon P4 dans la région d'El Gantra, c'est le plus touché par le phénomène d'évaporation au niveau du lac (figure 45).

2.3.5.2 Les eaux souterraines

Pour les eaux souterraines, la première campagne présente des valeurs entre 0.27 et 11.86 mg/l d'une moyenne de 4.15mg/l, pour la deuxième campagne elles sont entre 0.64 à 19.8 mg/l avec une moyenne de 3.05 mg/l, c'est le point P8 qui marque la valeur la plus élevée dans la région de Cheurfa, au Sud du lac qui est une zone agricole (figure 46).

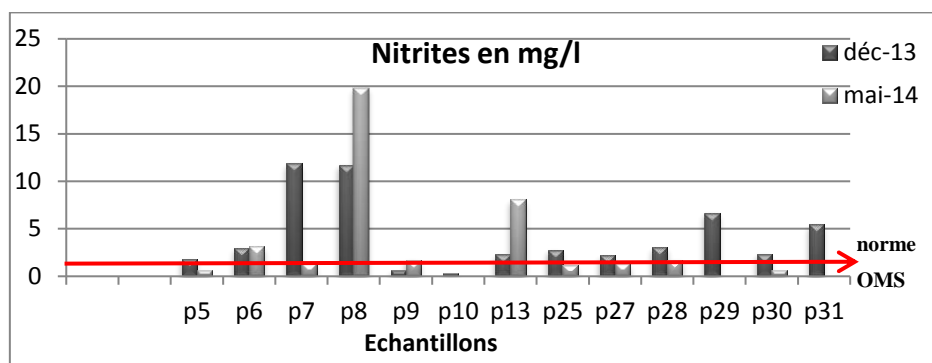


Figure 46: Variations des teneurs en nitrites des eaux souterraines.

2.3.6 Les nitrates (NO_3^-)

2.3.6.1 Les eaux de surface

Les valeurs des nitrates dans la première campagne sont plus élevées, elles varient entre 0 et 162.81 mg/l avec une moyenne de 29.49mg/l. Par contre dans la deuxième campagne les valeurs restent entre 0 et 116.18 mg/ avec une moyenne de 6.45mg/l, donc elles sont plus faibles, car c'est au printemps que l'assimilation de l'azote par les plantes est la plus importante, parce que c'est la période de floraison. La valeur la plus importante est enregistrée au niveau de l'échantillon P2 dans région d'El Gantra durant la saison sèche (figure 47).

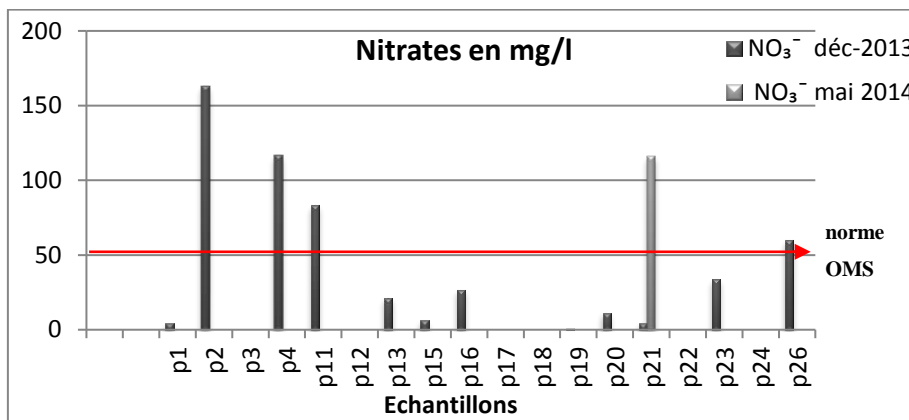


Figure 47: Variations des teneurs en nitrates des eaux de surface.

2.3.6.2 Les eaux souterraines

Pour les eaux souterraines les concentrations étaient plus élevées durant la première campagne avec une moyenne de 81.01mg/l, que celles pendant la deuxième campagne avec une moyenne de 67.55mg/l (figure 48).

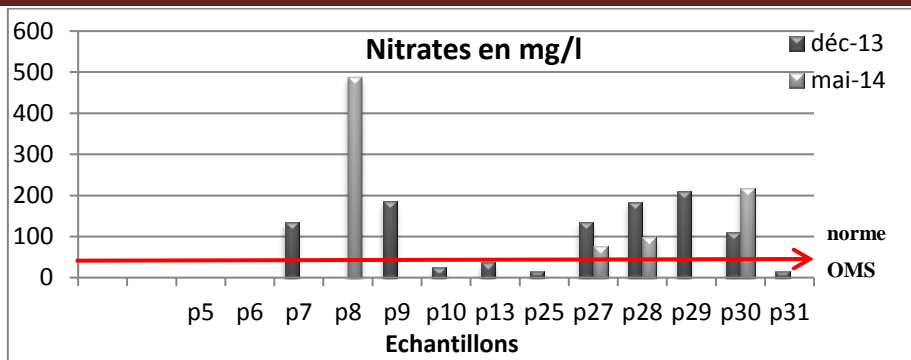


Figure 48: Variations des teneurs en nitrates des eaux souterraines.

2.4. Les cations :

2.4.1 Le calcium (Ca⁺⁺)

C'est le troisième élément minéral le plus abondant sur la croûte terrestre. Les composants du calcium constituent 3.64% de la croûte terrestre. Il est moins réactif chimiquement que les métaux alcalins et alcalino-terreux. La distribution du calcium est large, il se trouve quasiment dans toutes les surfaces terrestres du monde. Cet élément est essentiel pour la vie des plantes et des animaux.

2.4.1.1 Les eaux de surface

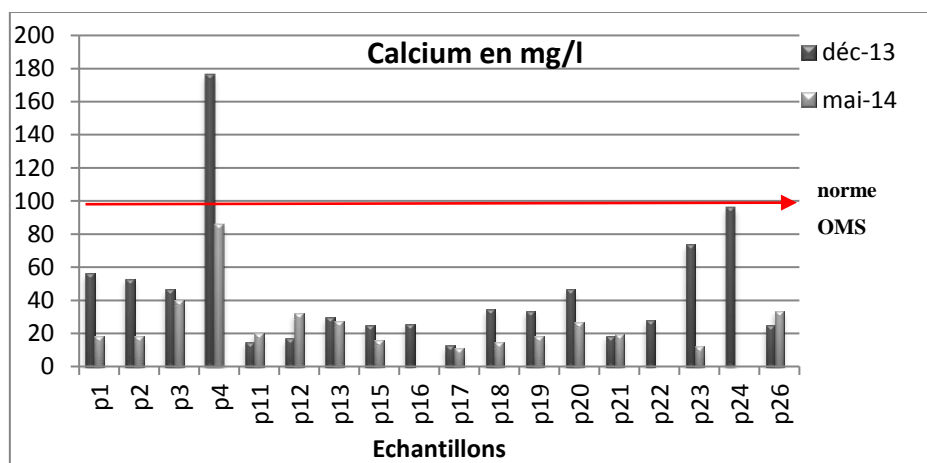


Figure 49: Variations des teneurs en calcium des eaux de surface.

Les teneurs en calcium varient entre 12.82 et 176.35 mg/l avec 45.11 mg/l de moyenne pour la première campagne, et entre 11.22 à 85.77 mg/l avec une moyenne de 21.86 mg/l concernant la deuxième campagne. Nous pourrions dire que les concentrations sont élevées durant la deuxième campagne, ceci est dû certainement aux apports des sels par les pluies (figure 49).

2.4.1.2 Les eaux souterraines

Les teneurs en calcium dans les eaux souterraines du lac varient de 14.82 à 117.83 mg/l avec une moyenne de 62.67 mg/l en décembre 2013, et reste entre 8.01 et 44.08 mg/l (figure 50), et

16.21mg/l de moyenne en Mai 2014, donc les concentrations sont beaucoup plus importantes durant la période sèche.

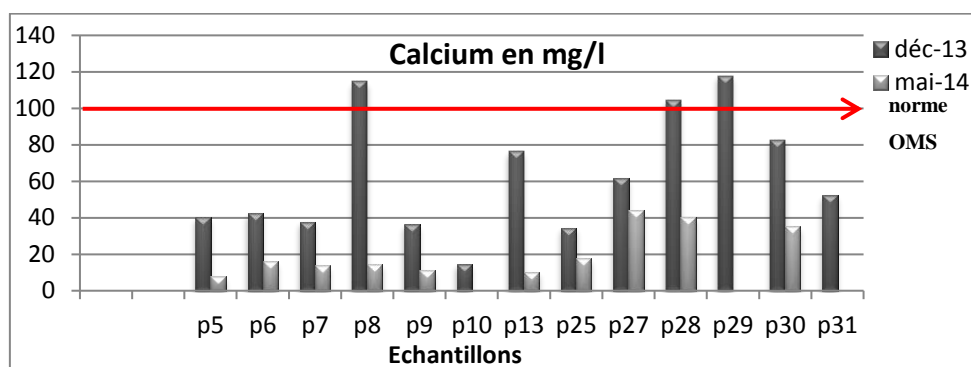


Figure 50: Variations des teneurs en calcium des eaux souterraines.

2.4.2 Le magnésium (Mg⁺⁺)

Il est très abondant dans la nature, il se trouve en quantités importantes dans beaucoup de minerais rocheux, comme la dolomite, la magnétite, l'olivine et la serpentine. Il se trouve également dans l'eau de mer, les saumures souterraines et les couches salées. Le magnésium est très chimiquement actif, il remplace l'hydrogène dans l'eau bouillante et un grand nombre de métaux peuvent être produits par la réduction thermique des sels et formes oxydées du magnésium. Il réagit avec la plupart des non-métaux et presque chaque acide.

2.4.2.1 Les eaux de surface

Le magnésium présente une variation des teneurs entre 10.20 -126.36 mg/l, la moyenne est de 37.73mg/l en décembre 2013 et une variation entre 28.67- 61.72 mg/l ; la moyenne est de 32.18mg/l en mai 2014. C'est pendant la première campagne où les concentrations sont les plus élevées (figure 51).

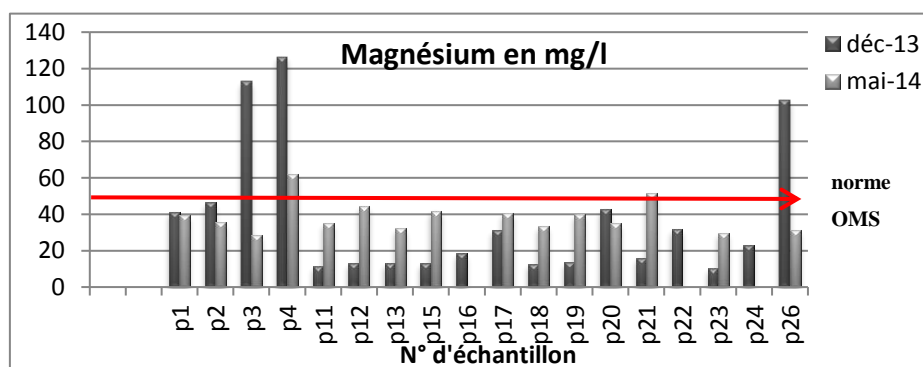


Figure 51: Variations des teneurs en magnésium des eaux de surface.

2.4.2.2 Les eaux souterraines

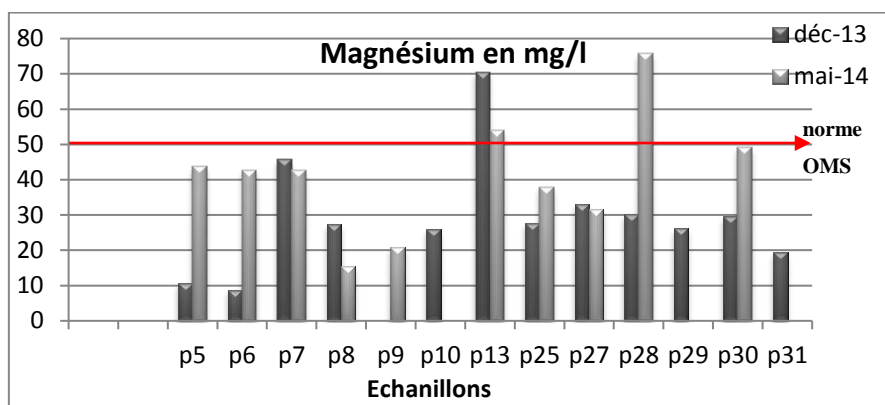


Figure 52: Variations des teneurs en magnésium des eaux souterraines.

Pour les eaux souterraines, c'est l'inverse où les concentrations sont les plus élevées pendant la deuxième campagne avec 31.85 mg/l ; par contre elles sont de 27.30 mg/l dans la première campagne (figure 52).

2.4.3 Le sodium (Na⁺)

Le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, qui contient 2.83% de sodium sous toutes ses formes. Le sodium est, après le chlore, le deuxième élément le plus abondant dissous dans l'eau de mer. Les sels de sodium les plus importants trouvés dans la nature sont le chlorure de sodium (sel de roche), le carbonate de sodium (soude), le nitrate de sodium et le sulfate de sodium. Les sels de sodium sont trouvés dans l'eau de mer, les lacs salés, les lacs alcalins et dans l'eau de source minérale. Ce produit chimique n'est pas mobile dans sa forme solide, bien qu'il absorbe l'humidité très facilement. Une fois sous forme liquide, l'hydroxyde de sodium pénètre rapidement dans le sol sous forme de lixiviation, souillant probablement des sources d'eau.

2.4.3.1 Les eaux de surface

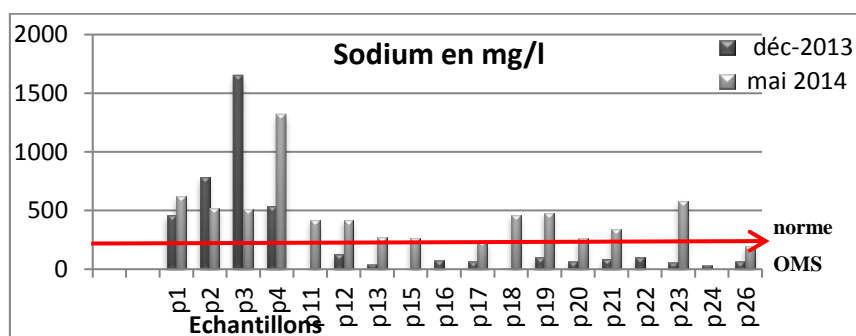


Figure 53: Variations des teneurs en sodium des eaux de surface.

durant la deuxième campagne, les concentrations en sodium sont plus importantes avec une moyenne de 382.70 mg/l. Dans la première campagne, elle est de 236.96 mg/l, la valeur la plus

importante est signalée dans le point P3 dans la région d'El Gantra avec 1319.97 mg/l (figure 53), ceci est dû à la dissolution rapide des formations évaporitiques telle que l'halite (NaCl) (Débieche, 2002) et aux apports salifères du lac Fetzara par l'effet de l'évaporation (Zenati, 1999).

2.4.3.2 Les eaux souterraines

Même remarque pour les eaux souterraine où la deuxième campagne signale une différence importante avec une moyenne de 205.31 mg/l, pour seulement 60.70 mg/l dans la première campagne (figure 54).

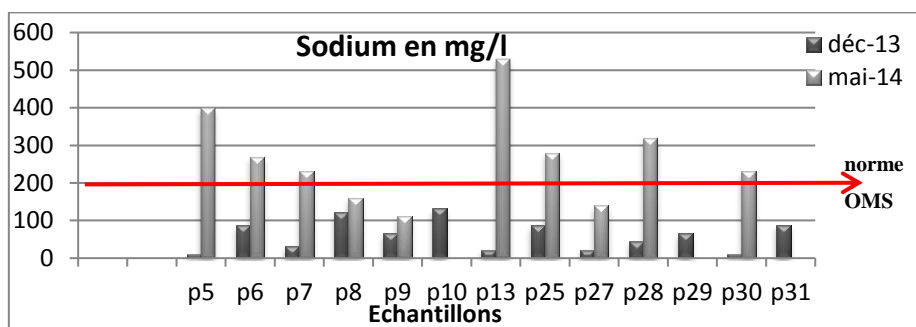


Figure 54: Variations des teneurs en sodium des eaux souterraines.

2.4.4 Le potassium (K⁺)

En même temps que l'azote, le potassium est un des macro minéraux essentiels pour la survie des plantes. Si le niveau de potassium est trop bas, on peut mettre en évidence ses différents symptômes, la croissance des plantes est restreinte, la floraison est réduite et on observe un abaissement des rendements. Les niveaux hydrosolubles élevés de potassium peuvent gêner la germination des jeunes plantes, empêcher l'absorption d'autres minéraux et réduire la qualité de la récolte.

2.4.4.1 Les eaux de surface

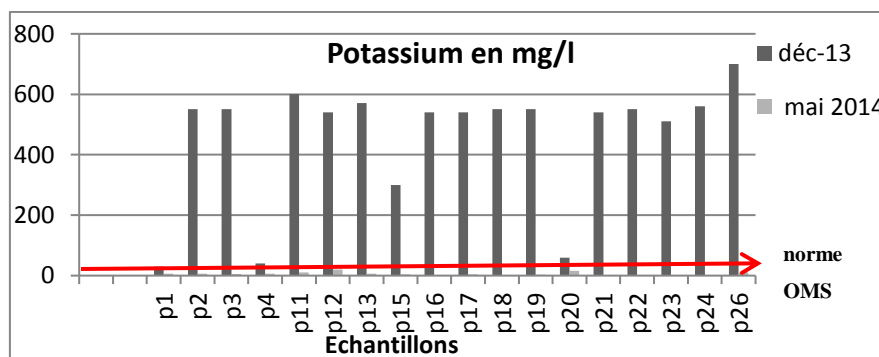


Figure 55: Variations des teneurs en potassium des eaux de surface.

Les teneurs en potassium en première campagne sont plus importantes que la deuxième campagne. En décembre 2013 les valeurs varient de 29.71 à 600.57 mg/l avec 460.33 mg/l de moyenne ; mais en mai 2014 elles sont très faibles, entre 1.17 à 19.94 mg/l, pour une

moyenne de 5.75 mg/l (figure 55). La présence de cet élément dans les eaux de surface est liée aux rejets urbains et industriels dans le lac et aux échanges de bases avec les formations argileuses riches en potassium.

2.4.4.2 Les eaux souterraines

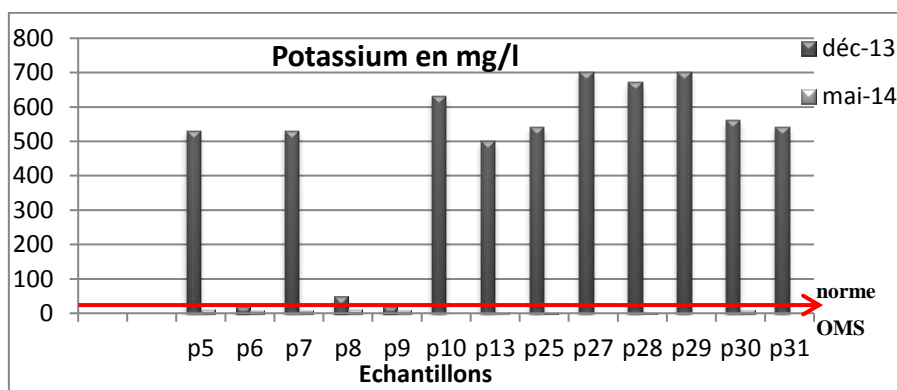


Figure 56: Variations des teneurs en potassium des eaux souterraines.

Le potassium présente de faibles teneurs dans la deuxième campagne avec une moyenne de 5.29 mg/l, il est de 461.07 mg/l dans la première campagne, ceci est dû à la fixation du K^+ par les minéraux argileux (figure 56).

2.4.5 L'ammonium (NH_4^+)

2.4.5.1 Les eaux de surface

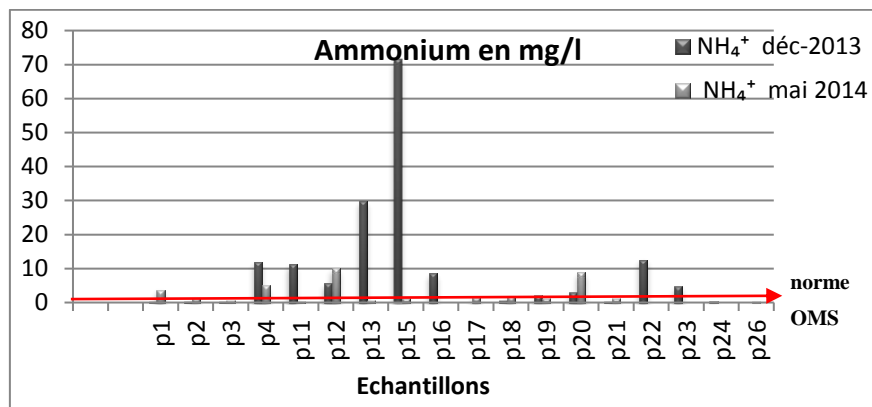


Figure 57: Variations des teneurs en ammonium des eaux de surface.

Dans la première campagne les valeurs varient de 0.05 à 71.49 mg/l, et dans la deuxième campagne de 0 à 9.88 mg/l, la moyenne est de 9.06 mg/l en décembre 2013 et 2.10 mg/l en mai 2014. C'est la première campagne qui présente les concentrations les plus importantes (figure 57), la deuxième campagne présente les valeurs les plus faibles, ceci est dû aux phénomènes d'assimilation par les plantes (Curie, 2006).

2.4.5.2 Les eaux souterraines

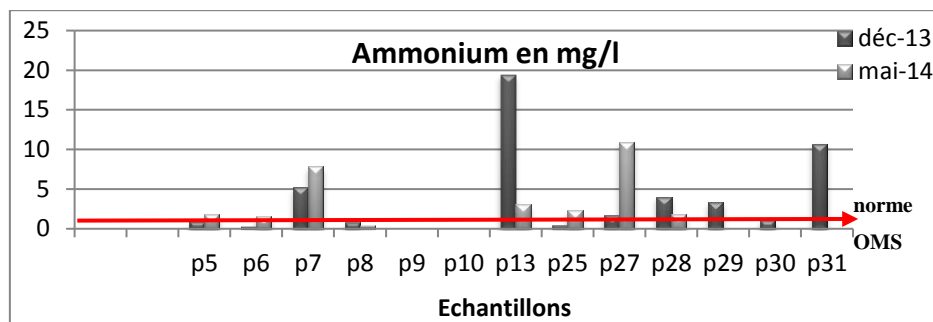


Figure 58: Variations des teneurs en ammonium des eaux souterraines.

Dans les eaux souterraines, Les ions ammonium présentent des teneurs faibles dans la deuxième campagne avec une moyenne de 2.29 mg/l, ils arrivent à 3.69mg/l dans la première campagne (figure 58).

3. Rapports caractéristiques

- Na^+/K^+

Le rapport Na^+/K^+ est de l'ordre de 47 pour l'eau de mer et inférieur à 10 pour les eaux de pluie (Alayat et al, 2007). Ce rapport partage les eaux du lac en deux groupes ; le premier groupe avec un rapport supérieur à 47, représente la majorité des échantillons, et le deuxième groupe avec des rapports Na^+/K^+ compris entre 10 et 47, donc une qualité intermédiaire entre l'eau douce et l'eau de mer (figure 59).

- Na^+/Cl^-

Le rapport Na^+/Cl^- permet de classer les eaux du lac en un seul groupe ; les points montrent des rapports Na^+/Cl^- voisins de 1 et des indices d'échange de bases (IEB) très faibles (tableau 28), ce qui plaide en faveur d'une dissolution de l'halite (figure 60).

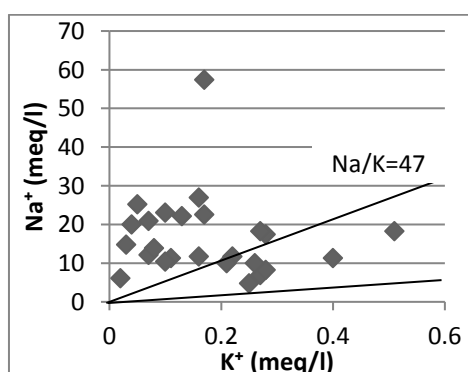


Figure 59 : Rapport Na^+/K^+

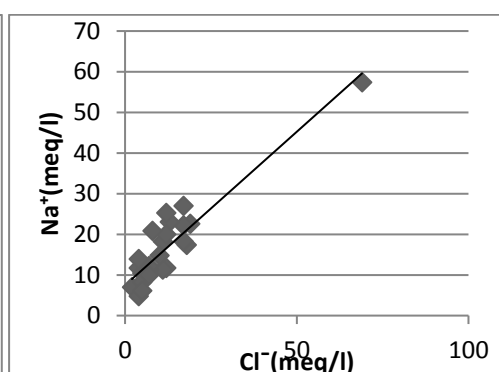


Figure 60 : Rapport Na^+/Cl^-

Tableau 28: Rapport Na^+/Cl^- , indices d'échange de base (IEB) et indice de saturation (IS)

Echantillons	Na^+/Cl^-	IEB	IS calcite	IS dolomite
1	1.58	-0.59	0.12	0.9
2	1.18	-0.19	0.35	1.32
3	1.30	-0.31	0.56	1.32
4	0.83	-0.16	1.6	3.41
5	0.96	0.018	0.04	1.16
6	2.93	-1.98	0.81	2.41
7	1.42	-0.45	0.59	2.04
8	3.47	-2.61	0.2	0.77
9	1.19	-0.25	0.22	1.07
11	1.66	-0.68	-0.78	2.15
12	1.07	-0.10	0.13	0.73
13	1.77	-0.78	-0.16	0.73
14	0.97	0.009	0.37	1.14
15	1.02	-0.038	0.34	1.43
17	2.08	-1.10	0.19	1.27
18	1.66	-0.67	0.63	1.96
19	2.60	-1.61	0.43	1.53
20	1.61	-0.67	0.24	0.94
21	1.47	-0.48	0.26	1.28
23	2.10	-1.10	0.56	1.84
25	1.73	-0.74	0.73	2.14
26	1.65	-0.70	-0.006	0.18
27	1.21	-0.22	0.48	1.14
28	3.47	-2.49	0.59	1.79
30	1.42	-0.46	0.83	2.14

• $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ et $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$

Toutes les eaux du lac présentent un rapport $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ inférieur à 1, ce qui signifie que le magnésium l'emporte sur le calcium (figure 61). L'origine évaporitique du magnésium est forte, le calcium provient de la dissolution de calcite (CaCO_3) et de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) comme le confirme le rapport $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$ (figure 62).

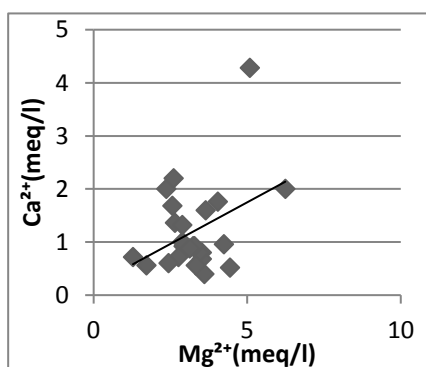


Figure 61 : Rapport $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$

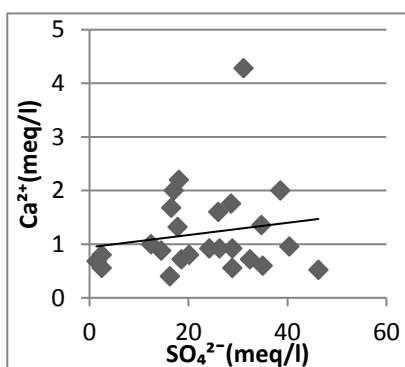


Figure 62 : Rapport $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$

• $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{HCO}_3^-$

Le rapport $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{HCO}_3^-$ montre un excès de HCO_3^- où tous les points se situent au dessus de la droite de pente 1. La teneur en ions HCO_3^- est plus forte que celles du Ca^{+2} et Mg^{+2} (figure 63).

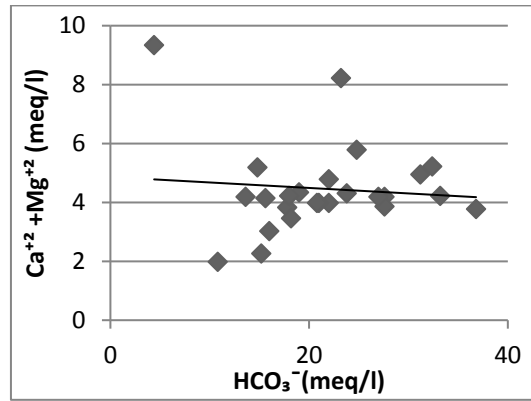


Figure 63: Rapport $(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / HCO_3^-$

- $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / (SO_4^{2-} + HCO_3^-)] / Na^+/Cl^-$

La représentation graphique de $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ en fonction de $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ montre que les principaux phénomènes géochimiques intervenant en générale dans l'acquisition de la charge saline, sont liés à l'interaction eau-roche (dissolution et précipitation des minéraux : calcite, dolomite, gypse, anhydrite et échange de base avec les minéraux argileux) (figure 64).

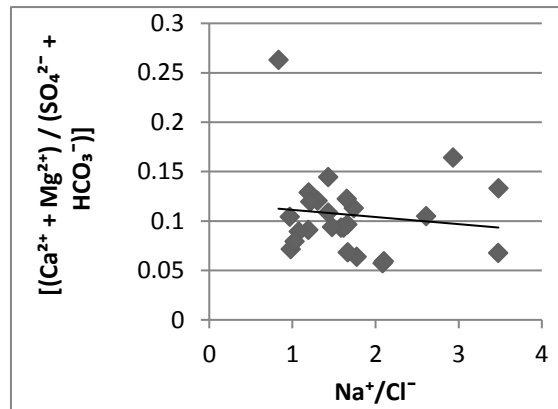


Figure 64: Rapport $[(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / (SO_4^{2-} + HCO_3^-)] / Na^+/Cl^-$

4. Indice de saturation

Les indices de saturation sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices, qui permet aussi de dire sous quelles formes chimiques certains éléments sont transportés dans les solutions.

L'indice de saturation est défini par Chapelle (1993) : $IS = \log \left(\frac{PAI}{KI} \right)$

Avec : PAI : produit d'activité ionique. KI : produit de solubilité minérale considérée.

La valeur IS=0 indique un état d'équilibre entre l'eau et le minéral (saturation).

IS<0 indique une sous-saturation.

IS>0 indique une sursaturation.

Durant la première campagne (Décembre 2013), les eaux de surface et souterraines du lac présentent une sous-saturation vis-à-vis de la calcite, anhydrite, aragonite, dolomite, gypse (tableau 29, tableau 31). Par conséquent une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux, donc accroissement probable de la minéralisation (figure 65 et figure 67).

Les résultats ainsi obtenu pendant la deuxième campagne (Mai 2014) indiquent une sous-saturation par rapport au gypse, l'halite et l'anhydrite et une sursaturation par rapport à la dolomite et calcite et par conséquent une éventuelle précipitation de ces minéraux (tableau 30, tableau 32, figure 66 et figure 68)..

La dissolution de l'halite a pour conséquence l'augmentation de la concentration des ions Cl^- et Na^+ et la dissolution du gypse a pour conséquence l'élévation des concentrations des ions Ca^{++} et SO_4^-

En conclusion, les eaux de surface et souterraines dans la zone d'étude sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (gypse, l'halite et l'anhydrite) pendant toutes les saisons et sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) en saison pluvieuse, et retourne durant la saison sèche à l'état de sous-saturation.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indiquent que seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter, surtout sous la forme de dolomite et calcite, alors que les minéraux évaporitiques en l'occurrence l'halite, le gypse et l'anhydrite tendent à la dissolution (Fekrache, 2015).

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

Tableau 29 : Indice de saturation des eaux de surface (Décembre 2013)

Echantillons	IS calcite	IS halite	IS dolomite	IS gypse	IS anhydrite
P1	-0,86	-5,37	-1,52	-0,92	-1,14
P2	-0,94	-4,94	-1,6	-1,03	-1,25
P3	-0,99	-4,77	-1,25	-1,19	-1,4
P4	-0,6	-4,73	-1,01	-0,46	-0,68
P12	-1,29	-7,02	-2,37	-1,44	-1,66
P14	-0,95	-7,11	-1,93	-1,17	-1,39
P16	-0,58	-6,34	-0,97	-1,31	-1,53
P17	-0,49	-6,94	-0,25	-2,3	-2,52
P18	-0,68	-7,8	-1,48	-1,14	-1,36
P19	-0,83	-7,12	-1,74	-1,21	-1,43
P20	0,07	-6,78	0,44	-1,07	-1,29
P21	-0,57	-6,92	-0,88	-1,39	-1,61
P22	-0,63	-6,54	-0,88	-1,25	-1,47
P23	-0,62	-6,81	-1,78	-0,76	-0,98
P24	0,02	-7,02	-0,26	-0,71	-0,93
P26		-7,34		-1,24	-1,46

Tableau 30 : Indice de saturation des eaux de surface (Mai 2014)

Echantillons	IS calcite	IS halite	IS dolomite	IS gypse	IS anhydrite
P1	0,12	-5,12	0,9	-1,55	-1,77
P2	0,35	-5,14	1,32	-1,6	-1,82
P3	0,56	-5,18	1,32	-1,36	-1,57
P4	1,6	-4,21	3,41	-0,99	-1,21
P11	0,78	-5,45	2,15	-1,78	-2
P12	0,13	-5,29	0,73	-1,37	-1,59
P14	0,37	-5,63	1,14	-1,32	-1,54
P15	0,34	-5,67	1,43	-1,72	-1,94
P17	0,19	-6,06	1,27	-1,79	-2
P18	0,63	-5,4	1,96	-1,64	-1,86
P19	0,43	-5,54	1,53	-1,55	-1,77
P20	0,24	-5,86	0,94	-1,51	-1,72
P21	0,26	-5,62	1,28	-1,44	-1,66
P23	0,56	-5,3	1,84	-1,7	-1,92
P26	-0,06	-6,12	0,18	-1,37	-1,59

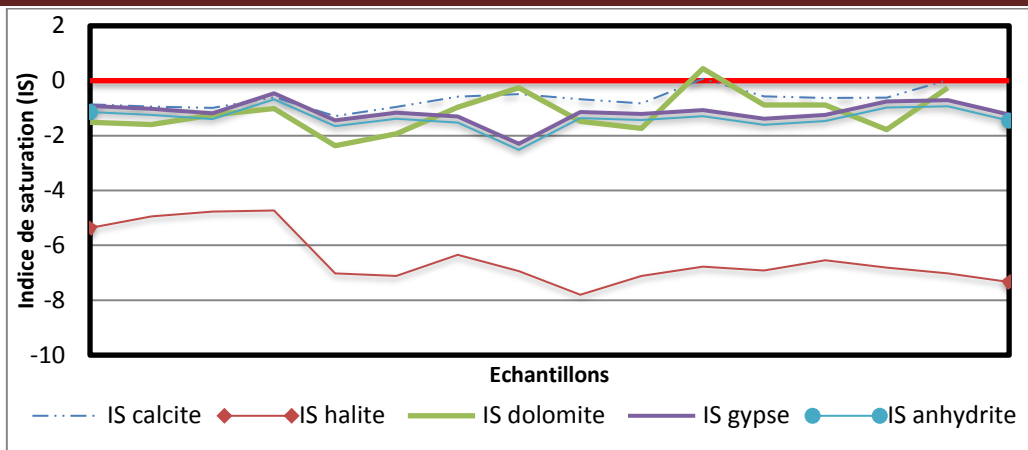


Figure 65 : Variations des indices de saturation des eaux de surface (Décembre 2013)

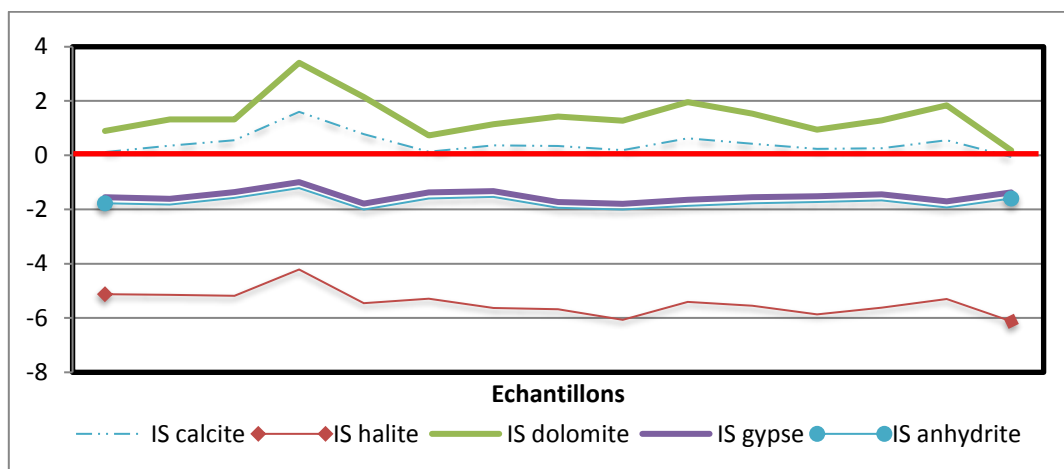


Figure 66 : Variations des indices de saturation des eaux de surface (Mai 2014)

Tableau 31 : Indice de saturation des eaux souterraines (Décembre 2014)

Echantillons	IS calcite	IS halite	IS dolomite	IS gypse	IS anhydrite
P5	0,22	-8,1	0,2	-1,13	-1,35
P6	-0,15	-6,37	-0,65	-1,16	-1,38
P7	-0,27	-6,83	-0,12	-1,18	-1,4
P8	-0,5	-6,37	-1,3	-0,58	-0,8
P9	-1,39	-6,45	-2,22	-1,44	-1,66
P13	-0,5	-6,68	-0,71	-0,76	-0,98
P25		-6,9		-1,1	-1,32
P27		-7,45		-1,09	-1,31
P28		-6,86		-0,81	-1,03
P29		-6,55		-0,59	-0,81
P30		-7,8		-0,75	-0,97
P31		-6,6		-0,93	-1,15

Tableau 32 : Indice de saturation des eaux souterraines (Mai 2014)

Echantillons	IS calcite	IS halite	IS dolomite	IS gypse	IS anhydrite
P5	0,04	-5,26	1,16	-2,07	-2,29
P6	0,81	-6,05	2,41	-2,44	-2,65
P7	0,59	-5,88	2,04	-2,74	-2,96
P8	0,2	-6,6	0,77	-1,68	-1,9
P9	0,22	-6,41	1,07	-2,45	-2,67
P13	-0,16	-5,33	0,73	-1,73	-1,94
P25	0,73	-5,81	2,14	-1,74	-1,96
P27	0,48	-6,26	1,14	-1,25	-1,47
P28	0,59	-6,04	1,79	-1,15	-1,37
P30	0,83	-5,93	2,14	-1,28	-1,5

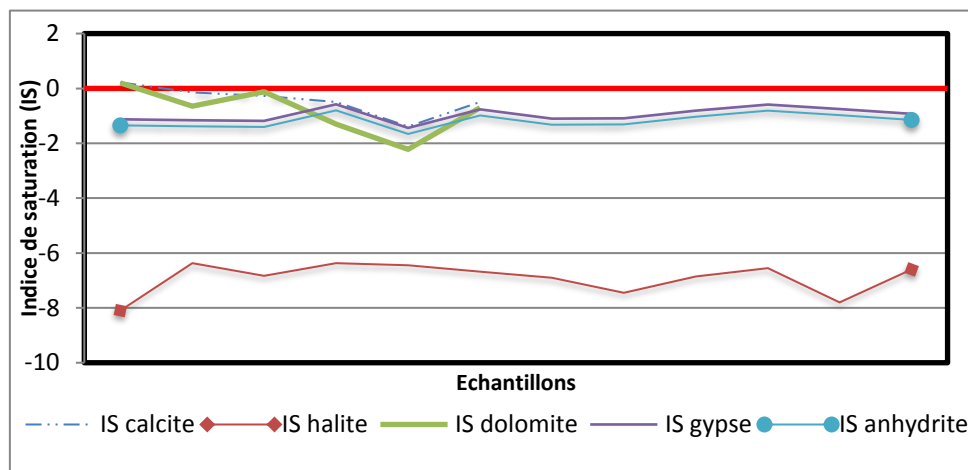


Figure 67 : Variations des indices de saturation des eaux souterraines (Décembre 2013)

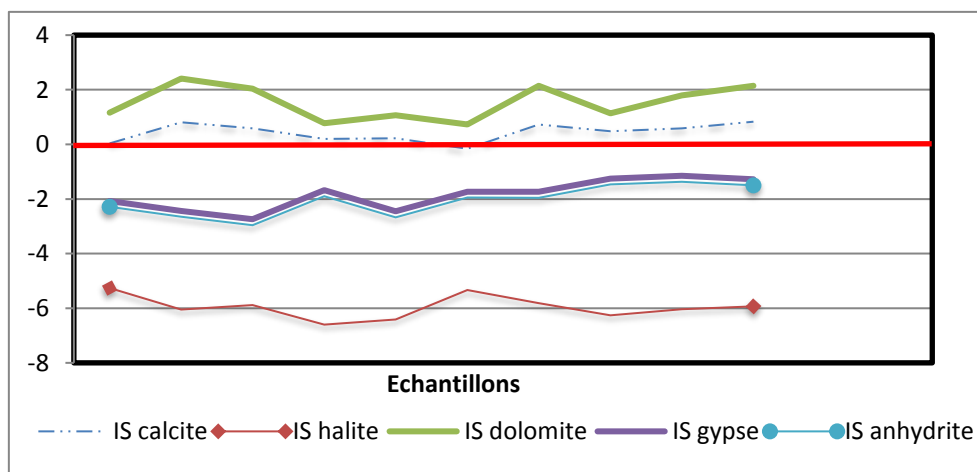


Figure 68 : Variations des indices de saturation des eaux souterraines (Mai 2014)

5. Le titre Hydrotimétrique (TH)

Il est mesuré par rapport aux teneurs en carbonate de calcium et de magnésium, qui proviennent des roches calcaires ou dolomitiques et la présence du CO₂ favorise cette dissolution. Le titre hydrotimétrique est donné par la formule suivante : $TH = (r \text{ Ca}^{2+} + r \text{ Mg}^{2+}) * 5$ en degré français (°F) (tableau 33).

Tableau 33 : Classification des eaux du lac Fetzara selon la dureté (TH en °F)

TH en °F	0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Classes des eaux	Douces	Modérément douces	Assez douces	Dures	Très dure
Pourcentage des points (%)	0	72%	20%	8%	0%

On peut classer les eaux du lac selon la dureté en trois classes. La première classe représente les eaux modérément douces avec 72% des points, la deuxième classe, celle des eaux assez douces représentée par 20% des points et la troisième classe, représente seulement 8% des points (figure 69). La dureté des eaux du lac est due à la forte évapotranspiration qui caractérise la région en période estivale et au lessivage des formations géologiques suite aux apports météoriques, ce qui entraîne un enrichissement des nappes en sels solubles particulièrement en Ca^{2+} et Mg^{2+} (Zahi et al, 2013).

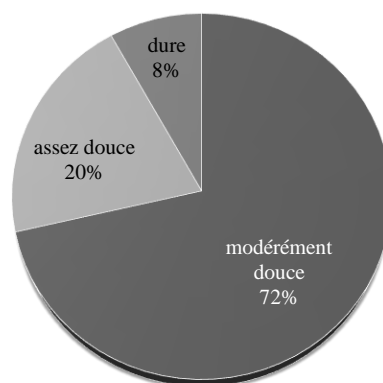


Figure 69 : Classification des eaux du lac Fetzara selon la dureté

6 . Relation entre les ions azotés et les principaux paramètres physico-chimiques

6.1 Nitrites et les principaux paramètres physico-chimiques

6.1.1 Eaux de surface

Tableau 34 : coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrites et les différents sels solubles.

Variables	Coefficients de corrélation R^2	
	Eaux de surface (Décembre 2013)	Eaux de surface (Mai 2014)
CE	0.57	0.71
Cl ⁻	0.60	0.69
Na ⁺	-0.04	0.60
K ⁺	-0.28	-0.02
Ca ⁺⁺	0.73	0.56
Mg ⁺⁺	0.35	0.70
CO ₃ ²⁻	0.03	0.03
HCO ₃ ⁻	-0.32	-0.11
SO ₄ ²⁻	0.60	0.1
pH	-0.17	0.53
NO ₃ ⁻	0.64	-0.23
NH ₄ ⁺	-0.08	0.25

6.1.1.1 Première campagne (Décembre 2013) :

La relation nitrites-calcium dans les eaux de surface paraît forte avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.73$ surtout pour les points P2 et P4, ce dernier présente la valeur la plus élevée 8.8 meq/l pour le calcium et 0.51 meq/l pour les nitrites, cet échantillon est proche du centre du lac, donc le plus touché par le phénomène d'évaporation au niveau du lac surtout en saison estivale. Les relations nitrites-nitrates, nitrites-sulfates et nitrites-chlorures sont fortes avec des coefficients de corrélation $R^2 = 0.64$ pour les nitrates et 0.60 pour les sulfates et chlorures (tableau 34) particulièrement pour les points P2 et P4. Ce sont des cours d'eau dans le lac Fetzara (figure 70).

La relation nitrites-conductivité électrique, reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.57$. L'échantillon P4 reste celui qui présente les valeurs les plus élevées avec 7.5 mS/cm pour la conductivité électrique et 0.51 meq/l pour les nitrites, c'est un canal secondaire, il est proche du centre et subit l'influence du canal principal qui reçoit toutes les eaux collectées. La relation nitrites avec le magnésium est également considérée comme positive avec $R^2 = 0.35$ (figure 70). La relation des nitrites avec les autres éléments chimiques est non significative ; les coefficients de corrélations sont faibles, c'est le cas du potassium, sodium, carbonates, bicarbonates, pH et ammonium (figure 70).

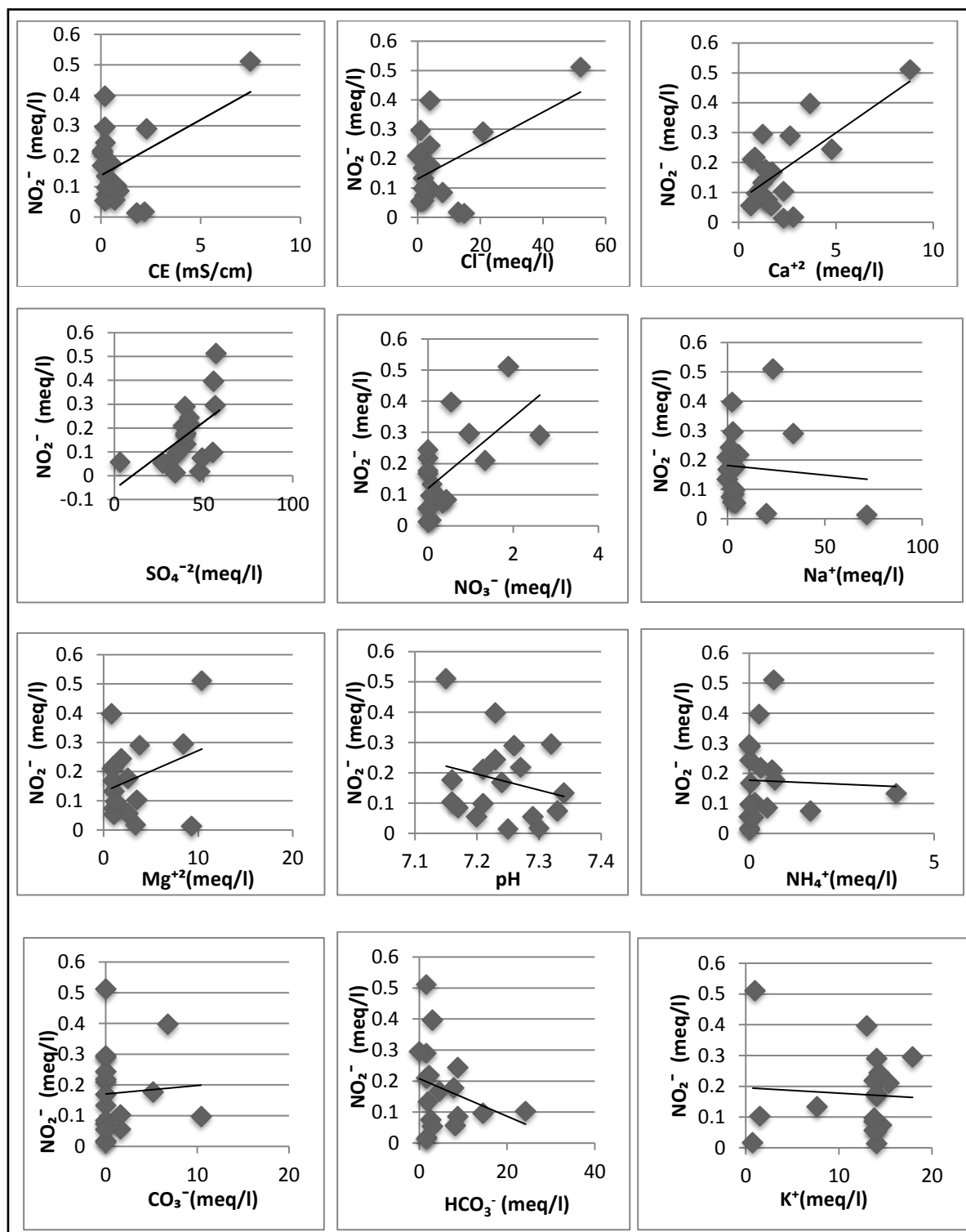


Figure 70 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux de surface (Décembre 2013)

6.1.1.2 Deuxième campagne (Mai 2014) :

Dans la deuxième campagne, la relation des nitrites est forte avec la conductivité électrique ($R^2 = 0.71$) et le magnésium ($R^2 = 0.70$) ; c'est toujours le point P4, qui présente la valeur la plus élevée 6.09 mS/cm pour la conductivité électrique, 5.08 meq/l pour le magnésium et 0.561 meq/l en nitrites. Cet échantillon est proche du canal principal, il est influencé par les eaux chargées en sels solubles à cause du lessivage et la dissolution des roches.

Les relations nitrites-chlorures et nitrites-sodium restent fortes avec des coefficients de corrélation $R^2 = 0.69$ pour les chlorures et 0.60 pour le sodium et chlorures particulièrement dans la région d'El Gantra, qui est une zone agricole (figure 71).

Les relations des nitrites avec le calcium et le pH, restent positives avec des coefficients de corrélation $R^2 = 0.56$ pour le calcium et 0.53 pour le pH. Les échantillons P4 et P12 (région de Cheurfa) présentent les teneurs les plus élevées, jusqu'à pH 9.54 pour le P4 et 0.61 meq/l en nitrites, ces eaux basiques, qui sont défavorable pour la nitratisation (figure 67).

La relation des nitrites avec les autres éléments chimiques est non significative avec des coefficients de corrélation faible, c'est le cas du potassium, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, pH et ammonium (figure 71).

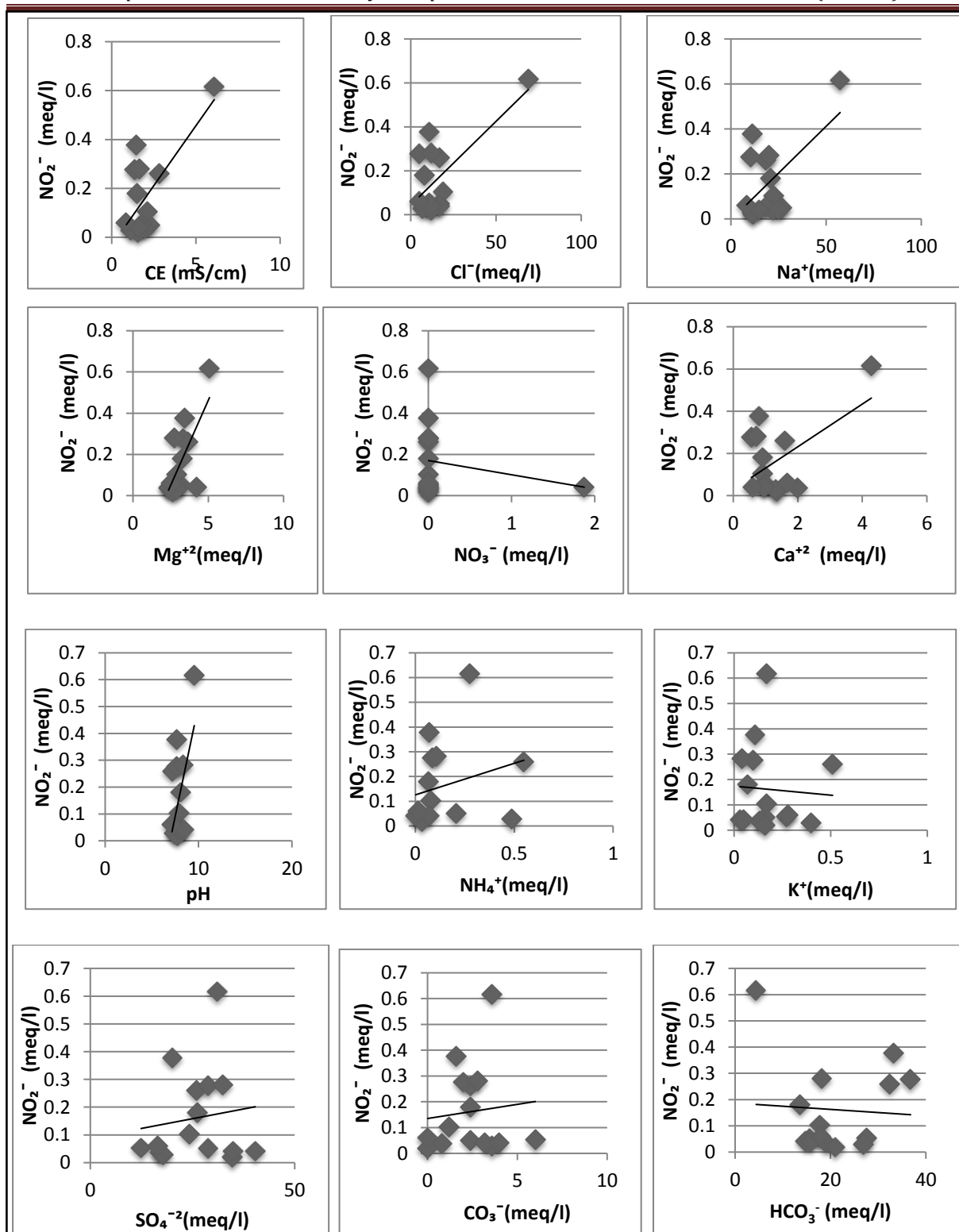


Figure 71 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux de surface (Mai 2014)

6.1.2 les eaux souterraines

Tableau 35 : Coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrites et les différents sels solubles.

Variables	Coefficients de corrélation R^2	
	Eaux souterraines (Décembre 2013)	Eaux souterraines (Mai 2014)
CE	0.09	0.03
Cl ⁻	0.08	-0.16
Na ⁺	-0.27	0.01
K ⁺	0.05	0.45
Ca ⁺⁺	0.41	-0.32
Mg ⁺⁺	0.15	-0.40
CO ₃ ²⁻	-0.12	-0.16
HCO ₃ ⁻	0.28	-0.47
SO ₄ ²⁻	-0.15	0.23
pH	-0.04	0.09
NO ₃ ⁻	0.04	0.88
NH ₄ ⁺	0.09	-0.37

6.1.2.1 Première campagne (Décembre 2013) :

La relation des nitrites avec le calcium reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.41$ et 0.53 avec le pH (tableau 35). L'échantillon P8 (région de Cheurfa), P28 et P29 (région d'El Gantra) présentent les teneurs les plus élevées.

La relation des nitrites avec les autres éléments chimiques est non significative, avec des coefficients de corrélations faibles, c'est le cas de la conductivité électrique, des chlorures, sulfates, potassium, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, pH, nitrates et ammonium (figure 72).

6.1.2.2 Deuxième campagne (Mai 2014) :

Durant la deuxième campagne, la relation des nitrites est forte avec les nitrates ($R^2 = 0.88$), pour le P8, 7.86 meq/l pour les nitrates et 0.43 meq/l en nitrites, cet échantillon situé dans la région de Cheurfa, est sous l'influence du lessivage des sels solubles pendant la saison humide qui alimentent les eaux souterraines.

La relation des nitrites avec le potassium reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.45$. Les échantillons P8 et P13 (la région de Cheurfa) présentent les teneurs les plus élevées (figure 73).

Avec des coefficients de corrélations négatives, la relation des nitrites avec les autres éléments chimiques est faible c'est le cas de la conductivité électrique, les chlorures, sulfates, calcium, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, pH et ammonium (figure 73).

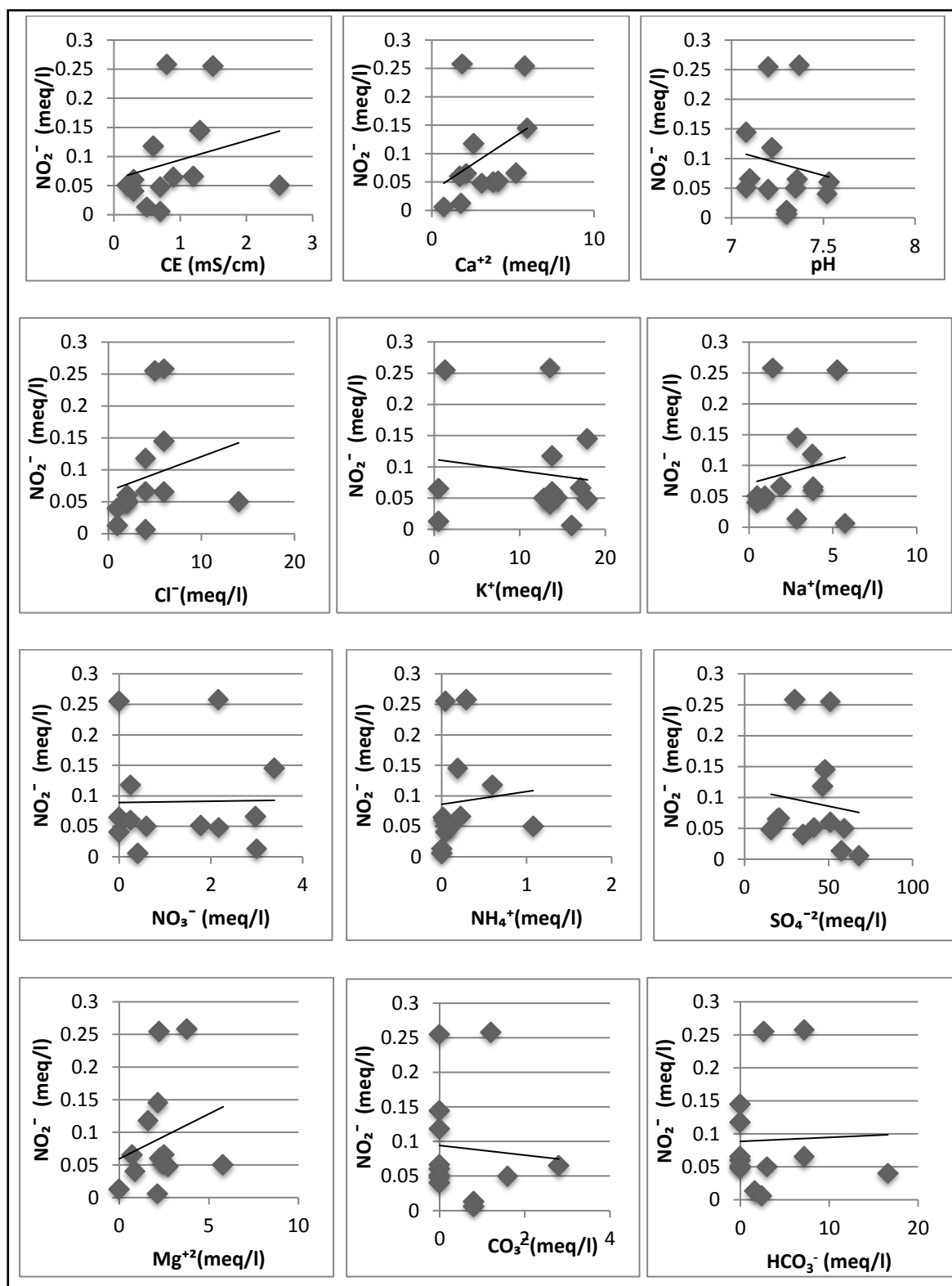


Figure 72 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux souterraines (Décembre 2013)

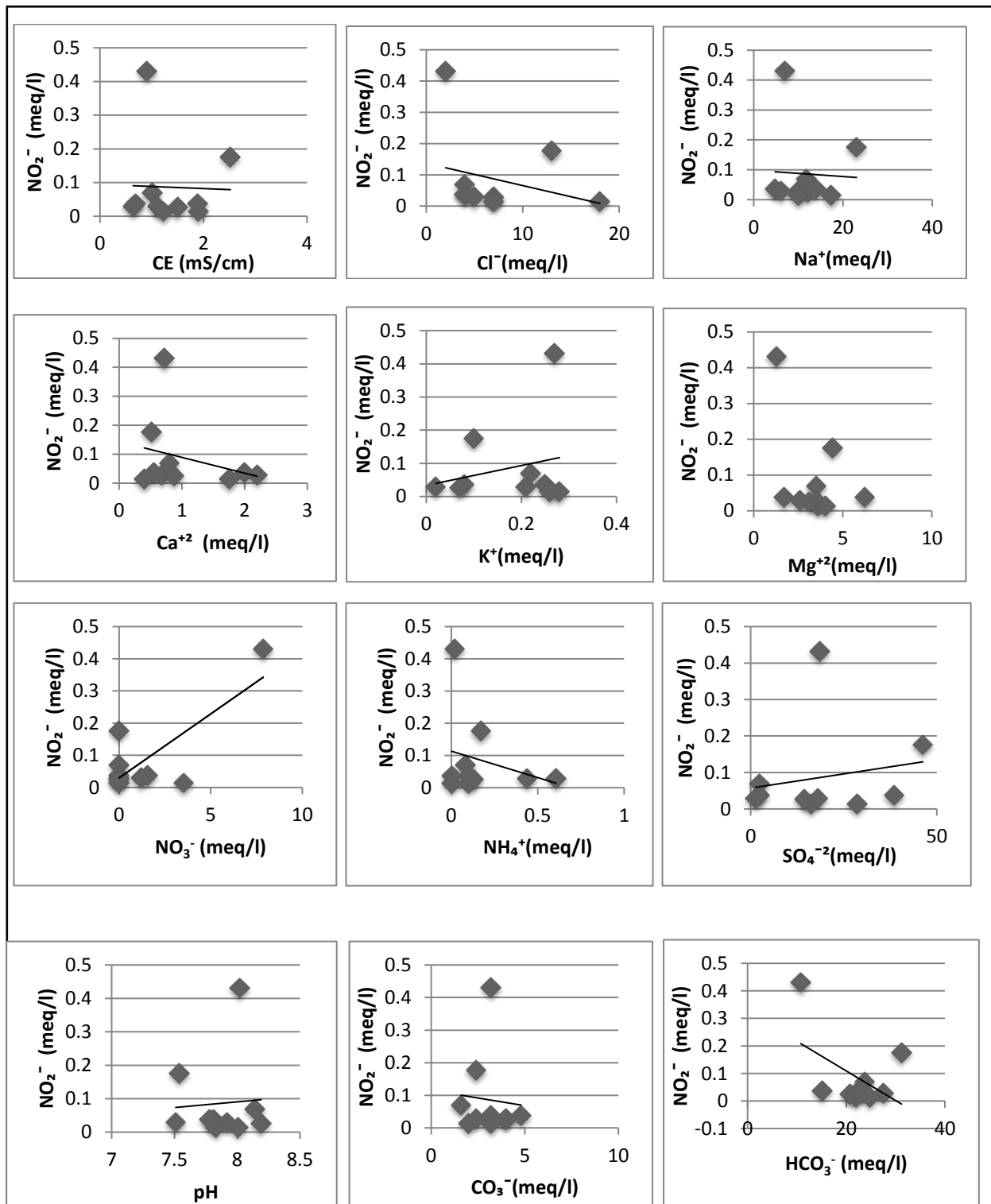


Figure 73 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux souterraines (Mai 2014)

6.2 Nitrates et les principaux paramètres physico-chimiques

6.2.1 Les eaux de surface

Tableau 36 : coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrates et les autres sels solubles.

Variables	Coefficients de corrélation R^2	
	Eaux de surface (Décembre 2013)	Eaux de surface (Mai 2014)
CE	0.65	0.09
Cl ⁻	0.70	-0.11
Na ⁺	0.30	-0.13
K ⁺	-0.20	-0.29
Ca ⁺⁺	0.50	-0.1
Mg ⁺⁺	0.46	0.40
CO ₃ ²⁻	-0.18	0.11
HCO ₃ ⁻	-0.32	-0.22
SO ₄ ²⁻	0.32	0.50
pH	-0.05	-0.01
NO ₂ ⁻	0.64	-0.23
NH ₄ ⁺	-0.09	-0.12

6.2.1.1 Première campagne (Décembre 2013) :

La relation nitrates et chlorures durant la première campagne paraît forte avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.70$ surtout pour les points P1, P2, P3 et P4, ce dernier présente la valeur la plus élevée, 52 meq/l de chlorures et 1.88 meq/l en nitrates dans la région d'El Gantra (figure 74). Cette zone est entourée par de terrains nus, où la migration des nitrates est nettement plus rapide sur les surfaces cultivables pendant l'hiver (Enfield et al, 1990).

La relation nitrates et conductivité électrique est forte avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.65$ avec les nitrites $R^2 = 0.64$ (tableau 36) surtout pour les points P2 et P4. On remarque que lorsque la conductivité électrique augmente, les valeurs des nitrates subissent un accroissement. P4 représente les valeurs les plus importantes, 7.5 mS/cm pour la conductivité électrique et plus de 2 meq/l pour les nitrates. Ce sont des cours d'eau dans le lac Fetzara. Les nitrates sont corrélés positivement avec la salinité globale, les nitrites se transforment rapidement en nitrates (figure 74).

La relation nitrates-calcium et nitrates-magnésium des eaux de surface du lac Fetzara, reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.50$ avec le calcium et $R^2 = 0.46$ avec le magnésium. L'échantillon P4 reste celui qui présente les teneurs les plus élevées avec 8.8 meq/l pour le calcium et 10.4 meq/l pour le magnésium, c'est au canal secondaire proche du centre du lac Fetzara. Cette relation significative existe aussi entre les sulfates et le sodium avec des coefficients de corrélation moins importants (entre 0.30 et 0.32) (figure 74).

Avec des coefficients de corrélations négatives, la relation des nitrates avec les autres éléments chimiques est faible, c'est le cas du potassium, carbonates, bicarbonates, pH et ammonium (figure 74).

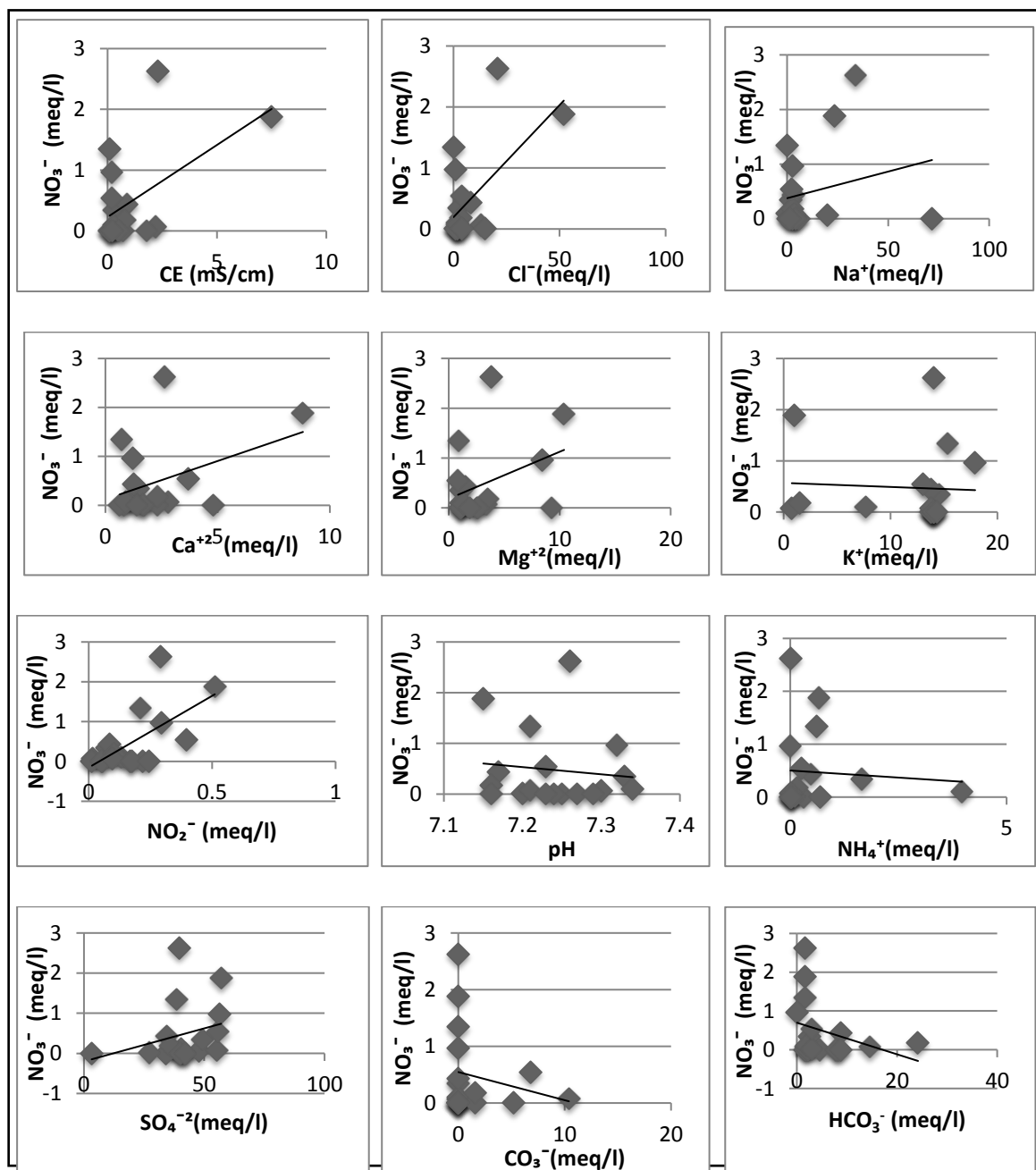


Figure 74 : Relation nitrates avec chlorures, conductivité électrique, nitrites, sodium, sulfates, calcium, magnésium, potassium, carbonates, bicarbonates, pH et ammonium des eaux de surface (Décembre 2013)

6.2.1.2 Deuxième campagne (Mai 2014) :

La relation nitrates-sulfates et nitrates-magnésium des eaux de surface du lac Fetzara, reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.50$ avec les sulfates et $R^2 = 0.40$ avec le magnésium. Les échantillons P4 et P21 restent ceux qui présentent les teneurs les plus élevées, grâce au phénomène de l'évaporation durant la période sèche.

La relation des nitrates avec les autres éléments chimiques est faible avec des coefficients de corrélation faibles, c'est le cas de la conductivité électrique, chlorures, calcium, sodium, potassium, carbonates, bicarbonates, pH, nitrates et ammonium (les valeurs des nitrates sont négligeables, proche de zéro).

6.2.2 Les eaux souterraines

Tableau 37 : Coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrates et autres sels solubles.

Variables	Coefficients de corrélation R^2	
	Eaux souterraines (Décembre 2013)	Eaux souterraines (Mai 2014)
CE	-0.10	-0.17
Cl ⁻	-0.22	-0.51
Na ⁺	-0.13	-0.31
K ⁺	0.31	0.35
Ca ⁺⁺	0.35	0.02
Mg ⁺⁺	-0.12	-0.41
CO ₃ ²⁻	-0.26	0.17
HCO ₃ ⁻	-0.26	-0.68
SO ₄ ²⁻	-0.13	0.12
pH	-0.46	0.13
NO ₂ ⁻	0.04	0.88
NH ₄ ⁺	-0.08	-0.24

6.2.2.1 Première campagne (Décembre 2013) :

La relation des nitrates avec le calcium et le potassium des eaux souterraines du lac Fetzara, reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.35$ avec le calcium et $R^2 = 0.31$ avec le potassium (tableau 37). C'est dans la partie Nord-Est (zone fortement peuplée) où le relation est remarquable avec les points P25, P27, P28, P29, P30 et P31 (figure 75).

La relation des nitrates avec les autres éléments chimiques est faible avec des coefficients de corrélation inférieurs à 0.20, c'est le cas de la conductivité électrique, chlorures, sodium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, pH, nitrites et ammonium (figure 75).

6.2.2.2 Deuxième campagne (Mai 2014)

La relation nitrates et nitrite durant la deuxième campagne parait forte avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.88$ surtout pour le P8, ce dernier présente la valeur la plus élevée 7.86 meq/l de nitrates et 0.43 meq/l en nitrites (région d'El Cheurfa) (figure 76).

La relation des nitrates avec le potassium des eaux souterraines du lac Fetzara, reste positive avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.35$ (figure 76). La relation des nitrates avec les autres éléments chimiques est faible avec des coefficients de corrélation faibles, c'est le cas de la conductivité électrique, chlorures, sodium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, pH, calcium et ammonium (figure 76).

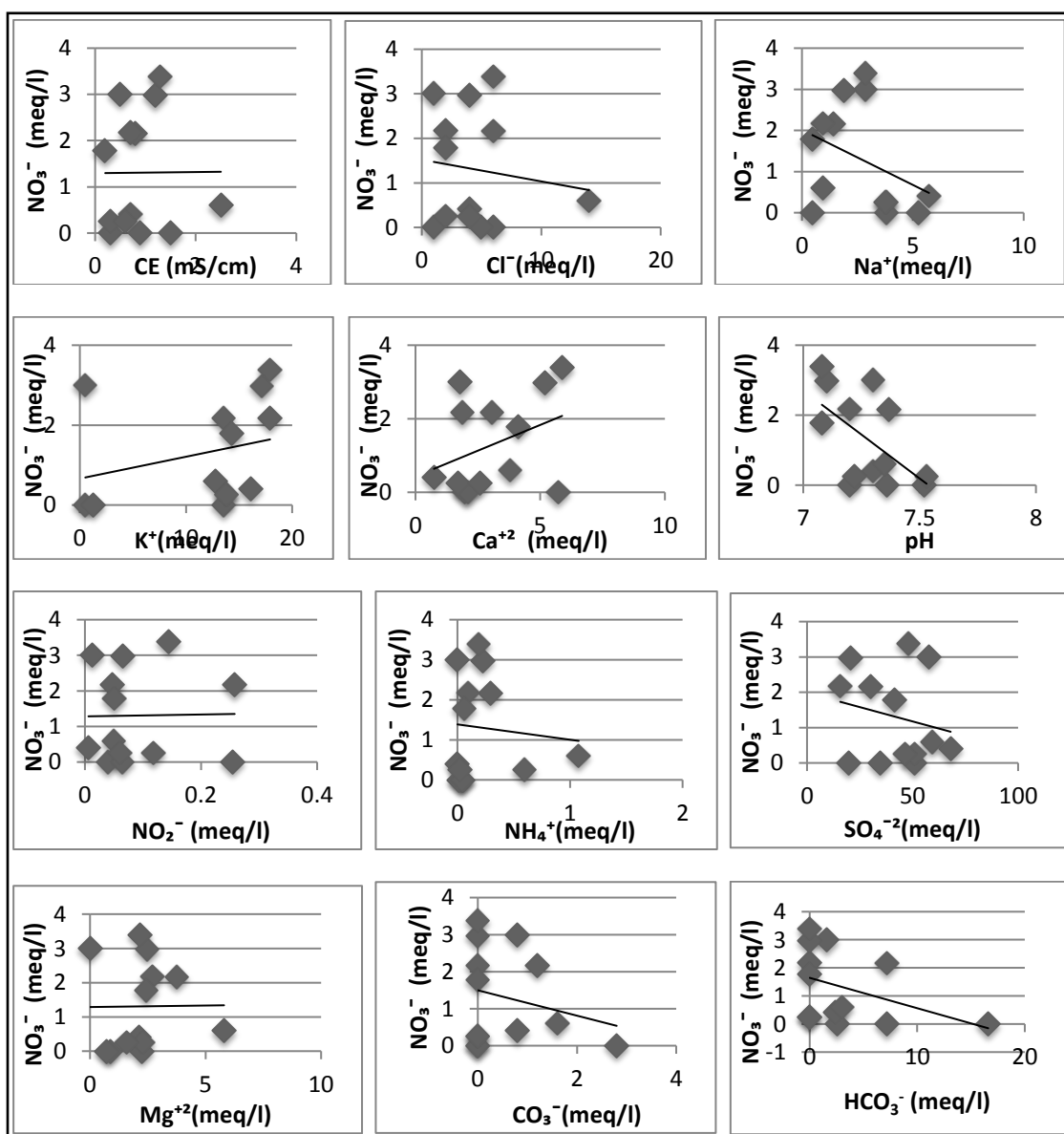


Figure 75 : Relation nitrates avec : conductivité électrique, chlorures, calcium, potassium, sodium magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, nitrites, ammonium et pH des eaux souterraines (décembre 2013)

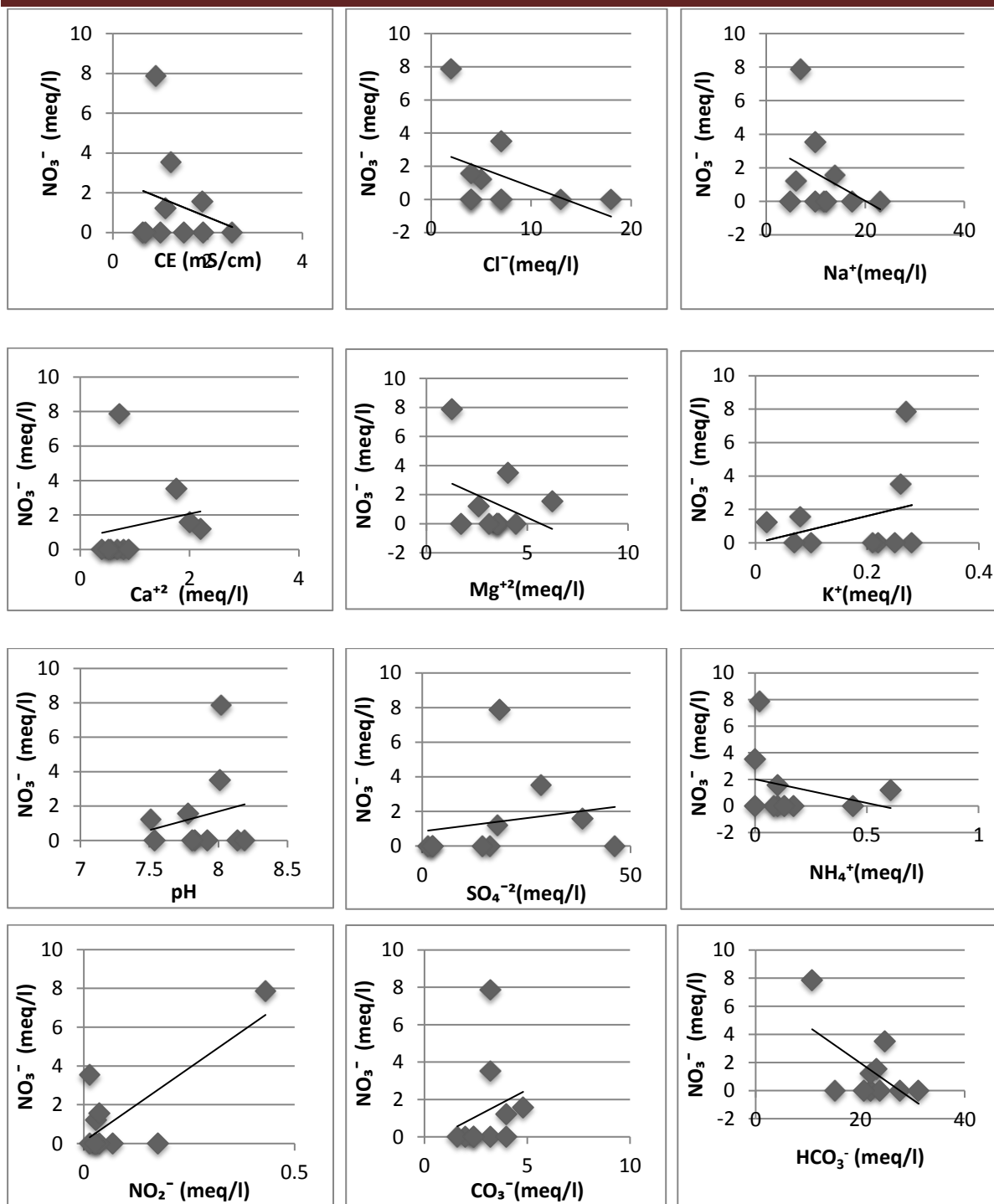


Figure 76 : Relation nitrates avec conductivité électrique, chlorures, sodium, nitrites, potassium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, calcium, ammonium et pH des eaux souterraines (Mai 2014)

6.3 Relation entre les ions ammonium et les principaux paramètres physico-chimiques

6.3.1 Les eaux de surface

Tableau 38 : Coefficients de corrélation (R^2) entre ammonium et les autres sels solubles.

Variables	Coefficients de corrélation R^2	
	Eaux de surface (Décembre 2013)	Eaux de surface (Mai 2014)
CE	-0.03	0.30
Cl ⁻	-0.05	0.21
Na ⁺	-0.20	0.1
K ⁺	-0.28	0.83
Ca ⁺⁺	-0.08	0.35
Mg ⁺⁺	-0.02	0.33
CO ₃ ²⁻	-0.16	0.12
HCO ₃ ⁻	-0.21	0.21
SO ₄ ²⁻	0.1	-0.15
pH	0.43	-0.24
NO ₂ ⁻	-0.08	0.25
NO ₃ ⁻	-0.09	-0.12

6.3.1.1 Première campagne (Décembre 2013) :

La relation ammonium dans les eaux de surface du lac en Décembre 2013, est moyenne avec le pH où $R^2 = 0.43$ (figure 77) .

La relation ammonium avec les autres éléments chimiques n'est pas significative avec des coefficients de corrélation faibles (tableau 38), c'est le cas de la conductivité électrique, chlorures, sodium, potassium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, pH, calcium, nitrates et nitrites (figure 77)

6.3.1.2 Deuxième campagne (Mai 2014) :

La relation ammonium durant la deuxième campagne paraît forte avec le potassium, le coefficient de corrélation $R^2 = 0.83$ surtout pour le point P12 où la concentration égale à 0.51 meq/l en K⁺ et 0.54 meq/l pour le NH₄⁺ (région de Cheurfa) et P20 où la concentration 0.4 meq/l en K⁺ et 0.48 meq/l pour le NH₄⁺, situé dans la région de Berrahal (zone industrielle) (figure 78). La relation des ions ammonium dans les eaux de surface du lac en Mai 2014, est moyenne avec la conductivité électrique, le calcium et le magnésium avec des coefficients de corrélation entre 0.30 et 0.35 (figure 78) .

La relation des ions ammonium avec les autres éléments chimiques n'est pas significative, avec des coefficients de corrélation faibles, c'est le cas de la conductivité électrique, chlorures,

sodium, potassium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, pH, calcium, nitrates et nitrites (figure 78)

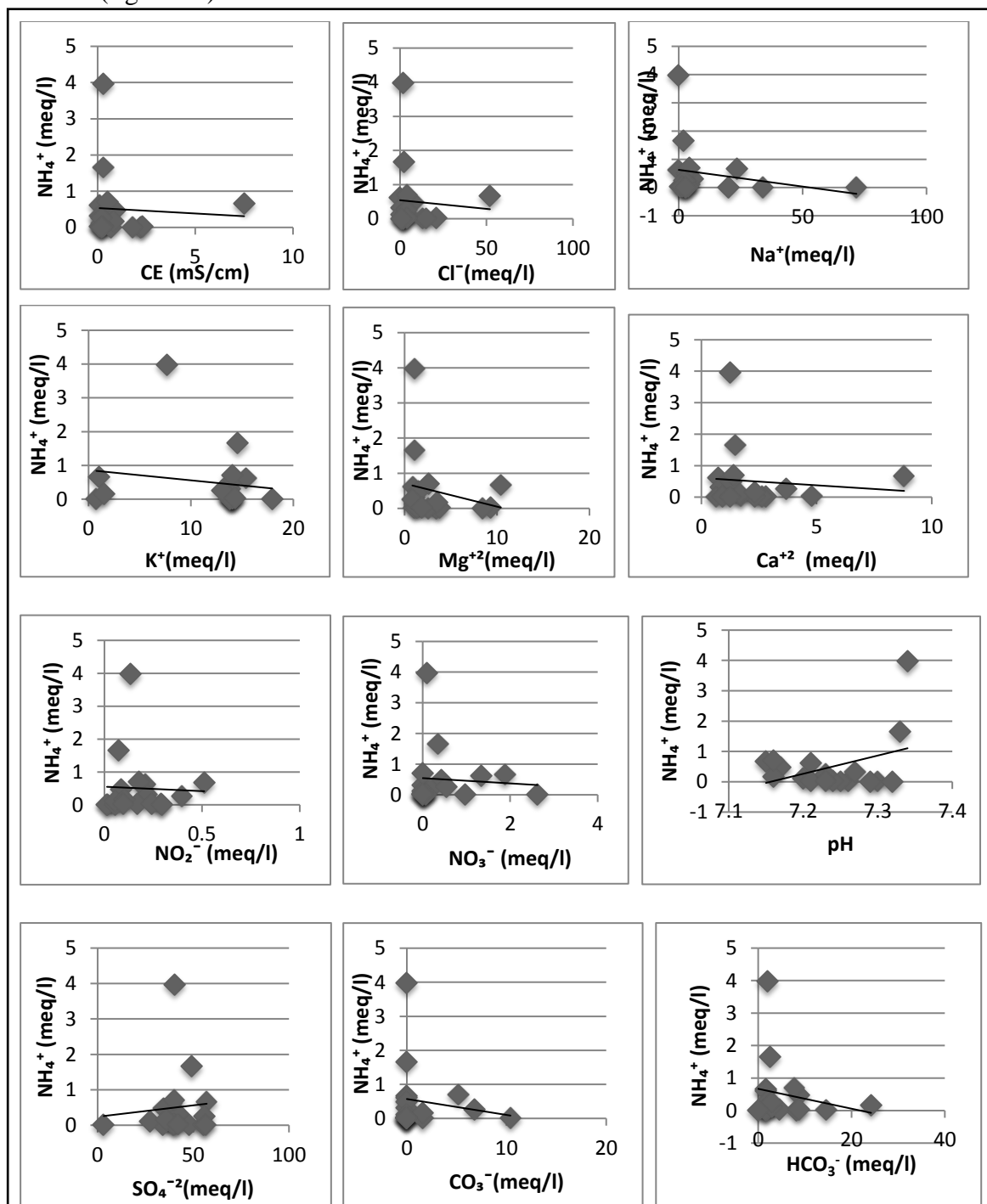


Figure 77 : Relation des ions ammonium avec conductivité électrique, chlorures, sodium, potassium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, calcium, pH , nitrites et nitrates des eaux de surface (Décembre 2013)

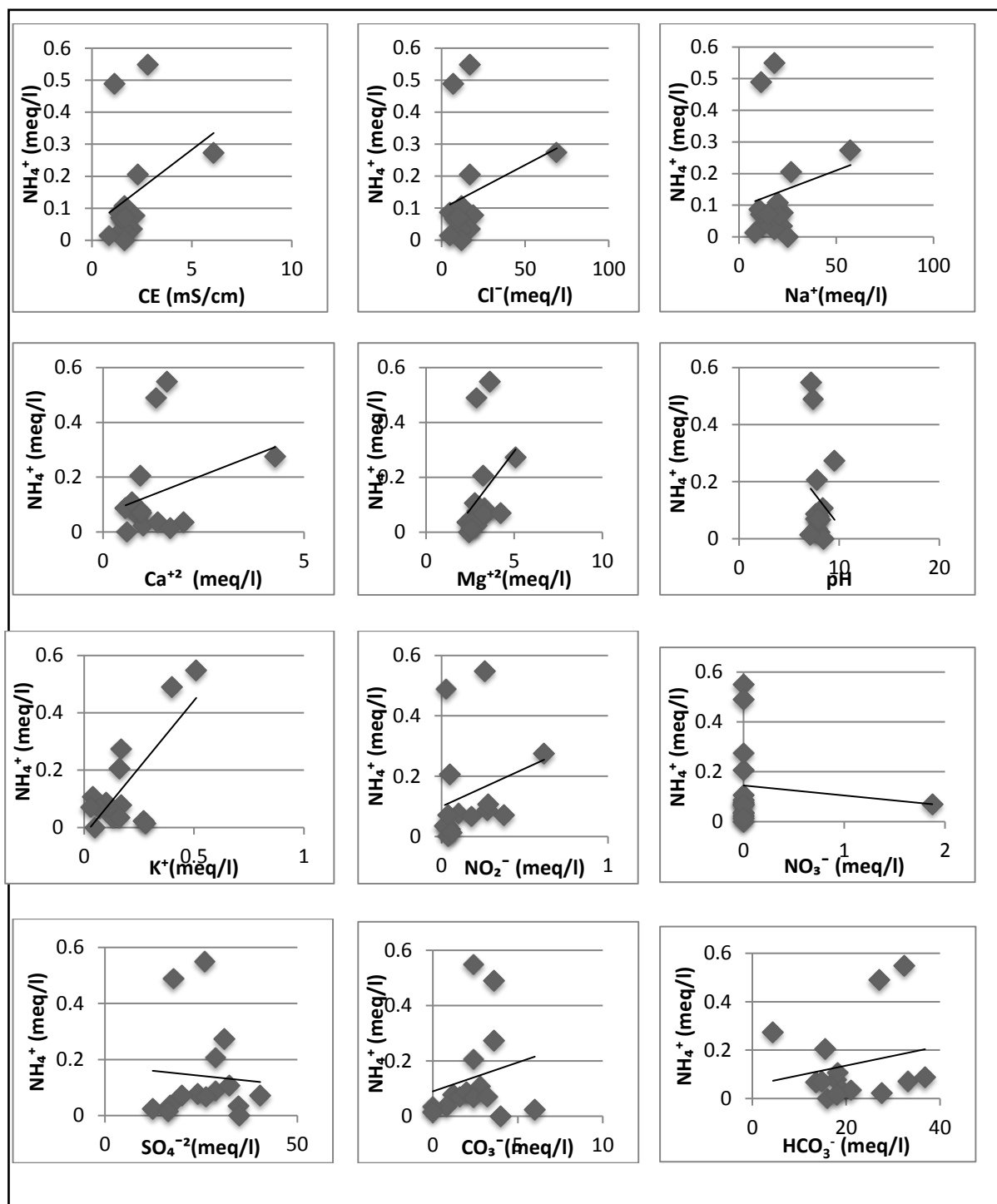


Figure 78 : Relation des ions ammonium avec potassium conductivité électrique, magnésium, calcium, chlorures, sodium, sulfates, carbonates, bicarbonates, nitrites et nitrates des eaux de surface (Mai 2014).

6.3.2 Les eaux souterraines

Tableau 39 : Coefficients de corrélation (R^2) entre ions ammonium et les autres sels solubles.

Variables	Coefficients de corrélation R^2	
	Eaux souterraines (Décembre 2013)	Eaux souterraines (Mai 2014)
CE	0.58	-0.12
Cl ⁻	0.73	0.21
Na ⁺	-0.32	-0.12
K ⁺	0.34	-0.51
Ca ⁺⁺	0.18	0.49
Mg ⁺⁺	0.67	0.04
CO ₃ ²⁻	0.16	0.08
HCO ₃ ⁻	-0.01	0.42
SO ₄ ²⁻	0.18	-0.06
pH	0.08	-0.48
NO ₂ ⁻	0.09	-0.37
NO ₃ ⁻	-0.08	-0.24

6.3.2.1 Première campagne (Décembre 2013) :

La relation des ions ammonium dans les eaux souterraines en Décembre 2013 est forte avec les chlorures, où $R^2 = 0.73$ et le magnésium $R^2 = 0.67$ (tableau 39) surtout pour le P13 où la concentration est égale à 14 meq/l en Cl⁻ et 5.8 meq/l en Mg⁺⁺ et 1 meq/l pour le NH₄⁺, localisé dans la région de Cheurfa (figure 79).

La relation des ions ammonium est moyenne avec la conductivité électrique ($R^2 = 0.58$) et modérément avec le potassium ($R^2 = 0.34$), c'est toujours le point P13 situé dans la région de Cheurfa, qui marque les concentrations les plus élevées (figure 79).

La relation des ions ammonium avec les autres éléments chimiques n'est pas significative avec des coefficients de corrélation faibles, c'est le cas du sodium, sulfates, carbonates, bicarbonates, pH, calcium, nitrates et nitrites (figure 79).

6.3.2.2 Deuxième campagne (Mai 2014) :

La relation des ions ammonium est moyenne avec le calcium ($R^2 = 0.49$) et les bicarbonates ($R^2 = 0.42$), les points P13, P25, P27, P28 et P30 situés dans la région de El-Gantra (zone fortement peuplée), marquent fortement cette relation (figure 80).

La relation des ions ammonium avec les autres éléments chimiques n'est pas significative avec des coefficients de corrélation faibles (tableau 36), c'est le cas de conductivité électrique, chlorure, magnésium, sodium, potassium, sulfates, carbonates, pH, nitrates et nitrites (figure 80).

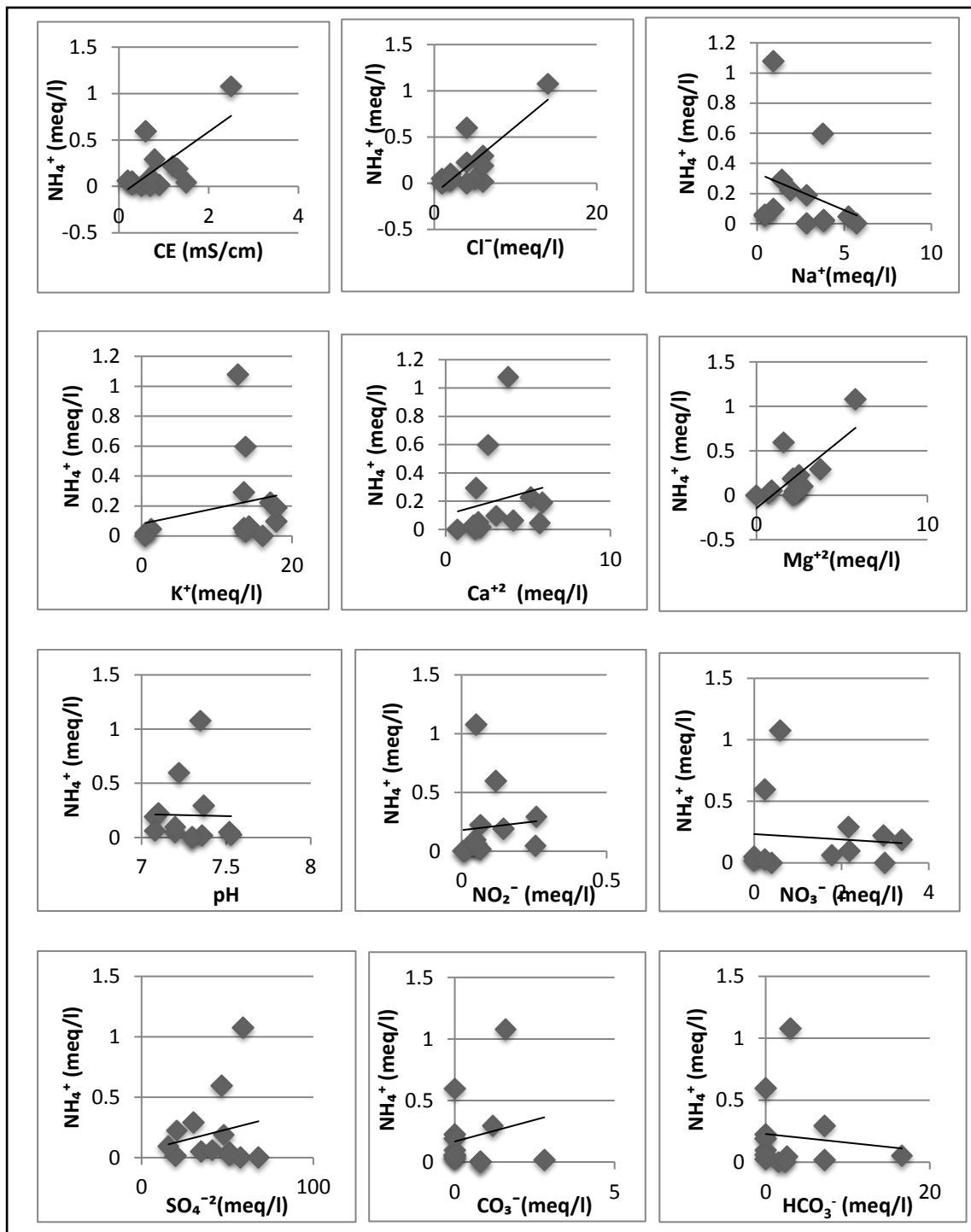


Figure 79: Relation des ions ammonium avec conductivité électrique, chlorures, magnésium, potassium, sodium, calcium, sulfate, pH, nitrites, nitrates, carbonates et bicarbonates des eaux souterraines (Décembre 2013).

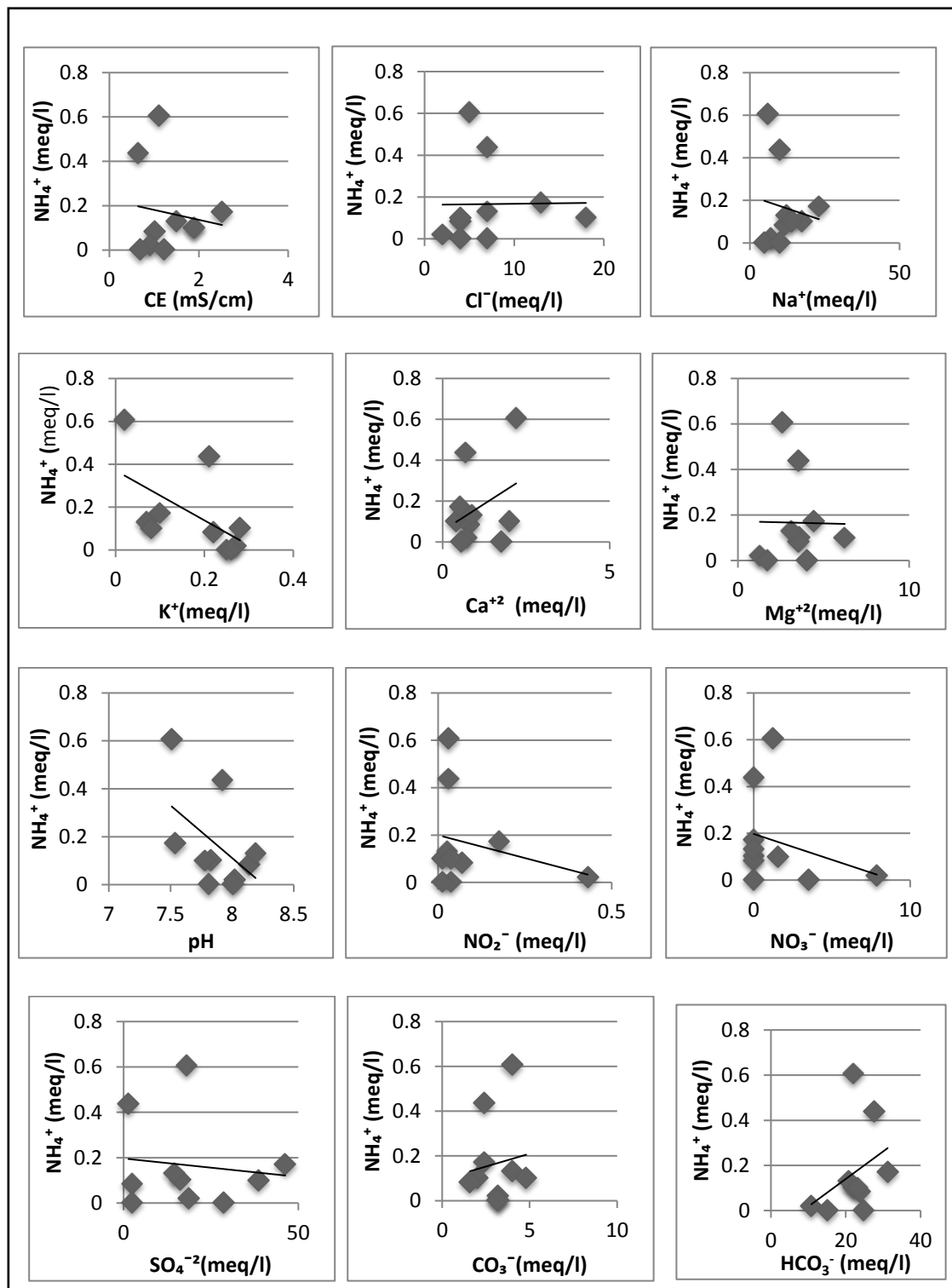


Figure 80 : Relation des ions ammonium avec calcium, carbonates, bicarbonates, conductivité électrique, chlorure, sodium, potassium, magnésium, carbonate, sulfate, pH, nitrites et nitrates des eaux souterraines (Mai 2014)

Tableaux 40 : Récapitulatif des relations entre les éléments azotés et les autres sels solubles des eaux de surface

	Relations des nitrites		
	fortes	moyennes	faibles
Eaux de surface (Décembre 2013)	Cl ⁻ , Ca ⁺⁺ , SO ₄ ⁻² , NO ₃ ⁻ .	CE, Mg ⁺⁺	Na ⁺ , K ⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , pH et NH ₄ ⁺ .
Eaux de surface (Mai 2014)	CE, Cl ⁻ , Na ⁺ , Mg ⁺⁺ .	Ca ⁺⁺ , pH	K ⁺ , , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , pH, et NO ₃ ⁻ et NH ₄ ⁺
	Relations des nitrates		
	fortes	moyennes	faibles
Eaux de surface (Décembre 2013)	CE, Cl ⁻ , NO ₂ ⁻	Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , Na ⁺ , SO ₄ ⁻² .	K ⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , pH et NH ₄ ⁺ .
Eaux de surface (Mai 2014)	/	SO ₄ ⁻² , Mg ⁺⁺	CE, Ca ⁺⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , Na ⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , pH, NO ₂ ⁻ et NH ₄ ⁺ .
	Relations des ions ammonium		
	fortes	moyennes	faibles
Eaux de surface (Décembre 2013)	/	pH	CE, Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻ .
Eaux de surface (Mai 2014)	K ⁺	CE, Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺	Cl ⁻ , Na ⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , pH, NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻ .

Tableaux 41 : Récapitulatif des relations entre les éléments azotés et les autres sels solubles des eaux souterraines

	Relations des nitrites		
	fortes	moyennes	faibles
Eaux souterraines (Décembre 2013)	/	Ca ⁺⁺	CE, K ⁺ , Cl ⁻ , Mg ⁺⁺ , Na ⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , pH, NH ₄ ⁺ et NO ₃ ⁻ .
Eaux souterraines (Mai 2014)	NO ₃ ⁻	K ⁺	CE, Cl ⁻ , Na ⁺ , , Mg ⁺⁺ , Ca ⁺⁺ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻² , SO ₄ ⁻² , pH, NO ₂ ⁻ et NH ₄ ⁺ .
	Relations des nitrates		
	fortes	moyennes	faibles
Eaux souterraines (Décembre 2013)	/	Ca ⁺⁺ , K ⁺	CE, Cl ⁻ , Mg ⁺⁺ Na ⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , pH, NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻ .
Eaux souterraines (Mai 2014)	NO ₂ ⁻	K ⁺	CE, Cl ⁻ , Na ⁺ , , Mg ⁺⁺ , Ca ⁺⁺ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻² , SO ₄ ⁻² , pH, et NH ₄ ⁺ .
	Relations des ions ammonium		
	fortes	moyennes	faibles
Eaux souterraines (Décembre 2013)	Cl ⁻ , Mg ⁺⁺	CE, K ⁺	Na ⁺ , Ca ⁺⁺ , CO ₃ ⁻² , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻² , pH, NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻ .
Eaux souterraines (Mai 2014)	/	Ca ⁺⁺ , HCO ₃ ⁻	CE, Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ⁺⁺ , CO ₃ ⁻² , SO ₄ ⁻² , pH, NO ₂ ⁻ et NO ₃ ⁻ .

7. Aptitude des eaux à l'irrigation

Le SAR (sodium absorption ratio) est utilisé en liaison avec la conductivité électrique ; le rapport des résultats sur le diagramme de Richards permet de classer les différents types d'eau d'irrigation et indiquer leur utilisation (tableau 42).

$$SAR = \frac{Na^+}{(\sqrt{Ca} + \sqrt{Mg})/2}$$

Le sodium, calcium et magnésium sont exprimés en mg/l.

Tableaux 42 : Evolution des classes d'irrigation selon Richard (1954)

Types d'eaux	Qualité	Classes	Nombre d'échantillons	Pourcentage
Eaux de surface	Bonnes	C1 S1	7	42.8%
		C2 S1	5	
	Admissibles	C3 S1	3	42.78%
		C3 S2	5	
		C3 S3	4	
	Médiocres	C3 S4	2	7.1%
	Mauvaises	C4 S3	1	7%
C4 S4		1		
Eaux souterraines	Bonnes	C1 S1	1	39%
		C2 S1	7	
		C2 S2	1	
	Admissibles	C3 S1	6	52%
		C3 S2	5	
		C3 S3	1	
	Médiocres	C4 S1	1	4.3%
Mauvaises	C4 S4	1	4.3%	

Le diagramme de Richards fait apparaître quatre classes d'eau : bonnes, admissibles , médiocres et mauvaises (Figure 81, Figure 82, Figure 83 et Figure 84).

Bonnes (C1S1-C2S1-C2S2) : eaux pouvant être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols. Cette catégorie est présente au niveau des eaux de surface avec douze (12) échantillons et sept (09) pour les eaux souterraines.

Admissibles (C3S1-C3S2- C3S3) : eaux convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. Cette classe représente la majorité des échantillons et se localise au Nord-Est et Sud-Est du lac près de Cheurfa.

Médiocres (C3S4-C4S1) : eaux fortement minéralisées pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Ces eaux de qualité médiocres occupent le canal secondaire (P1) et le puits (P5) localisé au Sud-Est du lac.

Mauvaises (C4S3) : eaux ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais peuvent être utilisées sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes très tolérantes aux sels (choux, betterave, etc....). Cette classe apparaît durant la deuxième campagne au niveau des échantillons P2, P3 et P12 dans la région de Cheurfa.

D'après la classification de Richard, nous remarquons une légère dégradation de la qualité des eaux durant la deuxième campagne (Mai 2014) dans quelques échantillons des eaux de surface à l'exutoire du lac (P1, P2, P3 et P4) et les eaux souterraines (P13 et P5) (Figure 82 et Figure 84).

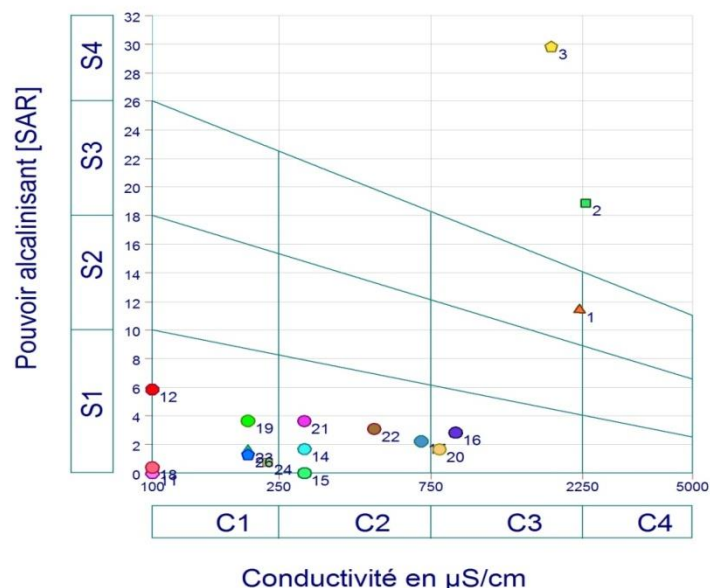


Figure 81. Classification des eaux de surface selon le diagramme de Richards (première campagne)

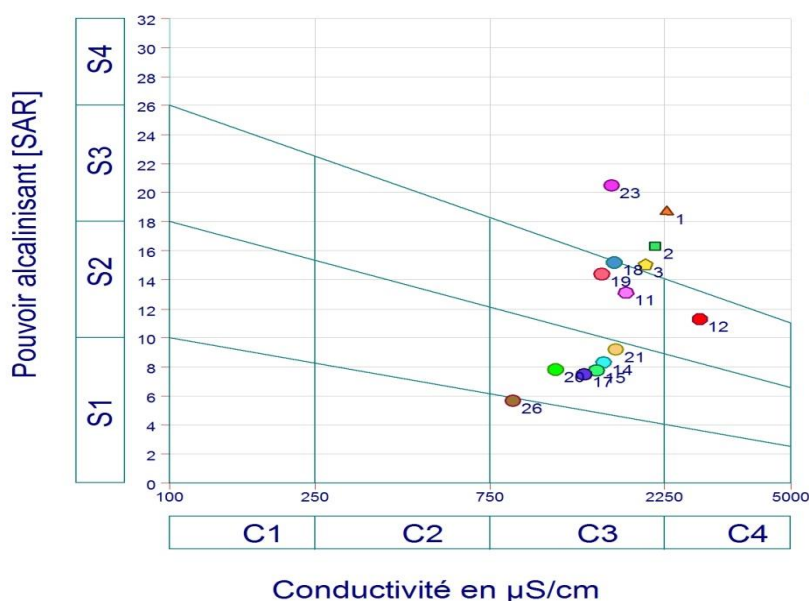


Figure 82. Classification des eaux de surface selon le diagramme de Richards (deuxième campagne)

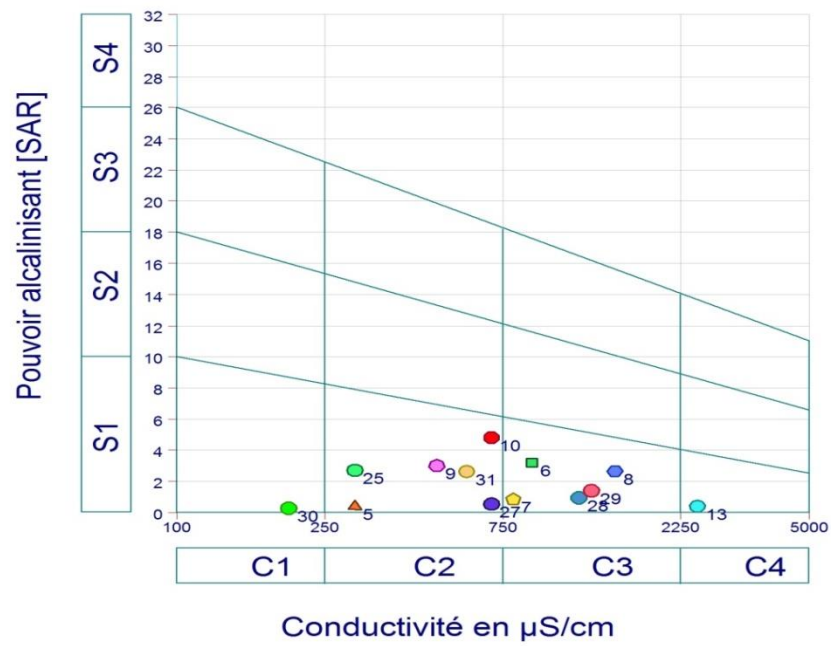


Figure 83. Classification des eaux souterraines selon le diagramme de Richards (première campagne)

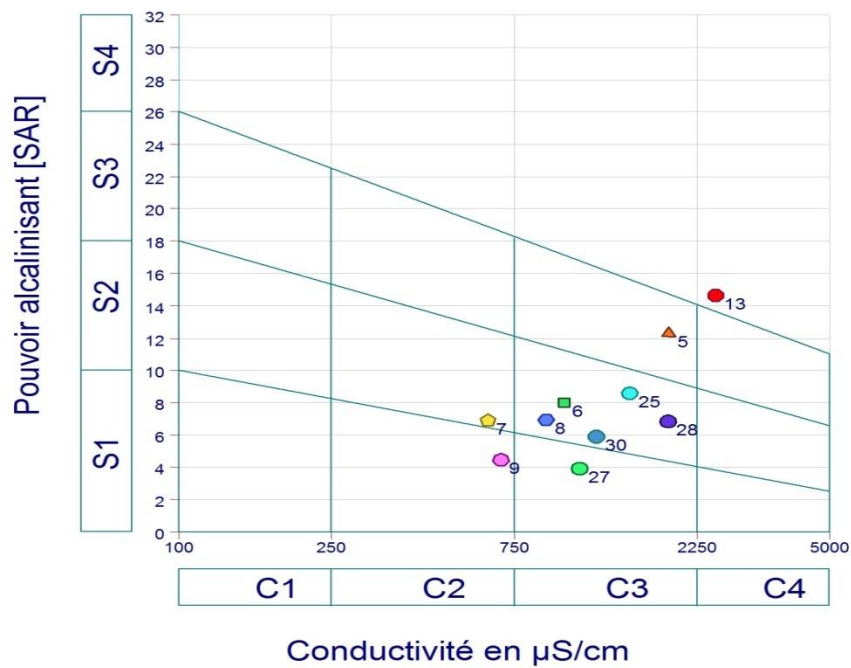


Figure 84. Classification des eaux souterraines selon le diagramme de Richards (deuxième campagne)

Conclusion générale

Le but de cette étude est de connaître l'état actuel de la salinité des eaux du lac Fetzara, et d'identifier les différentes relations entre les ions azotés tels que nitrites, nitrates et ammonium avec la dynamique des sels solubles des eaux de surface et souterraines du lac. Ce site est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-Est algérien.

L'analyse des données climatiques montre que le climat de la région est de type méditerranéen caractérisé par une pluviométrie avoisinant 670.7 mm/an répartie selon les deux saisons ; l'une chaude et sèche s'étant du début du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre et l'autre froide et humide s'étalent du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, c'est durant la saisons sèche que le taux d'évapotranspiration est très élevée dépassent le total des précipitations mettant en évidence un déficit au cours de l'année, accentuant donc le phénomène de salinité des eaux.

Par ailleurs, le terme du bilan calculé montre une infiltration efficace entre 90 mm/an à la station des salines et 131.75mm/an à la station de Pont Bouchet, le ruissellement est important avoisinant 115 mm/an pour les deux stations. Ces derniers aboutissent au lac par les oueds, ceci se traduit par des apports considérables au lac et aux nappes, causants des changements de la qualité de leurs eaux.

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

Le diagramme de Piper réalisé à partir de l'ensemble des analyses chimiques, montrent que les eaux étudiées présentent deux faciès chimiques l'un chloruré-sodique et potassique et l'autre sulfaté sodique.

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques, a permis d'identifier trois principaux processus qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone, ce sont le phénomène de dissolution/précipitation des formations évaporitiques et carbonatées concentrés par évaporation. Le second processus seraient le phénomène d'échange ionique et enfin le processus d'oxydo-réduction.

L'étude des indices de saturation a montré que durant la première campagne (Décembre 2013), les eaux de surface et souterraines du lac présentent une sous-saturation vis-à-vis de la calcite, anhydrite, aragonite, dolomite, gypse. Par conséquent une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux, donc accroissement probable de la

minéralisation. Les résultats ainsi obtenus pendant la deuxième campagne (Mai 2014) indiquent une sous-saturation par rapport au gypse, l'halite et l'anhydrite et une sursaturation par rapport à la dolomite et calcite et par conséquent une éventuelle précipitation de ces minéraux. La dissolution de l'halite a pour conséquence l'augmentation la concentration des ions Cl^- et Na^+ et la dissolution du gypse a pour conséquence l'élévation des concentrations des ions Ca^{++} et SO_4^{--}

Les eaux de surface et souterraines dans la zone d'étude sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (gypse, l'halite et l'anhydrite) pendant toutes les saisons et sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) en saison pluvieuse, et retourne durant la saison sèche à l'état de sous-saturation.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter, surtout sous la forme de dolomite et calcite, alors que les minéraux évaporitiques en l'occurrence l'halite, le gypse et l'anhydrite tendent à la dissolution. En définitive, les processus de concentration par évaporation, dissolution/précipitation des minéraux carbonatés et évaporitiques et la dilution après la saison pluvieuse sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

Les relations entre les ions azotés et les sels solubles sont comme suit :

Les nitrites ont des relations positives avec : Ca^{++} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et la conductivité électrique en Décembre 2013 et avec Ca^{++} , Cl^- , Mg^{++} , pH et la conductivité électrique en Mai 2014, pour les eaux de surface. Dans les eaux souterraines, cette relation est positive avec Ca^{++} en saison sèche (Décembre 2013) et Na^+ et NO_3^- en saison humide (Mai 2014).

Dans les eaux de surface, les sels solubles qui ont des relations significatives avec les nitrates en période estivale sont Ca^{++} , Cl^- , Mg^{++} , NO_3^- et la conductivité électrique, avec Mg^{++} et SO_4^{2-} en période hivernale. Dans les eaux souterraines seuls le K^+ et le Ca^{++} présentent des relations fortes en Décembre 2013, le K^+ et les NO_3^- en Mai 2014.

Les ions ammonium ont des relations positives avec pH en Décembre 2013 et avec Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} et la conductivité électrique en Mai 2014, pour les eaux de surface. Dans les eaux souterraines, cette relation est positive avec Cl^- , K^+ , Mg^{++} et la conductivité électrique en saison sèche (Décembre 2013) et Ca^{++} et HCO_3^- en saison humide (Mai 2014).

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

Enfin nous proposons que :

- Continue les analyses de ces échantillons en période sèche et humide pour faire une comparaison entre le changement de la qualité des eaux du lac pendant les années prochaine.
- Faire la relation entre les sels solubles et d'autres sels : le Fer, le cuivre.....etc

Références bibliographiques

- ✓ **A.J.C.I, 1985** – Etude de la faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara, volume 3. Agence Japonaise de Coopération Internationale 150 p.
- ✓ **Ahmed – Salem M, 2012-** Approche hydrodynamique de la nappe du Trarza Sud-Ouest de la Mauritanie. Thèse Doct. Paris-Sud. 148p.
- ✓ **Ahmed – Said Y et Leake, 1993–** The Edough leptynites, Annaba, NE Algeria, are they good indicators to the origin of the biotite gneisses. Bulltin du service Géologique de l'Algérie, volume 4, (2). pp 99-107.
- ✓ **Alayat H, et Lamouroux C., 2007** – Caractérisation physico-chimique des eaux thermominérales des Monts de la cheffia (Extrême N-E Algérien). GEO-ECO-Marina13, Coastal Zone processes and management. Environmental Legislation, 75-84.
- ✓ **Allégre C., Manhés G, et Lewin E., 2001-** Chemical composition of the Earth and the volatility control on planetary genetics, Earth Planet. Sci. Lett., 185, 46–69.
- ✓ **A.N.R.H , 2000** – Agence nationale des ressources hydraulique. Algérie
- ✓ **Azzaouai S , 1999-** Métaux lourds dans le bassin versant du Sebou, géochimie, source de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse Doct. Univ. IbnTofail, Kénitra, Maroc ; 130p.
- ✓ **Badraoui M. Soudi S , et Farhat A , 1998-**Variation de la qualité des sols : une base pour évaluer la durabilité de la mise en valeur agricole sous irrigation par pivot au Maroc. *Institut Agronomique et Veterinaire Hassan II* , Rabat, pp 227-233.
- ✓ **Banton O, et bangoy L. M, 1999-** Hydrogéologie multisciences environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec ; 460p.
- ✓ **Belhamra A., 2001-** Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer, Mém de Magistère, Dépt de Science de la Mer, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, 110 p.

- ✓ **B.N.E.D.E.R, 2004** – Etude agro-pédologique du lac Fetzara. Bureau Nationale d’Etude pour le Developpement Rural.
- ✓ **Boujemaa S., 2010** – Cartographie des relations sol-eau-végétation dans un milieu salé (lac Fetzara), Mém. de Magistère, Dépt. de Biologie, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, 105 p.
- ✓ **Benoune A., Laouar L., Ramoul H., 1986.**Essai d’aménagement d’une commune sub-littorale (cas d’El Hadjar). Mém d’ing. Univ Constantine. 123 p.
- ✓ **Boumezbeur H., 1994** - an investigation of the physical-mechanical indices in igneous rocks and their aggregates. Thèse. Doct en géologie Univ. Glasgow 261p.
- ✓ **Bourhane A, 2010-** Discrimination de l’origine de la salinité des masses d’eaux souterraines : contexte hydrogéologique et méthode d’étude, Géosciences Réunion, BRGM , Univ. Avignon ; 108p
- ✓ **Bouziane., 2000** – L’eau de la première aux maladies Ed. Ibn Khaldoun Alger. 247p
- ✓ **Bowden W. B., 1987.** The biogeochemistry of nitrogen in Freshwater wetlands. Biogeochemistry 4 (3): 313-348.
- ✓ **Chapelle F. H, 1993-**Ground-water microbiology and geochemistry, John Wiley & Sons, Inc. NY ; 93p.
- ✓ **Curie F , 2006** Rétention de nitrates dans les zones humides riveraines : Rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelles dans le bassin de la Seine. Thèse Doct. Univ. Paris VI ;211p.
- ✓ **Daniel J.Y., Brahic A., Hoffert M., Schaff A. et Tardy M., 1999,** Sciences de la Terre et de l’Univers. Vuibert, Paris, 634p.
- ✓ **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. Thèse Doct, Univ. Franche-Comté ; 199 p.

- ✓ **Derradji F. Kherici H. et Caruba R., 2005-** Etude de la drainance dans un système de nappes superposées. Exemple de la nappe d'Annaba (Nord-Est d'Algérie). *La Houine Blanche*, N°1 , pp 65-72

- ✓ **Djamai R., 1993** –Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Mémoire de Magistère, Institut National Agronomique, Alger ; 78p

- ✓ **Djamai R., 2007** – Contribution a l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Approche géochimique et évolution spatio-temporelle des phénomènes. Doct. d'Etat Sci. Agro ; Inst. Nat. Agro, Alger ; 168p.

- ✓ **Djamaï R., Fadel D., Laïfa A., Benslama M., Daoud Y. et Vallès V., 2011.** Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Rev. Sc. Tech., Synthèse, Univ. Badji Mokhtar, Annaba*, 23 : 90-98.

- ✓ **Droubi A, 1976-**Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doct. Univ. Strasbourg ; 177p.

- ✓ **Droubi A., Fritz B., Gac J., et Tardy Y., 1978-** Generalized residual alkalinity concept. Application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Sciences* ; 280: 560-572.

- ✓ **Durant J. H., 1950** – Contribution à la reprise d'une expérience agricole sur les terres domaniales du lac Fetzara, Direction du service de l'hydraulique, (Annaba). 112p + carte.

- ✓ **El Blidi S., Fekhaoui M., El Blidi A., Idressi L., et Benazzou T.; 2003-** Contamination des rizières de la plaine du Gharb (Maroc) par des métaux traces. *Vecteur Environnement* ; 46-53.

- ✓ **Enfield C.G., et Yates S.R., 1990.** Organic chemical transport to groundwater. Pesticides in the soil environment: processes, impact and modeling. *Soil Science Society of America*. (2) : 271-302.

- ✓ **Fekrache F., 2015.** Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara – Annaba (Algérie). Thèse de Doctorat, Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 150 p.

- ✓ **Gaby R., Hammor D., 1992.** Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un "Metamorphic Core complex" d'âge miocène dans les Maghrébides. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre, 314 (08) 829-835.

- ✓ **Gleizes G., Bouloton J., Bossiere G., Collomb P., 1988.** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est-Algérien). C. R. Acad. Sci. Paris, t. 306, Série II, p. 1001-1008.

- ✓ **Habes S., 2006** – Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara, Est algérien (Annaba) Mém de Magistère, Dépt de géologie, Univ Badji Mokhtar, Annaba, 105 p.

- ✓ **Habes S., 2013** – Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; cas : lac Fetzara Nord-Est Algérien. Thèse Doct., Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 168 p.

- ✓ **Hani A., 2003-** Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropique : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen, Thèse Doct. Géologie appliquée. 214p.

- ✓ **Haycock et al, 1993-**

- ✓ **Heathwaite A.L, 1993-** Nitrogen cycling in the surface waters and lakes: process patterns management, Burt t.p. et al. (ed). Wiley J, & sons, Chichester, England, p 99-140.

- ✓ **Hilly J, 1962-** Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de fer (Est Constantinois). Bull. n°19, carte géologique Algérie, Alger, 339p.

- ✓ **Holloway J. M., Dahlgren R. A., 2002-** Nitrogen in rock: occurrences and biogeochemical implications. Global Biogeochemical Cycles, 16(4):65-1.

- ✓ **Ifagraria, 1967-** Etude générale de la mise en valeur agricole des plaines cotières d'Annaba, Soc. Ifagraria, Rome, 169 p.

- ✓ **Joleand, 1936** – Etude géologique de la région de Bône et de la Calle. Bull. Serv. Carte Géologique de l'Algérie. 2^osérie, 12, 200p.
- ✓ **Khalfaoui H, 2014** – Modélisation des écoulements et de transport de masse dans une région industrielle : Exemple de la nappe de Berrahal, Nord- Est Algérien.thèse. doct. Dept. Géologie.
- ✓ **Kouakou, 2007**-Etude de la nitrification partielle d'eau ammoniacales, ulg , fsa, 75p
- ✓ **Laouar R., Boyce A.J., Ahmed-Said Y., Ouabadi A., Fallick A.E. et Toubal A., 2002.** Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, North-East Algeria. Journal of African Earth Sciences, 35 (2) : 271-283.
- ✓ **Majour H, 1996** –Utilisation de l'analyse statistique pour l'étude de fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de reservoir cricallin de l'edough (Nord-Est Algérien) Mém. de Magistère, Dépt de Géologie. Univ de Annaba., 116 p.
- ✓ **Majour H, 2010**- Qualité des eaux du massif de l'Edough et de son piedmont sud « Berrahal » apport des éléments majeurs et traces dans l'identification d'une pollution industrielle. PHD Thèse.p135.
- ✓ **Marignac C, 1976** – Mise en évidence des successions paragénetiques dans les principaux filons minéralisés du district filonien polymétallique d'Ain-Barbar (Wilaya d'Annaba Algerie). Science de la terre XX 4 , pp 333-401
- ✓ **Marignac C., 1985**- Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord. Thèse Doct. I.N.P. Lorraine, Nancy, France.
- ✓ **Marre A., 1992** – Le Tell oriental algérien de Collo à la frontière tunisienne, Etude géomorphologique, volumes 1 et 2, O.P.U, Alger.

- ✓ **Mariotti M ., 1982** -Apport de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 476 p.

- ✓ **Metahri M. S., 2012**- Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou.

- ✓ **Mudry J., et Blavoux A. ; 1986**- Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. Hydrogéologie ; 1 :53-59.

- ✓ **Ndembo langoj., 2009** - Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba. Thèse Doct, Univ-Avignon, 203p.

- ✓ **OMS, 1993**- Organization Mondiale De La Santé, directive de qualité pour les eaux de boisson
- ✓ **ONS , 2016**- Office national des statistiques.

- ✓ **Pauwells H., Martelat A., Foucher J.C et Lachassagne P. 1996.** Dénitrification des eaux souterraines du bassin versant du Coet-Dan : Suivi géochimique et hydrogéologique du processus. Rapport B.R.G.M., R 39055, Orléans, France. 66p.

- ✓ **Peter-Borie M., Lucassou F.,b et Aubie S. ; 2009** – Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral basique français, observation de la cote Aquitaine, BRGM, France ; 31p.

- ✓ **Piper A .M , 1944** – Agraphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. American. Geophysical Union. Tronc, 914-923.

- ✓ **Rahoui M. Soudi B. Badraoui M. Marcoen J.M. et Benzakour M., 2000**- Situation actuelle de la qualité des sols et des eaux des périmètre irrigué des Doukkala. *Séminaire Intensification Agricole et Qualité des Sols et des Eaux*, Rabat, pp 13-24.

- ✓ **Ramade F., 2005** – Elément d'écologie, Ecologie appliquée. 6^e édition . Cours. Licence/ Master. Ecole d'ingénieurs. 864p.

- ✓ **Rodier J., 1978** – L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de me. Edition. Dunod Technique. 1136p.
- ✓ **Ruffinoni C., 1994** - Rôle des ripisylves dans la réduction des pollutions azotées diffuses en milieu fluvial. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier ;158 p
- ✓ **Schlesinger W. H, 1997-** Biogeochemistry – An Analysis of Global Change, Academic, San Diego, Calif., p 588.
- ✓ **Sekiou F, et Kellil A., 2014-** Caractérisation et classification empirique, graphique et statistique multivariable d'eaux de source embouteillées de l'Algérie. *Larhyss journal*, n°20, 225-246p
- ✓ **Thornthwaite C. W., et Mather J. ; 1957-** instruction and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. *Philadelphia Publications in Climatology*; 10(3): 185-311.
- ✓ **UE, 1998-**
- ✓ **Vallet-Coulomb C., Radakovitch O., De Montety V., Hermitte D., Sonzogni C., Ollivier P., et Paul M.; 2009-** Salinisation de l'eau souterraine en Camargue. In : Monaco A., Ludwing, w., Provansal, M., and Picon, B., le golf du lion: un observatoire de l'environnement en Méditerranée. Editions : Quae ; 151-161.
- ✓ **Villa J. M., 1980-** La chaine alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens. Thèse Doct. Univ. Pierre et Marie-Curie. Paris VI, France, 58-68p.
- ✓ **Zahi F., 2008** – La qualité des eaux et des sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est d'Algérie). Mém. de Magistère, option : Géosciences. Univ de Annaba, Dépt de Géologie. 122 p.
- ✓ **Zahi F., 2013-** Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Rev. Sci. Tech., Synthèse, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, 26 : 86-95.

- ✓ **Zahi F., 2014-** Contribution à l'étude hydrochimique du bassin versant du lac Fetzara. Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse. Doct en géologie appliquée, option hydrogéologie, Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 159 p.

- ✓ **Zenati N., 1999** – Relation Nappes-Lac Fetzara ; Confirmation par l'hydrochimie. Cas de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E Algérien. Mém. Magistère, option : Chimie et environnement. Univ Badji Mokhtar Annaba, Dépt de Chimie. 151 p.

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

Sites visité sur internet

- ✓ **Lenntech, 2011** : www.lenntech.fr/data-perio/n.htm
- ✓ **XCEL STAT 2015**

Liste des tableaux	Page
Tableau 1 : Taux de dénitrification mesuré dans différents milieux modifiés.....	16
Tableau 2 : Evaluation de la perturbation du cycle de l'azote par apport des nitrates anthropogènes à la biosphère (2005)	16
Tableau 3 : Limites acceptables de l'azote dans l'eau (in Bouziane, 2000)	19
Tableau 4 : Quelques caractéristiques du sous bassin versant du lac Fetzara (d'après A.N.R.H, 2000).....	28
Tableau 5 : Les unités industrielles contribuant à la pollution (A.N.A.T 1993).....	35
Tableau 6 : Répartition de la wilaya d'Annaba (ONS 2008).....	35
Tableau 7 : Coordonnées géographiques des stations de mesure (1980-2014).....	37
Tableau 8 : Précipitations moyennes mensuelles (mm).....	37
Tableau 9 : Précipitations annuelles (mm) et coefficient pluviométrique des stations Les Salines et Pont Bouchet (1980-2014).....	39
Tableau 10 : Températures moyennes mensuelles (°C) à la station Les salines (1980-2014)....	40
Tableau 11 : Moyennes mensuelles de l'Humidités relatives (Les salines 1984-2013).....	42
Tableau 12 : Moyennes mensuelles de la vitesse des vents (Les salines 1984-2013).....	42
Tableau 13 : ETP obtenue par la formule de thornthwaite Les salines (1980-2014).....	43
Tableau 14 : Ruissellement pour les deux stations (1980-2014).....	44
Tableau 15 : Infiltration pour les deux stations (1980-2014).....	45
Tableau 16: Bilan hydrique par la méthode de « thornthwaite » (les salines 1980-2014).....	46
Tableau17. Bilan hydrique par la méthode de « Thornthwaite » (Pont Bouchet 1980-2014)....	46
Tableau 18: Faciès hydrochimiques et contextes géologiques (Banton et Bangoy, 1999).....	54
Tableau 19 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Décembre 2013).....	57
Tableau 20 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Mai 2014).....	57
Tableau 21 : Matrice des corrélations des eaux de surface (Décembre 2013).....	58

Tableau 22: Matrice des corrélations des eaux de surface (Mai 2014).....	58
Tableau 23: Variance des quatre premiers axes factoriels (Décembre 2013).....	61
Tableau 24 : Variance des quatre premiers axes factoriels (Mai 2014).....	61
Tableau 25 : Matrice des corrélations des eaux souterraines (Décembre 2013).....	62
Tableau 26: Matrice des corrélations des eaux souterraines (Mai 2014).....	62
Tableau 27: Echelle de salinité des eaux (d'après USSL, 1954).....	70
Tableau 28: Rapport Na^+/Cl^- , indices d'échange de base (IEB) et indice de saturation (IS).....	85
Tableau 29 : Indice de saturation des eaux de surface (Décembre 2013).....	88
Tableau 30 : Indice de saturation des eaux de surface (Mai 2014).....	89
Tableau 31 : Indice de saturation des eaux souterraines (Décembre 2013).....	90
Tableau 32 : Indice de saturation des eaux souterraines (Mai 2014).....	90
Tableau 33 : Classification des eaux du lac Fetzara selon la dureté (TH en °F).....	91
Tableau 34 : Coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrites et les différents sels solubles.....	92
Tableau 35 : Coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrites et les différents sels solubles.....	97
Tableau 36 : Coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrates et les différents sels solubles...	100
Tableau 37 : Coefficients de corrélation (R^2) entre les nitrates et les différents sels solubles...	102
Tableau 38 : Coefficients de corrélation (R^2) entre ammonium et les différents sels solubles...	105
Tableau 39 : Coefficients de corrélation (R^2) entre ammonium et les différents sels solubles...	108
Tableau 40 : Récapitulatif des relations entre les éléments azotés et les autres sels solubles des eaux de surface.....	111
Tableau 41 : Récapitulatif des relations entre les éléments azotés et les autres sels solubles des eaux souterraines.....	111
Tableaux 42 : Evolution des classes d'irrigation selon Richard (1954).....	112

Liste des figures	Page
Figure 1: Cycle de l'azote modifié (Kouakou, 2007).....	12
Figure 2 : Schéma réactionnel de la minéralisation de l'azote (Metahri, 2012).....	17
Figure 3 : Situation géographique du lac Fetzara (Fekrache, 2015).....	22
Figure 4 : Coupes géologiques entre l'Edough et Ain Berda par le lac Fetzara (Vila, 1980 ; b Joleaud,1936).....	24
Figure 5 : Principaux sous bassins versants du lac Fetzara (Khalfaoui, 2014).....	27
Figure 6 : Coupe schématique du système aquifère de la région d'Annaba (Derradji et al, 2005).....	28
Figure 7 : Situation géographique des nappes superficielles de la plaine d'Annaba (Habes, 2006).....	30
Figure 8 : Répartition des classes des sols du lac Fetzara (A.J.C.I , 1985).....	31
Figure 9 : Carte d'occupation du sol par l'industrie autour du lac Fetzara (Zenati, 2010).....	34
Figure 10 : Précipitations moyennes mensuelles (Les Salines et Pont Bouchet 1980-2014)	38
Figure 11 : Températures moyennes mensuelles Les Salines (1980-2014).....	40
Figure 12 : Diagramme pluviométrique de la station Les Salines 1980-2014.....	41
Figure 13 : Diagramme pluviométrique de la station Pont Bouchet 1980-2014.....	41
Figure 14: Humidité relative (Les Salines 1980-2014).....	42
Figure 15 : Vitesse des vents (Les Salines 1984-2014).....	42
Figure 16 : Représentation graphique du bilan hydrique pour la station Les Salines (1980-2014).....	47
Figure 17 : Représentation graphique du bilan hydrique pour la station Pont Bouchet (1980-2014).....	47
Figure 18 : Situation des sites d'échantillonnage des eaux	52
Figure 19 : Différents faciès hydrochimiques dans le diagramme de Piper	54

Figure 20: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (Décembre 2013).....	60
Figure 21: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (Décembre 2013).....	60
Figure 22: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (Mai 2014).....	61
Figure 23: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (Mai 2014).....	61
Figure 24: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (Décembre 2013).....	63
Figure 25: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (Décembre 2013).....	63
Figure 26: Contribution des différentes variables dans le plan factoriel (Mai 2014).....	64
Figure 27: Contribution des différents individus dans le plan factoriel (Mai 2014).....	64
Figure 28: Dendogramme de classification hiérarchique.....	65
Figure 29: Diagramme de Piper des eaux de surface (Décembre 2013).....	67
Figure 30: Diagramme de Piper des eaux de surface (Mai 2014).....	68
Figure 31: Diagramme de Piper des eaux souterraines (Décembre 2013).....	68
Figure 32: Diagramme de Piper des eaux souterraines (Mai 2014).....	69
Figure 33: Variations de la conductivité électrique des eaux de surface.....	70
Figure 34: Variations de la conductivité électrique des eaux souterraines.....	71
Figure 35: Variations du pH des eaux de surface.....	72
Figure 36: Variations du pH des eaux souterraines.....	72
Figure 37: Variations des teneurs en chlorures des eaux de surface.....	73
Figure 38: Variations des teneurs en chlorures des eaux souterraines.....	73
Figure 39: Variations des teneurs en sulfates des eaux de surface.....	74
Figure 40: Variations des teneurs en sulfates des souterraines.....	75
Figure 41: Variations des teneurs en carbonates des eaux de surface.....	75
Figure 42: Variations des teneurs en carbonates des souterraines.....	76
Figure 43: Variations des teneurs en bicarbonates des eaux de surface.....	76
Figure 44: Variations des teneurs en bicarbonates des eaux souterraines.....	77

Figure 45: Variations des teneurs en nitrites des eaux de surface.....	77
Figure 46: Variations des teneurs en nitrites des eaux souterraines.....	78
Figure 47: Variations des teneurs en nitrates des eaux de surface.....	78
Figure 48: Variations des teneurs en nitrates des eaux souterraines.....	79
Figure 49: Variations des teneurs en calcium des eaux de surface.....	79
Figure 50: Variations des teneurs en calcium des eaux souterraines.....	80
Figure 51: Variations des teneurs en magnésium des eaux de surface.....	81
Figure 52: Variations des teneurs en magnésium des eaux souterraines.....	81
Figure 53: Variations des teneurs en sodium des eaux de surface.....	82
Figure 54: Variations des teneurs en sodium des eaux souterraines.....	82
Figure 55: Variations des teneurs en potassium des eaux de surface.....	83
Figure 56: Variations des teneurs en potassium des eaux souterraines.....	83
Figure 57: Variations des teneurs en ammonium des eaux de surface.	84
Figure 58: Variations des teneurs en ammonium des eaux souterraines.	84
Figure 59 : Rapport Na^+/K^+	85
Figure 60 : Rapport Na^+/Cl^-	85
Figure 61 : Rapport $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$	86
Figure 62 : Rapport $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4^{-2}$	86
Figure 63: Rapport $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{HCO}_3^-$	86
Figure 64: Rapport $[(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}) / (\text{SO}_4^{-2} + \text{HCO}_3^-)]/ \text{Na}^+/\text{Cl}^-$	64
Figure 65 : Variations des indices de saturation des eaux de surface (Décembre 2013).....	89
Figure 66 : Variations des indices de saturation des eaux de surface (Mai 2014).....	89
Figure 67 : Variations des indices de saturation des eaux souterraines (Décembre 2013).....	90
Figure 68 : Variations des indices de saturation des eaux souterraines (Mai 2014).....	91
Figure 69 : Classification des eaux du lac Fetzara selon la dureté.....	92
Figure 70 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux de surface (Décembre 2013).....	94

Figure 71 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux de surface (Mai 2014).....	96
Figure 72 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux souterraines (Décembre 2013).....	98
Figure 73 : Relation nitrites avec potassium, conductivité électrique, calcium, chlorures, sodium, magnésium, carbonates, bicarbonates, nitrates, sulfates, pH et ammonium des eaux souterraines (Mai 2014).....	99
Figure 74 : Relation nitrates avec chlorures, conductivité électrique, nitrites, sodium, sulfates, calcium, magnésium, potassium, carbonates, bicarbonates, pH et ammonium des eaux de surface (Décembre 2013).....	101
Figure 75 : Relation nitrates avec conductivité électrique, chlorures, calcium, potassium, sodium magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, nitrites, ammonium et pH des eaux souterraines (décembre 2013).....	103
Figure 76 : Relation nitrates avec conductivité électrique, chlorures, sodium, nitrites, potassium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, calcium, ammonium et pH des eaux souterraines (Mai 2014).....	104
Figure 77 : Relation des ions ammonium avec conductivité électrique, chlorures, sodium, potassium, magnésium, sulfates, carbonates, bicarbonates, calcium, pH, nitrites et nitrates des eaux de surface (Décembre 2013).....	106
Figure 78 : Relation des ions ammonium avec potassium conductivité électrique, magnésium, calcium, chlorures, sodium, sulfates, carbonates, bicarbonates, nitrites et nitrates des eaux de surface (Mai 2014).....	107
Figure 79: Relation des ions ammonium avec conductivité électrique, chlorures, magnésium, potassium, sodium, calcium, sulfates, pH, nitrites, nitrates, carbonates et bicarbonates des eaux souterraines (Décembre 2013).....	109
Figure 80 : Relation des ions ammonium avec calcium, carbonates, bicarbonates, conductivité électrique, chlorures, sodium, potassium, magnésium, carbonate, sulfates, pH, nitrites et nitrates des eaux souterraines (Mai 2014).....	110
Figure 81. Classification des eaux de surface selon le diagramme de Richards (première campagne).....	113

Figure 82. Classification des eaux de surface selon le diagramme de Richards (deuxième campagne).....	113
Figure 83. Classification des eaux souterraines selon le diagramme de Richards (première campagne).....	114
Figure 84. Classification des eaux souterraines selon le diagramme de Richards (deuxième campagne).....	114

Résumé

Le lac Fetzara est à 18 km d'Annaba, il a été officiellement classé comme une zone humide à protéger par la convention « Ramsar ». Le lac est affecté par le phénomène de salinisation.

L'objectif de ce travail est de situer les niveaux de salinité des eaux du lac Fetzara et de faire ressortir les relations : sels solubles et formes d'azote.

L'étude porte sur les eaux de surface, et souterraines.

Les résultats montrent que la salinité est plus élevée, au niveau de la région Sud-Est, avec un faciès chimique chloruré sodique à sulfatée sodique. La relation entre les sels solubles et les différentes formes d'azote est importante.

L'approche statistique à partir d'ACP montre que le processus responsable de la salinisation des eaux est la concentration de ces dernières sous l'effet de l'évaporation.

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

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

Mots clés : eaux ; sels solubles ; azote ; salinité ; hydrochimie ; lac Fetzara.

Abstract

Lake Fetzara is 18 km from Annaba and has been officially classified as a wetland to be protected by the Ramsar Convention. The lake is affected by the phenomenon of salinization.

The objective of this work is to situate the salinity levels of the waters of Lake Fetzara and to highlight the relationships: soluble salts and forms of nitrogen.

The study focuses on surface and underground water.

The results show that salinity is higher in the South-East region with a chemical chloride faecal sodium to sulphate sodium. The relationship between soluble salts and different forms of azote is important.

The statistical approach based on PCA shows that the process responsible for the salinization of water is the concentration of the latter under the effect of evaporation.

The processes of concentration by evaporation, dissolution / precipitation of minerals calcite and evaporites and dilution after the rainy season, are responsible for seasonal variations chemistry in water.

The study of the suitability of water for irrigation revealed that the majority of samples have an acceptable quality. These waters are generally acceptable for irrigation salt-tolerant crops on well-drained soils but requiring control of salinity.

Keywords: water, soluble salts, azote , salinity, hydrochemistry, lake Fetzara.

تعتبر بحيرة فتزارة محمية ضمن اتفاقية "رامسار" حيث تقع في الشمال الشرقي الجزائري على مسافة 18 كم من مدينة عنابة حيث أن البحيرة تعاني من ظاهرة الملوحة.

نهدف من خلال هذا العمل إلى معاينة درجة ملوحة المياه السطحية و الجوفية من اجل ذلك قمنا بأخذ عينات من المياه السطحية و الجوفية الاطلاع على الخصائص الفيزيائية و الكيميائية المهددة بظاهرة الملوحة و تبيان العلاقة بين هذه الخصائص و مختلف أنواع الازوت في الماء.

من خلال دراسة نتائج التحاليل المتوصل إليها و التي أجريت على المياه السطحية و المياه الجوفية فقد بينت وجود درجة ملوحة عالية خاصة في الجنوب الشرقي للبحيرة كما انه توجد علاقة بين مختلف الأملاح الموجودة في المياه و مختلف أنواع الازوت كما أوضحت الدراسة الإحصائية أن ارتفاع تركيز ملوحة مياه البحيرة تعود الى ظاهرة التبخر.

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

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

الكلمات المفتاحية

المياه – الأملاح المذابة- الازوت- الملوحة- الهيدروكيمياء - بحيرة فتزارة

Annexes



Dosage du calcium



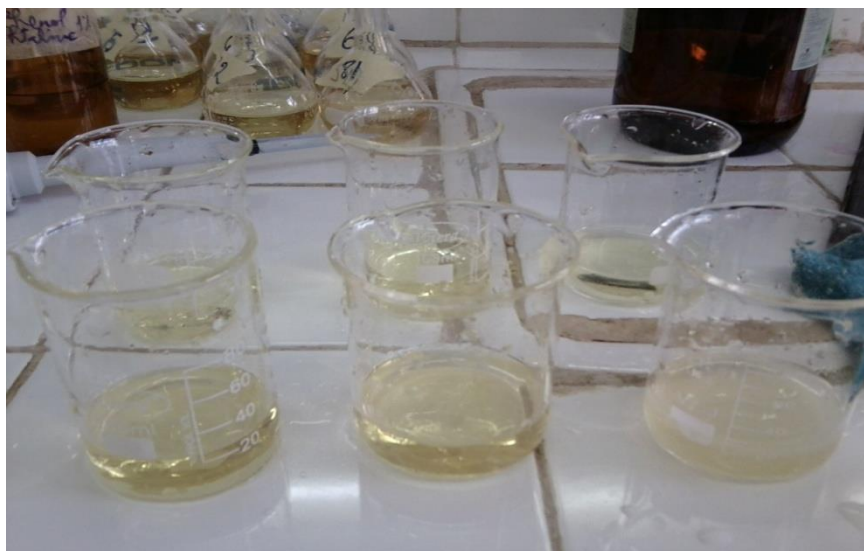
Dosages du magnésium



Dosages du carbonates et bicarbonates



Dosages des chlorures



Dosages des nitrates

