

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar – Annaba
Faculté des Sciences de la Terre



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية علوم الأرض

Département de géologie

قسم الجيولوجيا

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat Troisième Cycle

Filière : Hydrogéologie

Spécialité : Hydrogéologie

Par :

BOUHALI Zahra

Thème :

Estimation des apports et des exhaures du lac Fetzara et analyses des données sur deux cycles hydrologiques (2016/17 et 2017/18)

Thèse soutenue le : 04/07/2024 ; devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Salah-Eddine TACHI	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Larbi DJABRI	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	Nabil BOUGHERIRA	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
04	Nassima SEDRATI	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
05	Lassâad GHRIEB	Prof.	Université 8 mai 1945 - Guelma	Examineur
06	Farid ROUABHIA	MCA	ENSC Assia DJEBAR - Constantine	Examineur

" تقدير التدفقات الداخلة والخارجة لبحيرة فتزارة وتحليل البيانات المتعلقة بالدورتين الهيدرولوجيتين (17/2016 0 18/2017)"

الملخص:

تتغذى بحيرة فتزارة بالمياه من مصادر مختلفة، ولكن قبل أن تتدفق إلى حوض البحيرة، تخضع هذه المياه لتغيرات كبيرة في تركيبها وكميتها. يتم تغذية البحيرة من خلال واد زياد والملاح والحوت، تعبر مياه هذه الاودية قبل وصولها إلى البحيرة عدة تضاريس جيولوجية ذات تركيبات متغيرة، ولا سيما التكوينات المتحولة المكونة بشكل خاص من النيس والشست في الشمال، والتكوينات الرسوبية على مستوى عين الباردة التي تحتوي على الحجر الجيري والطين جنوبا وغربا اين يقع سهل عنابة الذي تشكل البحيرة جزءا منه والذي يتميز بوجود تكوينات العصر الرباعي والمتبخرات. تؤدي هذه التكوينات المختلفة إلى تغيرات ملحوظة في نوعية المياه، حيث تختلف السحنات الكيميائية المحددة من منطقة إلى أخرى، فهي إما كلوريد الصوديوم أو كبريتات الكالسيوم.

التغيرات الملحوظة ناجمة عن ظاهرة التخفيف، حيث تأتي المياه التي تغذي البحيرة من مرتفعات الإيدوغ (800م) وعين الباردة (150م). أثناء تدفقه، يصبح الماء غنياً بالعناصر الكيميائية اعتماداً على الطبيعة الصخرية للتضاريس التي يتم عبورها. ويفسر هذا الاختلاف بالتخفيف الناتج عن التحلل المائي للسيليكات الموجودة في التكوينات المتحولة لجبال الإيدوغ. وبالإضافة إلى ذلك، فإن النموذج المنتج يؤكد الارتباط الموجود بين التركيب الكيميائي والتمعدن، حيث أن الأخير يحدث بواسطة الصوديوم والبوتاسيوم والكلور والكالسيوم، وهي أهم العناصر في أصل الناقلية الكهربائية.

يعتمد هذا العمل على رسم الخرائط باستخدام أداة الاستشعار عن بعد مع تفسير نتائج المعالجات المتعددة الأطياف المختلفة لصور الأقمار الصناعية، وتحديد الفئات الثلاث (سطح الماء، والغطاء النباتي، والتربة العارية). من خلال التعرف على التضاريس، تمكنا في تنفيذ مرحلة التعلم من خلال تحديد العتبات الجديدة المحسوبة، مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) ومؤشر المياه (NDWI).

كلمات مفتاحية: بحيرة فتزارة، التحلل المائي، الوادي، التخفيف، النموذج العصبي.

«Estimation des apports et des exhaures du lac Fetzara et analyses des données sur deux cycles hydrologiques 2016/17 et 2017/18) »

Résumé :

Divers horizons contribuent à l'alimentation du lac Fetzara en eau, mais avant se déverser dans la cuvette du lac, ces eaux subissent des modifications assez significatives de leurs qualités et quantité. L'alimentation du lac se fait par le biais des Oueds Zied, El Mellah et El Hout, ces eaux avant leur aboutissement au lac traversent plusieurs terrains à géologie variable, notamment les formations métamorphiques constituées particulièrement de gneiss et de schistes au Nord , les formations sédimentaires d'Ain Berda renfermant des calcaires et des argiles au sud, à l'Ouest la plaine d'Annaba dont le lac fait partie est caractérisée par la présence de formations d'âge Quaternaire et par les évaporites .Ces formations entraînent des modifications appréciables de la qualité des eaux en effet les faciès chimiques déterminés diffèrent d'une zone à l'autre, ils sont soit chloruré sodique soit sulfaté calcique.

Les changements observés sont engendrés par le phénomène de dilution qui semble s'effectuer, en effet les eaux alimentant le lac proviennent des hauteurs de l'Edough et d'Ain Berda situés respectivement à 800 m et 150 m d'altitude. Au cours de leurs écoulements les eaux s'enrichissent ou s'appauvrissent en éléments chimiques selon la nature lithologique des terrains traversés. Cette modification s'explique par la dilution provoquée par l'hydrolyse des silicates contenus dans les formations métamorphiques de l'Edough. En plus, le modèle réalisé confirme le lien existant entre la composition chimique et la minéralisation, cette dernière est induite par le sodium Na^+ potassium K^+ , les chlorures Cl^- et calcium Ca^{2+} , ce sont les éléments les plus importants à l'origine de la conductivité électrique.

Ce travail s'appuie sur la cartographie par l'outil télédétection avec l'interprétation des résultats de différents traitements multi spectrales des images satellitaires, en déterminant les 3 classes (surface d'eau, Couvert végétal, et Sol nu). À l'aide de la reconnaissance du terrain, cela nous a aidé à effectuer la phase d'apprentissage par seuillage des nouvelles bandes (néo-canaux) calculées (indice de végétation (NDVI) et indice de l'eau (NDWI)).

Mots clés : Lac Fetzara, hydrolyse, Oued, dilution, Modèle neuronal.

« Estimation of inflows and outflows of Lake Fetzara and analyzes of data on two hydrological cycles (2016/17 and 2017/18) »

Abstract:

The waters of lake Fetzara come from different sources but before flowing into the lake basin, these waters are exposed to many significant changes either in their qualities or in their quantities. The lake is fed through the Oueds Zied, El Mellah and El Hout, these waters before reaching the lake cross several terrains with variable geology, in particular the metamorphic formations made up of gneiss and schist in the North. The formation of sedimentary deposits of Ain Berda containing limestones and clays to the south and to the west of the Annaba plain which is characterized by the presence of formations of quaternary age and by evaporates. These significant changes in water quality determined differ from one zone to another, it is either sodium chloride or calcium sulfate.

The changes observed are caused by the phenomenon of dilution, in fact the water supplying the lake comes from the heights of Edough and Ain Berda which is located respectively at 800 m and 150 m altitude. During its flow, water becomes enriched in chemical elements depending on the lithological nature of the terrain crossed. This modification is explained by the dilution caused by the hydrolysis of the silicates contained in the metamorphic formations of Seraidi. In addition, the model produced confirms the existing link between the chemical compositions and mineralization, the latter is induced by sodium Na^{2+} potassium k^{+} , chlorides Cl^{-} and calcium Ca^{2+} , which are the most important elements at the origin of electrical conductivity.

This work is based on making a mapping by the remote sensing tool with the interpretation of the results of different multispectral treatments of satellite images, determining the 3 classes (water surface, vegetation cover, and bare soil). Using the terrain recognition, this helped us to carry out the learning phase by thresholding the new bands (neo-canal) calculated (vegetation index (NDVI) and water index (NDWI)).

Key words: Lake Fetzara, hydrolysis, Oued, dilution, Neuronal model.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

J'adresse mes humbles remerciements :

A mon directeur de thèse, professeur **Larbi DJABRI**, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa disponibilité. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me diriger au cours de l'élaboration de cette thèse.

A monsieur le docteur **Salah-Eddine TACHI** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ce travail ; qu'il veuille bien accepter ma sincère reconnaissance.

A monsieur le professeur **BOUGHERIRA Nabil** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de siéger dans le jury de cette thèse malgré ses multiples occupations. Qu'il veuille bien trouver l'expression de ma profonde gratitude pour sa disponibilité tout au long de ce travail.

A madame professeur **Nassima SEDRATI**, à messieurs le professeur **Lassâad GHRIEB** et le docteur **Farid ROUABHIA**, pour avoir m'honoré d'accepter de siéger parmi le jury de cette thèse.

A monsieur le docteur **Hamza BOUGUERRA**, le chef de département de géologie, qui m'as fourni des données nécessaires pour bien mener à ce travail en me partageant son expérience en outil logiciel et pour ses orientations.

Je tiens à remercier particulièrement messieurs le professeur **Azzedine HANI** et le professeur **Hicham CHAFFAI**, pour toutes leurs orientations et leurs conseils qui m'ont accompagné tout au long de mon cursus. Veuillez accepter mes sincères remerciements.

Mon profond respect et ma gratitude à monsieur le docteur **Lamine SAYAD**, pour son soutien moral, son aide et ses encouragements.

A madame **Dalila** secrétaire de directeur du laboratoire REDD, ainsi à madame **Djamila**, ingénieur du laboratoire REDD, pour leur soutien et aide en paperasses et matériels. Ainsi qu'à tous les enseignants et les administrateurs du département de Géologie.

Je remercie vivement messieurs **Nabil MOUCHARA** et le docteur **Abdelkader ZERARKA**, qui m'enseignaient en licence pour m'avoir bien formé. Je leur doit mon profond respect et ma sincère gratitude.

Mes remerciements vont également à mes chers collègues docteur **Abdelwahid BENCHAIB** et docteur **Kheireddine KHELIFA**, qui m'ont aidé et encouragé, je leur souhaite tout le bonheur et la réussite dans leurs vies

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est grâce à l'aide de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Table des matières

ملخص	II
Abstract	III
Résumé	IV
Remerciements	V
Dédicace	VII
Table des matières	IX
Liste des Tableaux	XVI
Liste des Figures	XVIII

Page

Introduction Générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I : Caractéristiques de la zone d'étude

1. Introduction	5
2. L'historique du lac Fetzara	6
3. Toponymie du lac Fetzara	6
4. Aperçu géomorphologie	7
5. Sol et couvert végétal.....	9
6. Aperçu géologique	14
6.1. Description des formations géologiques	15
6.1.2. Lithologie du massif de l'Edough.....	16
I. Le socle métamorphique	17
II. Le sédimentaire.....	19
III. L'ensemble éruptif	20
6.1.3. Tectonique et déformation du massif de l'Edough	20
6.2. Plaines littorales	21

6.3. Le lac Fetzara et sa stratigraphie.....	21
Conclusion	23

Chapitre II : Hydrologie

i. Hydroclimatologie

Introduction	26
Les stations de mesure et leurs particularités.....	27
1. Analyse des facteurs climatiques	27
1.1. Analyse des précipitations	28
1.1.1. Calcul du coefficient pluviométrique (C.P)	28
1.1.2. Les précipitations en Algérie	29
1.1.3. Variation moyenne mensuelle	30
1.1.4. Variation annuelle des précipitations	31
1.1.5. Variation saisonnière des précipitations	34
1.2. Analyse des températures	35
1.2.1. Variations moyennes mensuelles	35
1.3. L'humidité de l'air	37
1.4. Indice de De Martonne	37
1.5. Analyse du vent	38
1.6. Type de climat	39
1.7. Bilan hydrique	40
1.7.3. Interprétation et représentation graphique du bilan hydrique	45
Conclusion	47

ii. Hydrologie de surface

1. Caractéristiques morphologique du bassin versant côtier constantinois	47
--	----

1.1. Le lac Fetzara et ses sous bassin.....	48
1.2. Le réseau hydrographique du lac Fetzara	50
1.3. Le régime hydrologique du lac Fetzara	51
2. Régime des affluents du lac Fetzara	51
2.1. Régime des apports au lac	52
2.1.1. Oued Zied	52
a. Régime de l'Oued Zied (cycle 2016/2017).....	52
b. Régime de l'Oued Zied (cycle 2017/2018)	53
2.1.2. Oued El Mellah	54
a. Régime de l'Oued El Mellah (cycle 2016/2017)	54
b. Régime de l'Oued El Mellah (cycle 2017/2018)	55
2.1.3. Oued El Hout	56
a. Régime de l'Oued El Hout (cycle 2016/2017)	56
b. Régime de l'Oued El Hout (cycle 2017/2018)	56
2.2. Régime des exhaures	57
a. Régime de l'Oued Meboudja (le cycle 2016/2017)	57
b. Régime de l'Oued Meboudja (le cycle 2017/2018)	58
3. Visualisation de l'évolution spatio-temporelle du lac Fetzara	59
3.1. Cartes d'évolution spatiotemporelles	60
3.1.1. Mois de Novembre 2016	60
3.1.2. Mois de Mars 2017	61
3.1.3. Mois de Novembre 2017.....	62
3.1.4. Mois d'Avril 2018	63
Conclusion	64

Chapitre III : Hydrogéologie

Introduction	67
I. Hydrogéologie de la région d'Annaba	67
1. Les aquifères présents dans la région	68
2. Aperçu sur les aquifères de la zone du lac Fetzara	70
3. La lithologiques des aquifères de la zone d'Annaba	71
4. Indications piézométriques	73
4.1. Chronique des piézométries	73
4.2. Conclusion	74
5. La nappe des graviers	74
Conclusion	75

Chapitre IV : Hydrochimie

1. Variations de la conductivité : Oued et puits confondus	77
2. Analyse en composantes principales	80
3. Diagramme de Piper	82
4. Classification des eaux	83
5. Origines de la minéralisation observée	85
6. Caractéristiques des eaux entrantes et sortantes du lac	85
7. Influence de la géologie locale	85
8. Diagramme de Gibbs global	88
8.1. Diagramme de Gibbs l'aquifère entourant le lac Fetzara	88
8.2. Diagramme de Gibbs oueds alimentant le lac Fetzara	89
9. Vérification à l'aide de la thermodynamique	90
9.1. Interprétation des résultats obtenus	90
9.2. Les origines des minéraux déterminés et leurs associations	92

9.3. Caractéristiques chimiques et origines des minéraux	92
10. Conclusion	92
II. Modélisation par la méthode des neurones de connexion	95
1. Analyses des données	95
1.1. Description des données	95
1.3. Normalisation des données	97
2. Critères de performance du model	97
Algorithmes d'apprentissage	98
3. Résultats et discussion	98
4. Conclusion	101
Conclusion Générale	100
Annexes	105
Références Bibliographiques	108

Liste des tableaux

N°	Page
Chapitre II : Hydrologie	
ii. Hydroclimatologie	
Tab. 1 : Indications sur les stations météorologiques utilisées dans cette étude. (A.N.R.H).....	27
Tab. 2 : Récapitulatif des coefficients pluviométriques.....	29
Tab. 3 : Précipitations moyennes mensuelles (en mm)	30
Tab. 4 : Répartition saisonnière des précipitations dans les stations d’Ain Berda (1981-2013), Berrahal, Les Salines (1987-2017) et Pont Bouchet (1980-2021)	34
Tab. 5 : Températures moyennes mensuelles (Berrahal et Salines (1987-2017)	36
Tab. 6 : Variations de l’humidité relative moyenne mensuelle (en %), Salines (1987-2017).37	
Tab. 7: Résultats de l’indice d’Aridité de De Martonne (A)	38
Tab. 8: Vitesse moyenne mensuelle des vents à la station des Salines (1987 – 2017)	38
Tab. 9: ETR annuelle selon la méthode de Turc	41
Tab. 10: ETP obtenue pour la Station de Berrahal (1987-2017)	42
Tab. 11: ETP obtenue pour la station des Salines (1987-2017)	42
Tab. 12: Durée d’ensoleillement à la station des Salines	43
Tab. 13: Résultats du ruissellement obtenus pour les deux stations (1988-2017)	44
Tab. 14: Valeurs de l’infiltration calculées par l’équation fondamentale du bilan hydrique...44	
Tab. 15: Résultats du bilan hydrique à station de Berrahal (1987-2017)	45
Tab. 16: Résultats du bilan hydrique à la station des Salines (1988-2017)	45
ii. Hydrologie de surface	
Tab. 17: Les indications du sous bassin versant du lac Fetzara (A.N.R.H, 2000)	49
Tab. 18: Caractéristiques des principaux sous bassins versants du lac Fetzara	50
Tab. 19: Débits et précipitations mesurés sur l’oued Zied, cycle (2016/2017)	52

Tab. 20: Débits et précipitations mesurés sur l’oued Zied, cycle (2017/2018)	53
Tab. 21: Débits et précipitations mesurés sur l’Oued El Mellah, cycle (2016/2017)	54
Tab. 22: Débits et précipitations mesurés sur l’Oued El Mellah, cycle (2017/2018)	55
Tab. 23: Débits et précipitations mesurés sur l’Oued El Hout, cycle (2017/2018)	56
Tab. 24: Débits et précipitations mesurés sur l’Oued Meboudja, cycle (2016/2017)	58
Tab. 25 : Débits et précipitations mesurés sur l’Oued Meboudja, cycle (2017/2018)	59

Chapitre III : Hydrogéologie

Tab. 26: Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine d'Annaba	70
--	----

Chapitre IV : Hydrochimie

Tab. 27 : Matrice de corrélation entre les variables	80
Tab. 28 : Les couples indiquant des corrélations significatives.....	80
Tab. 29: Variabilité de la conductivité des eaux des cours d’eau (entrées et sortie du lac)....	85
Tab. 30 : Les apports des éléments chimiques par les précipitations météoriques kg/s (In Zenati, 2010)	87
Tab.31 : les données attribuées aux différents scénarios d’entrées du modèle RNA	95
Tab.32 : description statistique des paramètres	96

Listes des Figures

N°	Page
Chapitre I : Cadre général	
Fig. 1: Situation géographique du Lac Fetzara	5
Fig. 2: Carte Géomorphologique de la région du lac Fetzara	7
Fig. 3: Coupe schématique passant par le piémont de la bordure Sud du Lac Fetza.....	8
Fig. 4: Carte du couvert végétal de la région du lac Fetzara	10
Fig. 5: Carte pédologique simplifiée de la région du lac Fetzara	13
Fig. 6: Carte géologique de la plaine d'Annaba	14
Fig. 7: Position structurale du massif de l'Edough suite à l'érogène Alpin de la méditerranée sud occidentale	16
Fig. 8: Colonne lithologique du massif de l'Edough	17
Fig. 9: Stratigraphie des unités lithologiques du lac Fetzara	23
Chapitre II : Hydrologie	
i. Hydroclimatologie	
Fig. 10: Les variations des coefficients pluviométriques aux stations considérées	28
Fig. 11: Carte pluviométrique de l'Algérie	30
Fig. 12: Variation des précipitations moyennes mensuelles en (mm), stations d'Ain Berda, Berrahal, Les salines et Pont Bouchet	31
Fig. 13: Variation des précipitations annuelles (mm), station d'Ain Berda (1981-2013)	32
Fig. 14: Variation des précipitations annuelles (mm), station de Berrahal (1987-2017)	32
Fig. 15: Variation des précipitations annuelles (mm), station des Salines (1987-2017).....	33

Fig. 16: Variation des précipitations annuelles (mm) station du Pont Bouchet (1981-2021)...	33
Fig. 17: Répartitions saisonnières des précipitations (Pourcentage)	35
Fig. 18: Variations des températures mensuelles maximales, moyennes et minimales (°C) des stations de Berrahal et des Salines (1988-2017).....	36
Fig. 19: Variations des moyennes mensuelles des températures (°C) Berrahal et les Salines (1988-2017)	37
Fig. 20 (a). Courbe ombrothermique de la station de Berrahal. (1987-2017)	39
(b). Courbe ombrothermique de la station des Salines (1987-2017)	40
Fig. 21: Variations du bilan hydrique de la station de Berrahal (1987-2017)	46
Fig. 22: Variations du bilan hydrique de la station des Salines (1987-2017)	47
ii. Hydrologie de surface	
Fig. 23: La partie centrale du Côtier Constantinois en plus de ses sous bassins.....	48
Fig. 24: Situation géographique du bassin versant du lac Fetzara	48
Fig. 25: Le réseau hydrographique du sous bassin versant du lac Fetzara	50
Fig. 26: Variations du débit et des précipitations (Oued Zied, cycle (2016/2017))	53
Fig. 27: Variations du débit et des précipitations (Oued Zied, cycle (2017/2018))	54
Fig. 28: Variations du débit et des précipitations (Oued El Mellah, cycle (2016/2017))	55
Fig. 29: Variations du débit et des précipitations (Oued El Mellah, cycle (2017/2018))	56
Fig. 30: Variations du débit et des précipitations (Oued El Hout cycle (2017/2018))	57
Fig. 31: Variations du débit et des précipitations sur Oued Meboudja, cycle (2016/2017)	58
Fig. 32: Variations du débit et des précipitations sur Oued Meboudja, cycle (2017/2018)	59
Fig. 33: Carte montrant l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Novembre 2016	60
Fig. 34: Carte montrant l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Mars 2017	61
Fig. 35: Carte montrant l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Novembre 2017	62
Fig. 36: Carte de l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Mars 2018	63

Chapitre III : Hydrogéologie

Fig. 37: Carte des nappes dénombrées dans la région d'étude	67
Fig. 38: Coupe schématique des systèmes aquifères étudiés	69
Fig. 39: Nappes d'eau recensées au niveau de la zone du lac Fetzara	70
Fig. 40 (a): Coupe hydrogéologique de la région de Berrahal	72
(b): Empilement des horizons aquifères à l'Ouest du lac Fetzara	72
Fig. 41: Carte piézométrique de la nappe entourant le lac Fetzara (Avril 2018)	74

Chapitre IV : Hydrochimie

Fig.42 : Variations de la conductivité Oued et puits confondus	77
Fig.43 : Variations de la conductivité mesurée au niveau des puits	77
Fig.44 : Carte d'inventaire de points de prélèvement	78
Fig.45 : Histogramme montrant les variations de la conductivité au cours des mois d'Avril 2017 (a) et Novembre 2017 (b) au niveau des puits	79
Fig.46 : Histogrammes montrant les variations de la conductivité au niveau des Oueds (mois de Décembre 2016 (a) et mois de Mai 2018 (b)	79
Fig.47 : Cercle ACP des eaux souterraines de la région du lac Fetzara	81
Fig.48 : les familles des eaux selon le diagramme de Piper	83
Fig.49 (a) Degré de salinisation en graphique inverse du rapport de Simpson pour l'aquifère entourant le lac Fetzara.....	84
(b) : Degré de salinisation en graphique inverse du rapport de Simpson pour les oueds alimentant le lac Fetzara.....	84
Fig.50 : Diagramme de Gibbs global représentant le rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ Vs le TDS pour l'aquifère entourant le lac Fetzara et les oueds alimentant le lac	88
Fig.51 : Diagramme de Gibbs représentant le rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ Vs le TDS pour l'aquifère entourant le lac Fetzara	89
Fig.52 : Diagramme de Gibbs représentant le rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ Vs le TDS pour les oueds alimentant le lac Fetzara	89

Fig.53 : Variations des indices de saturation (eau de surface)	90
Fig.54 : Variations des indices de saturation (eau souterraine)	91
Fig.55 : évolution de la salinité observée et prédite `` EC " selon les algorithmes BFGS, SCG et OSS utilisant ANN05 dans la phase de validation	99
Fig.56 Salinité observée et prédite `` EC " selon les algorithmes BFGS, SCG et OSS utilisant ANN06 (la phase de validation).....	100
Fig.57 Salinité observée et prédite par les algorithmes BFGS, SCG et OSS utilisant les modèles ANN05 et ANN06 (la phase d'apprentissage)	101

Introduction générale

Les zones humides sont des témoins environnementaux, qui intègrent de nombreux paramètres hydroclimatiques qui varient rapidement. L'Algérie abrite de nombreuses zones humides comme les lacs, les lagunes, les marais, les chotts et les sebkhas. L'adhésion de l'Algérie à la convention de Ramsar a débuté 1984, depuis 42 sites sont classés sur la liste Ramsar et sont des zones humides d'importance internationale. La superficie couverte par ces sites est de 2 958 704 ha soit 0.78% du territoire national contre 0.02% et 0.08% pour le Maroc et la Tunisie.

La convention RAMSAR, ratifiée en Iran (1971), en Iran avait pour but la protection des zones humides au niveau international. Il n'est admis que les zones humides sont selon la convention « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eaux marines dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ».

Le terme « zones humides » nomme les milieux variés regroupés par la présence d'eau (douce, salée ou saumâtre), constituant la transition entre le milieu aquatique continental et le milieu marin. Ces écosystèmes abritent une grande diversité biologique tant au niveau de la flore que de la faune. Selon (Turner, 1992), l'appellation de zone humide peut désigner tout élément de continuum reliant l'environnement aquatique à l'environnement terrestre.

Ces zones humides jouent un rôle important à différents niveaux, elles participent à la régulation des microclimats et sont déterminantes pour la gestion de l'eau elles régulent les débits et les crues des fleuves, entre le cours d'eau et les zones adjacentes (recharge et décharge des nappes) entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Elles épurent les eaux des bassins versants en dégradant les excès de nutriments de la matière organique et des pesticides (Brenda-Xiomara, 2008).

Ces zones sont influencées directement par l'eau. Chaque changement soit de qualité ou de quantité influe sur le rôle écologique de ces endroits comme étant des écosystèmes. Les autres caractéristiques propres aux zones humides sont leurs sols qui se différencient nettement des sols essentiellement terrestres et elles présentent une végétation adaptée aux conditions d'humidité du sol d'inondation (Mitsch et Gosselink., 2007).

Le lac Fetzara, objet de notre étude fait partie des zones humides de l'Algérie orientale. C'est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-Est Algérien, classé officiellement le 04 juin 2003, comme une zone humide sur la liste « Ramsar ».

Le facteur dominant qui distingue les zones humides des autres écosystèmes est l'abondance de l'eau. Ces zones sont souvent soumises à des inondations ou des périodes de sécheresse variables dans l'espace et dans le temps. La phase «inondation» varie d'une année à l'autre selon les conditions climatiques. Comme le notent Mitsch et Gosselink (1986) ; en effet l'Algérie septentrionale jouit d'un climat semi-aride caractérisé par une forte irrégularité pluviométrique. D'une manière générale, les bassins versants sont imperméables, se traduisant sur le plan des régimes hydrologiques, une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements accentuée par de longues périodes de sécheresse, des crues violentes et rapides, et une érosion intense et des transports solides importants (Kadi, 1997).

Les modifications peuvent avoir un impact sur les réserves d'eau souterraine, avec une augmentation rare (Idder, 2007) mais souvent une diminution significative (Karaoul et al., 2008). Ainsi qu'une diminution de leur qualité (Karaoul et al, 2008 ; Bouhlassa et al, 2008). En dehors des échanges de flux entre les différents systèmes aquifères, la recharge naturelle des nappes phréatiques est principalement due à l'infiltration des eaux des cours d'eau lors de leurs crues les plus intenses. Dans la région méditerranéenne, ce phénomène est fréquemment très fluctuant tant sur le plan temporel que spatial (in Lange et Leibundgut, 1999).

Le présent travail est réalisé pour suivre les variations des changements des apports et des exhaures des eaux du lac Fetzara pendant deux cycles hydrologiques, de ce fait un aperçu sur les aspects qualitatifs et quantitatifs sur les eaux traversant le lac, ce qui expliquera les mécanismes régissant les variations du débit entrant et du débit sortant du lac, ainsi les variations de la composition chimique des eaux à l'entrée et à la sortie du lac. Ces résultats seront peut être utilisés lors de l'établissement des plans d'aménagement de terrain et la gestion de la quantité et de la qualité des eaux de la zone y compris celles du lac.

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

- Le chapitre premier est essentiellement dédié à la présentation du secteur d'étude par un aperçu sur le cadre général de la zone d'étude. On passe en revue la situation géographique suivie par un aperçu traitant successivement de la géomorphologie, la géologie, la pédologie et le couvert végétal. Le chapitre se termine par une conclusion.

- Dans le deuxième chapitre, on traitera de l'hydroclimatologie et de l'hydrologie de surface. Un aperçu sur les campagnes de mesures, les techniques analytiques et les outils de traitement des données utilisés. Ce chapitre est consacré aussi sur le calcul des débits des entrées : (oued Zied, oued El Hout et oued El Mellah), et à la sortie : oued Meboudja. Cette étude permet une

meilleure connaissance de l'évolution des caractéristiques climatiques en fonction des saisons.

- Le troisième chapitre est un aperçu sur l'hydrogéologie locale. Les cartes Piézométriques, montrent l'existence d'une certaine relation entre les constituants de la zone c'est-à-dire le Lac et les oueds. Ainsi la région est caractérisée par une assez forte perméabilité indiquant, une exposition de la nappe à toute forme de pollution. Cette partie est issue d'une synthèse réalisée à partir des travaux consultés.

- Le chapitre quatre traite de la chimie des eaux pour mieux comprendre le comportement de la qualité des eaux et le processus de la salinité des eaux du lac (minéralisation, faciès chimiques des eaux et origine de la minéralisation).

Enfin, le document sera finalisé par une conclusion générale avec une synthèse globale des résultats obtenus et les perspectives.

Chapitre I :
Caractéristiques de
la zone d'étude

En Algérie, de nombreux sites sont à protéger par la convention « RAMSAR », l'Est Algérien en particulier renferme de nombreux sites parmi lesquels le lac Fetzara, objet de notre étude. Cette attribution de site classé a fait que de nombreux chercheurs ont conduits des travaux sur ce site. Par le biais de notre travail, nous allons donner des explications sur le fonctionnement de ce lac.

1. Introduction

Depuis 2003, le lac Fetzara est classé site protégé par la convention RAMSAR ; ce site fait partie des zones humides d'importance internationale dont jouie l'Algérie. Le lac Fetzara, au même titre que les lacs de la Wilaya d'El Tarf, est considéré parmi les plus importants lacs de l'extrême Nord-Est algérien, il présente les limites géographiques suivantes (Latitude de 36° 43' et 36° 50' Nord et une Longitude de 7° 24' et 7° 39' Est). Administrativement, le lac Fetzara est à cheval entre quatre communes de la wilaya d'Annaba. Il est entouré:

- à l'Ouest par la commune de Berrahal,
- au Sud par Ain Berda,
- à l'Est par El Hadjar,
- au Nord par Draa Erich.

Il est situé à 14 kilomètres de la mer et à 18 kilomètres au Sud-ouest de la ville d'Annaba, plus exactement dans la commune de Berrahal.

Le lac s'allonge sur 17 kilomètres d'Est en Ouest de la ville d'Annaba et sur 13 kilomètres dans sa partie la plus large du Nord au Sud, sur une superficie de 18.600 ha. Le plan d'eau est libre. Le lac et sa région occupent plus de 9 800 hectares en hiver, de ce fait on a une vaste prairie humide au centre de la plaine (fig.1).

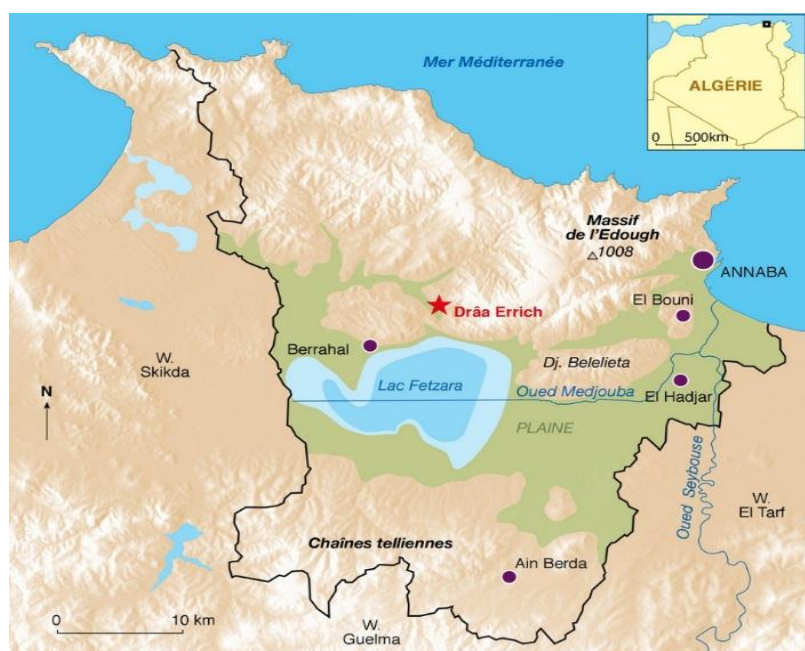


Fig. 1: Situation géographique du Lac Fetzara (Conception par P. Pentsch).

La mise en place de cette cuvette lacustre est influencée par les différentes formes de reliefs (montagnes, oueds, plaine, etc...), caractérisant la région. Les eaux alimentant le lac Fetzara sont issues des précipitations et des eaux ramenées par les cours d'eaux drainant la plaine, c'est le cas des Oueds El Melah, El Hout et Zied. Le lac et les cours d'eau « Oueds » l'alimentant sont tous présents dans la partie Sud-ouest de la ville d'Annaba. Le lac recueille les eaux d'un sous bassin versant dont la superficie est de 515.52 km². L'Oued Meboudja constitue le canal de vidange du lac.

2. L'historique du lac Fetzara

Le lac Fetzara, est une zone humide naturelle où les eaux s'accumulaient et atteignaient le niveau de la côte 16 mètres en hiver et se retiraient à 14 mètres en été. Les eaux du lac sont toujours insalubres avec une salinité très prononcée. Le premier projet d'assèchement du lac approuvé en 1865, prévoyait une baisse du niveau d'eau à la côte 11.8 mètres avec la mise en culture de 3625 ha asséchés. La question resta au stade de projet jusqu'en 1876, époque à laquelle fut élaboré un nouveau projet de la part de la société des minerais de fer magnétique « Mokta El Hadid », laquelle se chargea d'assécher le lac et de cultiver 2000 ha de terre. Le projet prévoyait surtout le creusement d'un canal de drainage d'environ 16 kilomètres entre le centre du lac et l'oued Meboudja.

De 1877 à 1880, les travaux ont commencé par l'établissement à l'intérieur du lac un premier canal de 7 kilomètres de longueur permettant l'évacuation des eaux du lac. A partir de 1880 un canal de 16 kilomètres de direction Est-ouest était creusé par percer le bourrelet dunaire d'El Gantra et amenait les eaux dans ce qu'on appelle aujourd'hui l'oued Meboudja et qui débouche dans l'Oued Seybouse. Entre 1906 et 1934 les travaux se succèdent pour élargir les canaux des Oueds El Hout, El Mellah, Zied, pour porter la capacité d'évacuation du canal principal à 22 m³/s, permettant la vidange du lac. La forme actuelle du lac date des derniers aménagements réalisés en 1934.

Sur le plan agricole, les premiers projets de mise en valeur avaient pour but le reboisement en eucalyptus et ceci durant les années 1875, 1888, 1891 et 1949. Ces tentatives se sont soldées par des échecs y compris la tentative de 1954. Réalisée dans le but de fournir de l'ombrage aux pâturages (FEKRACHE, 2014). En 1940, des parcelles de 100 hectares ont été réalisées et ont été attribués aux agriculteurs, cependant cela s'est terminé par un échec et ceci malgré l'assistance technique et financière de l'État (Trvers, 1958). La dernière tentative a été faite lors de l'année 1999-2000, par la CGA (Confédération Générale de l'Agriculture), dans le but de créer trois périmètres agricoles. Cet essai n'a pas abouti car les sols sont inondés durant toute la période hivernale. En 2003, le lac Fetzara a été classé site protégé par la convention RAMSAR (Cf. article 2. 1), de la convention RAMSAR.

3. Toponymie du lac Fetzara

Dans le cas des zones lacustres la profondeur de l'écosystème et la superficie inondée sont fonction de la pluviométrie. Ramené au cas du lac Fetzara, nous remarquons que la

pluviométrie annuelle (700 à 800 mm), durant la période des précipitations (Automne, Hiver et printemps), le lac et les terrains imperméables voisinant sont envahies par les eaux. Les zones inondées occupent environ 12 000 ha sur un total de 13 140 ha. La surface inondée peut atteindre 10.70 mètres à partir du fond du lac. Durant la période de basses eaux, la forte évaporation conduit à un assèchement presque total du lac, ainsi les terrains argileux provoquent à la surface du sol des crevasses d'où le nom d'« étang des crevasses » : "Garaat Fetzara".

4. Aperçu géomorphologie

La forme actuelle du lac et de sa région est due aux reliefs montagneux qui correspondent à la retombée des deux Djebels Edough et Belelieta au Nord et aux chaînes telliennes au Sud de la plaine d'Annaba (fig. 2). Ces structures sont essentiellement dues à la tectonique ayant affectée la région au Cénozoïque et au Quaternaire. Ces unités appartiennent aux deux sous bassins versants principaux qui sont celui du lac Fetzara à l'Ouest avec une superficie de 515.52 km², et celui d'oued Meboudja à l'Est avec 252 km² de superficie.

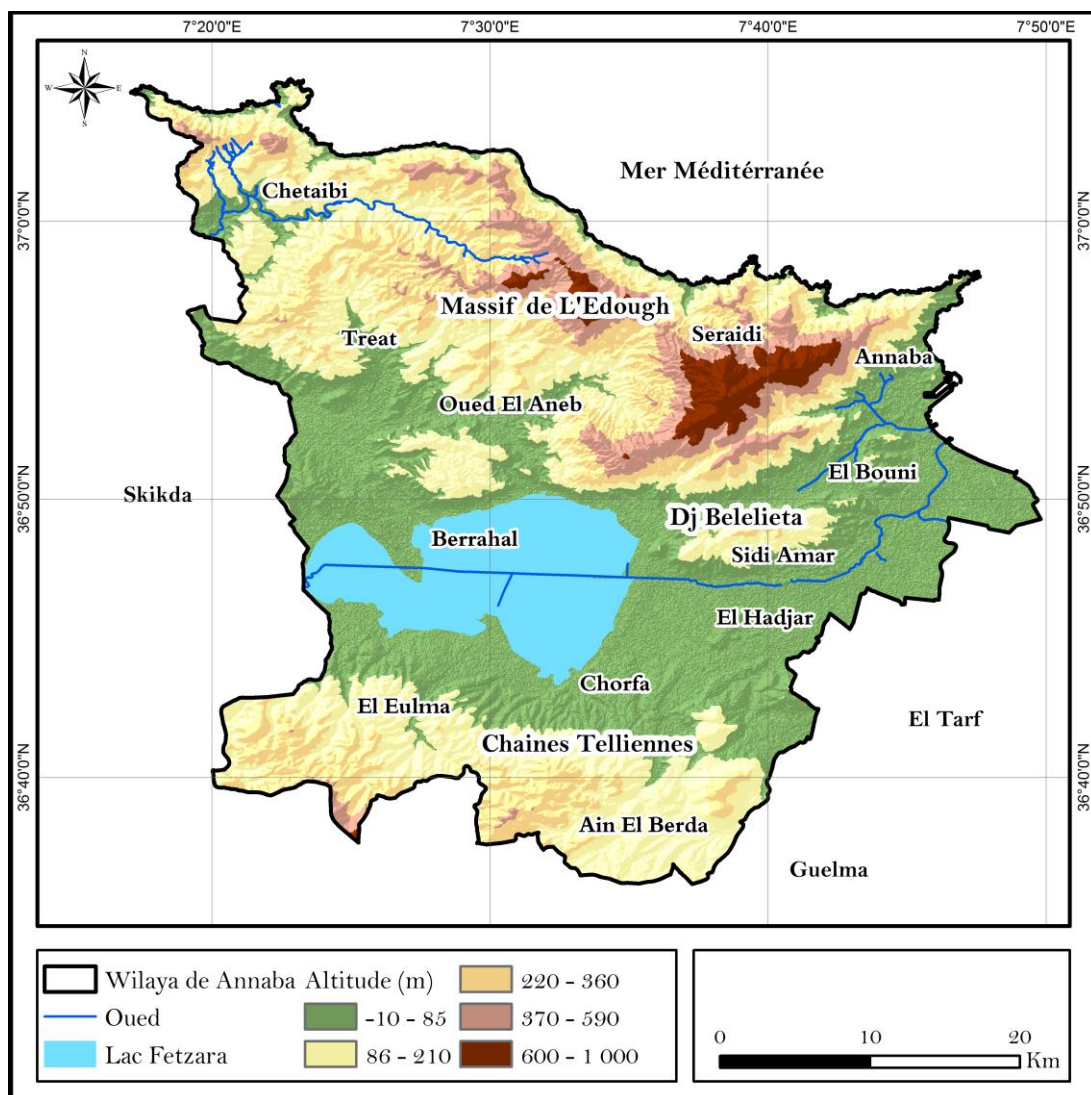
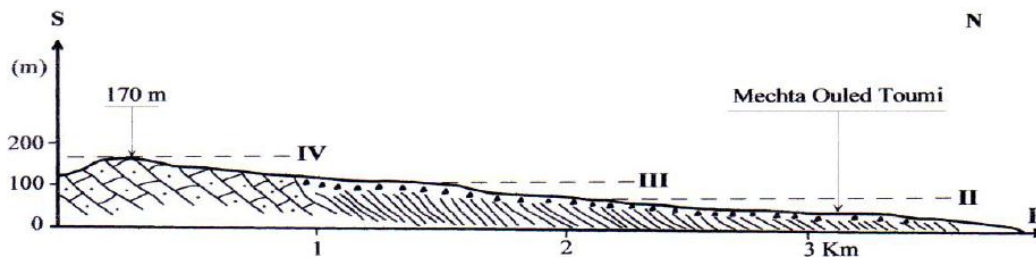


Fig. 2 : Carte Géomorphologique de la région du lac Fetzara.

Le Fetzara appartient à la partie occidentale de la plaine d'Annaba, c'est la partie la plus basse du sous bassin versant endoréique formant le lac Fetzara. Elle résulte de la tectonique active du quaternaire, qui a entraîné la formation d'une large dépression nettement dissymétrique entre le Nord et le Sud (fig. 3).



Légende : I-II-III-IV : niveaux de glacières

Fig. 3 : Coupe schématique passant par le piémont de la bordure Sud du Lac Fetzara (in Belhamra, 2001).

4.1. La plaine d'Annaba

La plaine d'Annaba se situe en arrière de la ville d'Annaba. Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Nord-ouest par l'anticlinal du massif de l'Edough et au Sud par l'anticlinal de la chaîne numidienne, avec une topographie relativement régulière, dans l'espace, ainsi on observe :

- la basse plaine, contenant l'oued Seybouse,
- les glacières de bordures,
- le quaternaire constituant le littoral.

Elle est inclinée mais bombée autour de la Seybouse qui draine la plaine d'Annaba et constitue un axe de drainage. Celui-ci présente un tracé plus rectiligne (Belhamra, 2001 ; Habes, 2006). La Seybouse se déverse en mer Méditerranée à l'Est de Sidi Salem.

4.2. Les montagnes

Du Cénozoïque et au Quaternaire, la tectonique ayant affecté la région, il s'est formé des reliefs montagneux qui constituent en majorité les limites de la plaine étudiée, ils correspondent aux monts d'Edough au Nord qui sont isolés du Djebel Belelieta par une vallée à fond plat, à l'Est du lac Fetzara, il s'agit d'un fossé d'effondrement de direction Ouest-est entre les Djebels Edough et Belilieta (287 m) ouvrant ainsi une dépression vers la mer Méditerranée. La ligne de crête résultant de la tectonique est relativement rectiligne et est longue de 26 kilomètres, débute au Nord du lac Fetzara, elle s'élève rapidement à plus de 600 mètres pour atteindre 1008 mètres à Kef Sebâ et redescend à 867 mètres vers Seraidi, elle s'abaisse ensuite régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord de la ville de Annaba.

Au niveau de la partie Ouest sont présents les sables dunaires anciens ainsi que la chaîne Tellienne, situés au Sud de la plaine d'Annaba, de morphologie distincte caractérisant le sous bassin versant d'Oued Meboudja à l'Est avec 252 km² de superficie et celui du lac Fetzara à l'Ouest avec une superficie de 515.52 km².

Entre Belilieta et Bouhamra se creuse la vallée transversale de la basse Meboudja qui prend naissance au pied de la rive dunaire limitée à l'Est par la cuvette du lac Fetzara, et qui entre en confluence avec l'oued Seybouse au Nord d'El Hadjar.

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

4.3. Les glacis

Ce sont généralement des glacis de collines à pente variable. En l'absence des collines, ces glacis s'appuient directement sur les montagnes. Ils constituent un raccord entre montagnes, collines et les différentes zones alluviales. Entre ces massifs, la dépression se présente comme une vaste cuvette de remblaiement alluvial très plate et très basse (altitude de 20 à 30 m au Sud et de 10-15 m au Nord).

5. Sol et couvert végétal

5.1. Le couvert végétal

Le couvert végétal joue un rôle important pour l'écoulement et de l'érosion hydrique, et plus précisément, il atténue les effets néfastes du ruissellement.

La zone du lac Fetzara (fig. 4), comprend des unités bien distinctes déterminant l'image du paysage naturel de la cuvette lacustre par le biais d'une délimitation des secteurs à formations végétales fortes et ceux à formations végétales faibles, d'où la diversité de l'occupation du sol. Le tiers de la superficie totale de la zone correspond à des terres agricoles. Une large zone herbeuse, utilisée pour le pâturage pour ovins et bovins.

On peut donc distinguer visuellement des zones avec différents types de végétation naturelle.

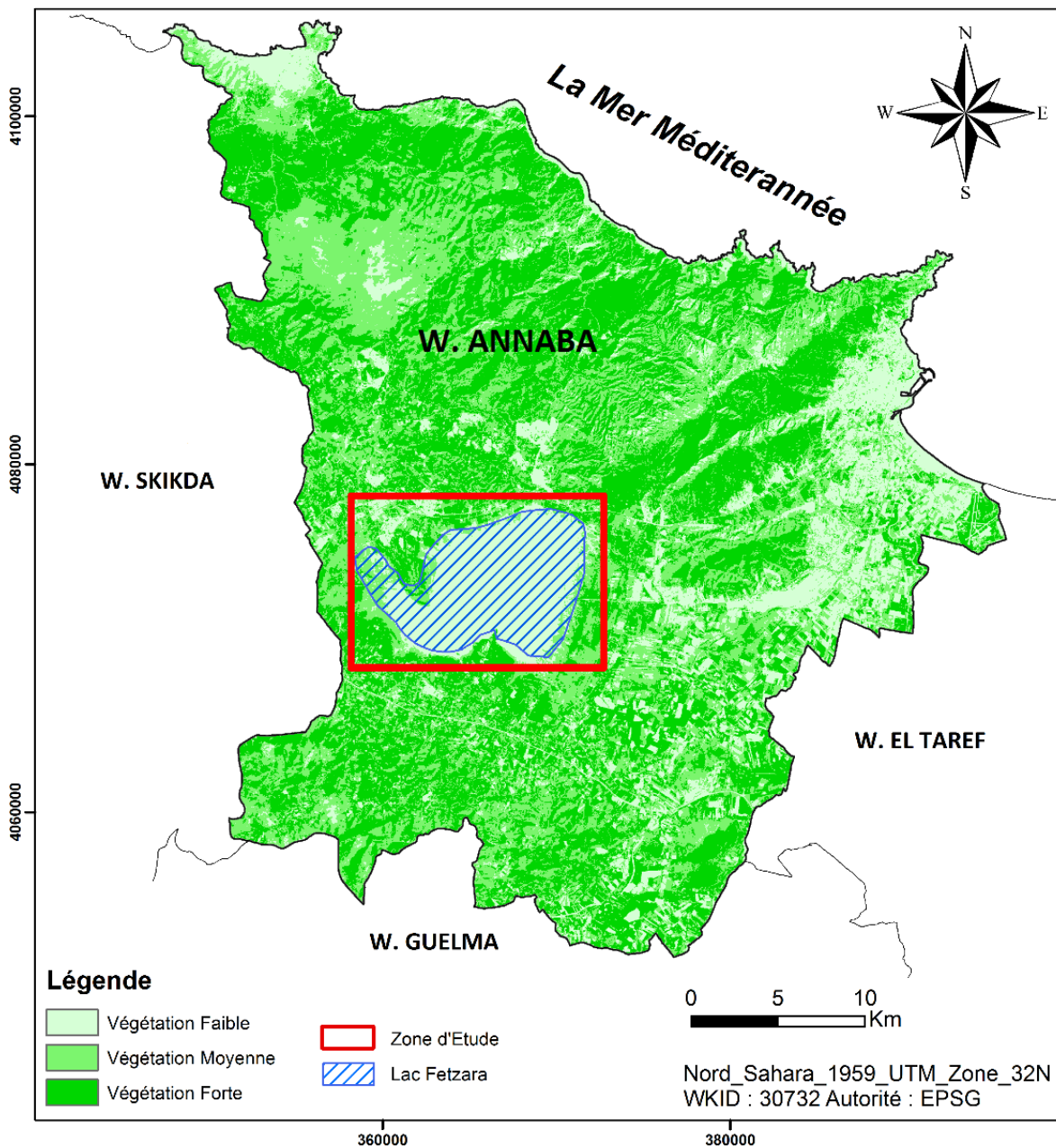


Fig. 4 : Carte du couvert végétal de la région du lac Fetzara.

5.2. Pédologie

La diversité des types du sol de la région du lac Fetzara a fait que plusieurs chercheurs et organismes ont travaillé sur l'identification des sols. Le dernier travail a été réalisé en 2010 à l'université Badji Mokhtar par le Professeur Zenati N (2010) dans son doctorat. La carte pédologique réalisée (fig. 5), répertorie et décrit les sols de la zone du lac Fetzara.

a. Les vertisols (SV) :

Présents à l'Est du lac Fetzara, aux alentours d'oued Meboudja et au niveau de la plaine d'El Hadjar, occupant une superficie de 3 324.8 ha, soit 10.61% de la superficie étudiée. Ces sols

sont riches en argile (> 30 %, minéral argileux), ils sont gonflant et présentent des fissures à la surface lors des sécheresses. Ces sols ont riches en calcaire avec une texture, très fine donc un mauvais drainage on note la présence de trois sous classes de sol dans la région :

- Les vertisols :
- drainage externe nul ou réduit,
- structure anguleuse, calcaire.

Ils se caractérisent par une très faible perméabilité.

La texture est très fine ce qui les rend asphyxiant.

Teneur importante en argile gonflant riche en calcium et en magnésium le gypse est l'élément principal.

- La seconde classe se caractérise par
- un drainage externe et structure anguleuse,
- peu calcaire,
- perméabilité modérée au niveau du premier horizon (texture fine).
- La troisième classe est caractérisée par
- drainage externe nul ou réduit,
- structure anguleuse, non calcaire.
- texture fine et faible perméabilité.

b. Les sols peu évolués (S P E) :

Peu évolués mais fertiles se localisent sur les terres onduleuses des pieds de montagnes et sur les terrasses essentiellement sur les dunes d'El Gantra leur épaisseur varie selon leur emplacement. La superficie occupée est de 11 716 ha, soit 37.37% de la superficie totale. Leur texture, vat de fine à grossière. La perméabilité est faible à modérée Avec un taux de matière organique faible à moyen et une réserve minérale de moyenne à assez bonne.

Ces sols sont calcaires à teneur élevée en limons plusieurs sous classes sont observées dans la région du lac à savoir :

- Les sols peu évolués :
- non climatiques d'apport alluvial,
- caractérisés par un niveau hydromorphe
- une texture fine, perméabilité faible donc une rétention en eau élevée.
- Les sols peu évolués

- non climatiques dus aux apports alluviaux
- non calcaire, les plus fertiles,
- caractérisés par une bonne perméabilité et une texture moyenne.
- **Les sols peu évolués et non climatiques issus des apports alluviaux.**
- formés par les effets colluviaux et alluviaux.
- texture est grossière à moyennement grossière
- sols sont calcaires.
- Les sols peu évolués non climatiques,
- apport colluvial non calcaire sont dits colluviaux.

Les plus présents et sont les plus répandus se caractérisent par de faibles teneurs en humus dans la couche supérieure généralement, sableux à très bonne perméabilité.

- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial, à texture fine non calcaires. Ces sols sont identiques précédents, sont moyennement grossiers avec une forte hydromorphie.

c. Les sols hydromorphes (S. H) :

Présents sur les périphéries Sud et Est de la cuvette mais aussi sur quelques parties dispersées au Nord-Ouest du lac Fetzara, occupant 3 452 ha, soit 11.01 % de la totalité de la zone d'étude, se caractérisent par

- une texture très fine,
- une faible perméabilité avec un mauvais drainage.

Deux sous classes sont identifiées :

- Les sols hydromorphes peu humifère constitués par des colluvions caractérisés par :
 - une texture grossière
 - la présence d'une nappe d'eau est peu profonde en saison pluvieuse.
- Le mauvais drainage, conduit à une hydromorphie.
- Les sols hydromorphes peu humifères connaissables par :
 - une fine texture,
 - une très faible perméabilité constitués par des alluvions fines non calcaires salées.

d. Les sols halomorphes (S.H.A) :

Les plus présents Ces sols sont présents au niveau de la partie Ouest de la plaine d'El Hadjar et occupent 11 046 ha, soit 35.24% de la surface étudiée. Ces sols accumulent les sels de la zone inondée du lac au cours de la saison pluvieuse quand le niveau d'eau dans le lac est supérieur à 12 m. Lors de la période sèche, il y a apparition de fissures (grandes et petites) en surface et pouvant atteindre 50 cm de profondeur. Ces sols sont issus de l'accumulation des

Chapitre I : Caractérisations

sels solubles à texture lourde et riche en minéraux argileux gonflants. On a plusieurs types dont :

- Les sols halomorphes à structure non dégradée «groupe salins à alcalis sols salés et de la famille alluvions fines salés » ces sols résultent d'accumulation de sel due à l'évaporation, provoquant l'assèchement en saison sèche sels riches en chlorure de sodium (Na Cl) la surface du lac est constituée de ce sol.

- Les sols halomorphes avec structure dégradée, sols salins à alcalis, alluvions légers non calcaires taux élevé d'argile, une texture fine et une faible perméabilité L'hydro morphie et la salinité font qu'ils sont difficilement aménageables. Se répartissent dans la périphérie du lac, à côté des sols précédents, peu répandus. Situés au Nord du confluent de l'oued El Hout avec le canal principal.

- Les sols halomorphes à structure dégradée, du même groupe que les précédents ces sols ont une forte teneur en argile avec des fissures se produisant en surface lors de période sèche. les couches sont riches en calcium et contiennent des taches hydromorphes. Ce type de sol est répandu à côté du sol halomorphes à structure dégradée mais sur une superficie restreinte.

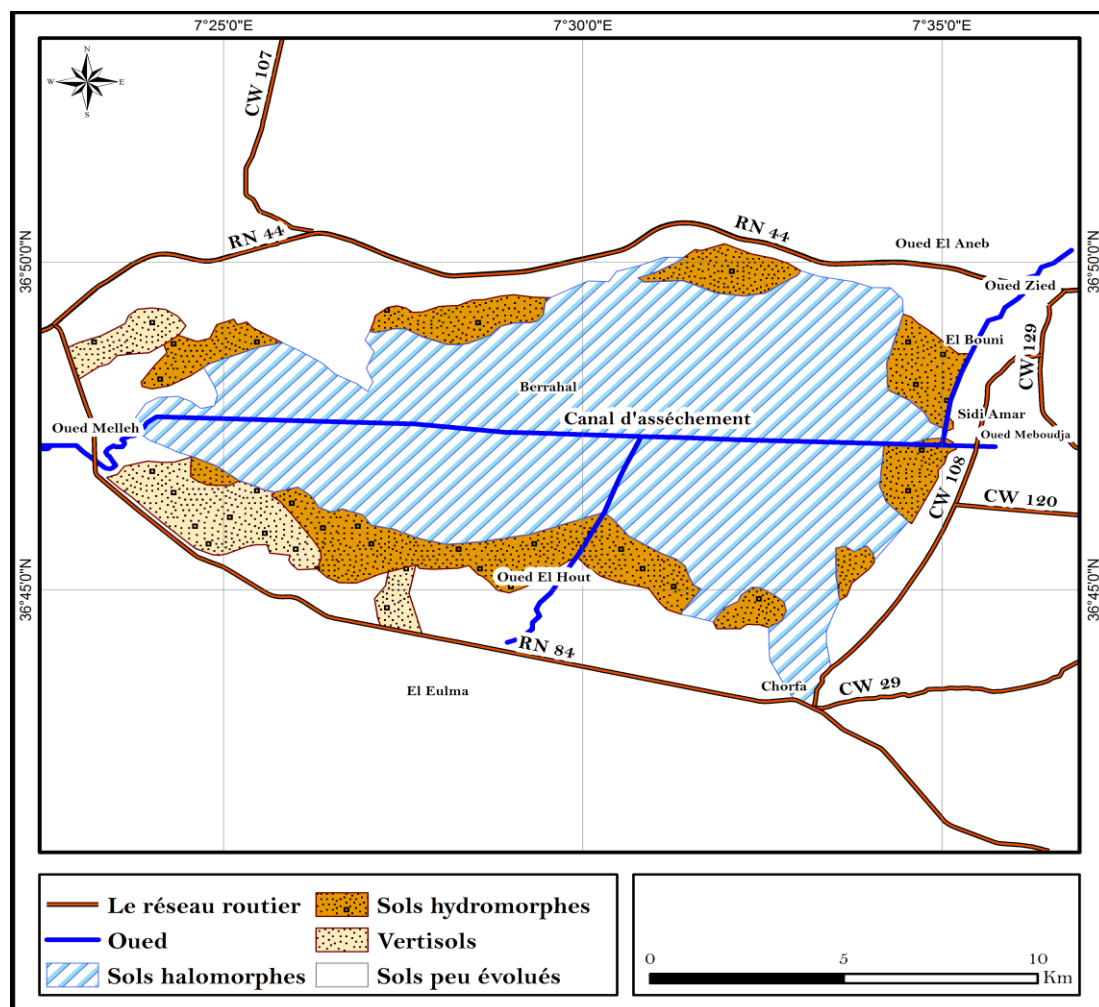


Fig. 5 : Carte pédologique simplifiée de la région du lac Fetzara (AJCI, 1985, modifiée).

5.3. Utilisation agricole des sols :

La zone d'étude est à vocation agricole, on y cultive entre autres les agrumes, le gombo... Ce sont des cultures d'hiver (irriguée à partir des précipitations), il y a aussi les cultures d'été, soutenues par l'irrigation.

6. Aperçu géologique

L'étude géologique d'une région est fondamentale et constitue un préalable aux autres parties comme l'hydrogéologie (nappes) et l'hydrogéochimie. Elle décrit la nature des matériaux et le lien existant entre les formations géologiques et leurs structures. Les différentes études géologiques réalisées sur la région d'Annaba montrent la présence de l'affleurement de terrains métamorphiques et éruptifs au Nord-ouest et au Nord-est du lac Fetzara caractérisant le massif de l'Edough, de Belelieta et de Boukhadra, les terrains sédimentaires occupent le reste de la région (figure.6).

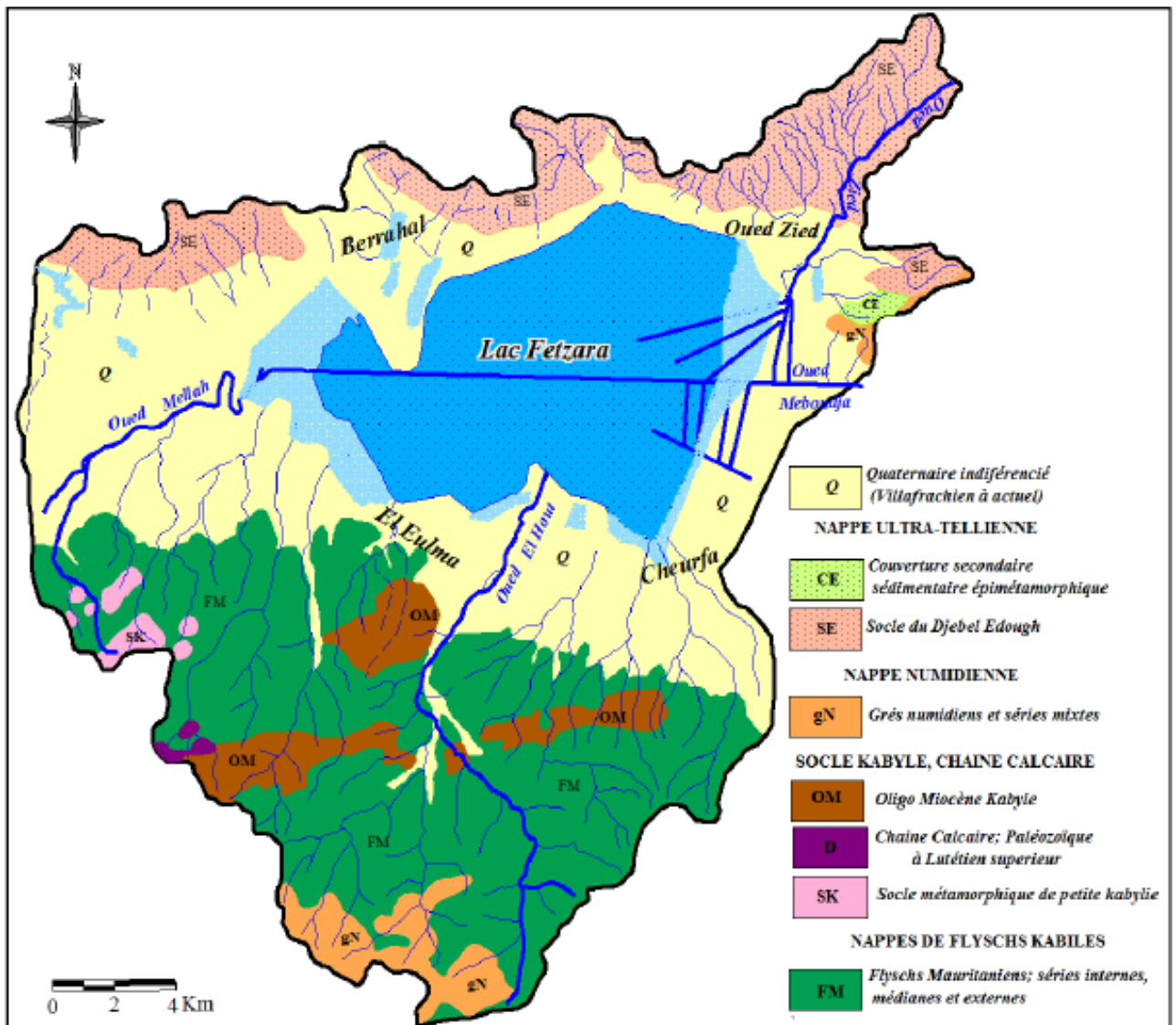


Fig. 6 : Carte géologique de la plaine d'Annaba.

6.1. Description des formations géologiques :

6.1.1 L' Edough (Fig.7) :

Le massif de l'Edough, est un massif cristallophyllien du littoral algérien considéré comme une partie des zones internes de la chaîne alpine de l'Afrique du Nord issue de l'activité tectonique dans le bassin méditerranéen occidental associée à la collision de la plaque africaine et européenne durant la période Oligo-Miocène (Auzende et al, 1975; Bouillin, 1979; 1986; Cohen, 1980; Maury et al, 2000; Laouar et al, 2005). En référence à l'orogène alpin périméditerranéen, et, en l'état actuel des connaissances géologiques, le massif de l'Edough est considéré par de nombreux auteurs (Hilly, 1962 ; Durand-Delga , 1969 ; Bouillin,1979) comme le prolongement des massifs internes de la Grande et Petite Kabylie, alors que pour d'autres (Vila, 1970, 1980 ; Latouche et al, 1978 ; Aissa, 1985), il serait au contraire un massif externe à caractère africain.

Le massif de l'Edough est constitué essentiellement par :

- un socle métamorphique d'âge Précambrien à Paléozoïque affleurant à la faveur d'un bombement antiforme à grand rayon de courbure, d'axe approximatif NE-SW. Le cœur de la structure est constitué de gneiss en association complexe avec des reliques d'éclogite, de granulites, de péridotites ; tandis qu'à la périphérie s'observent les micaschistes à minéraux, associé à des calcaires métamorphique, amphibolites, pyroxénites. En outre, au Nord-Est du massif affleure l'important massif amphibolique de la voile noire ;
- des séries carbonatées dites « composites » considérées comme représentatives des « série Kabyles » autochtones parautochtones par rapport au socle de l'Edough, sur lequel elles reposent au Mellah et au Belelieta ; et parallélisées aux séries des Djebel Safia et Filfila (Vila, 1970). Elles comprennent des calcaires attribués au Jurassique et Crétacé, fortement recristallisés.
- des nappes de flysch qui reposent sur l'ensemble des roches précédentes ; nappes de flysch massyliens à Globotruncana, dont font partie les flyschs crétacés d'Ain Barbar, et du Mellaha (Hilly, 1957) ; nappe de flysch numidiens, surmontant la nappe de flysch crétacés (Vila, 1970 ; Marignac, 1985).
- au cap de fer, des sédiments marins d'âge burdigalien supérieur à langhien (Hilly, 1957) sont discordants sur l'édifice des nappes, et traduisent l'existence d'un bassin distensif post-nappes localisé au Nord-Ouest. Il est probable que tels sédiments existent, en mer, au large de l'Edough.
- un magmatisme peralumineux (leucogranites et rhyolites) et calco-alcalin (microgranites) d'âge burdigalien à lanphien (Hilly, 1957 ; Aissa, 1985).
- des sédiments continentaux, post-magmatiques, indiquant la mise en place de l'affleurement franche et définitive du socle de l'Edough et des microgranites associés. Leur âge n'est pas bien connu ; mais il pourrait s'agir vraisemblablement du miocène terminal ou du pliocène (Vila, 1970).

- des sédiments pliocènes et quaternaires, englobant les éboulis anciens, récents et actuels (plaines d'Annaba, la dépression du lac Fetzara...).

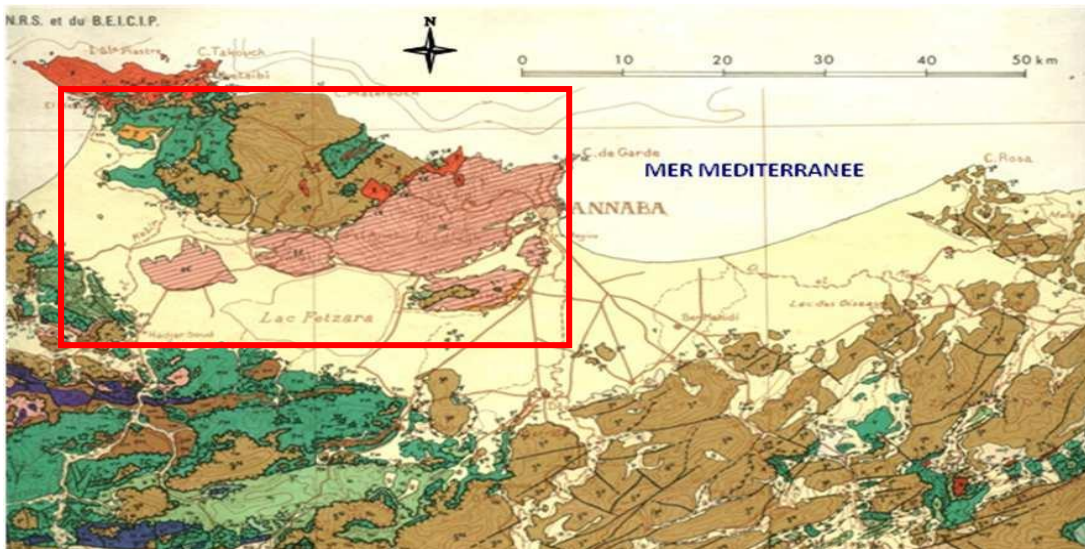


Fig. 7 : Position structurale du massif de l'Edough suite à l'érogène Alpin de la méditerranée sud occidentale.

6.1.2. Lithologie du massif de l'Edough (Fig.8) :

C'est un véritable îlot montagneux d'une superficie de 47 350 hectares, délimité par la mer Méditerranée au Nord, par la vallée de l'Oued El Kébir à l'Ouest, par la dépression du lac Fetzara au Sud, et par la plaine de Kherraza à l'Est. La masse principale du massif de l'Edough est allongée vers le Nord-Est avec une ligne de crête longue de 25 kilomètres qui s'élève rapidement pour atteindre 1 008 m au Kef Seba, point culminant du massif. Cette ligne redescend vers Séraïdi, puis s'abaisse régulièrement à une altitude inférieure à 100 mètres au Cap de Garde au nord. Le massif de l'Edough comporte à la fois trois grands ensembles lithologiques : un ensemble métamorphique, un ensemble sédimentaire et un ensemble éruptif (figure. 8). Ces ensembles, renferment de faible potentialité hydraulique mais jouent le rôle de zones d'alimentation pour les nappes de la région.

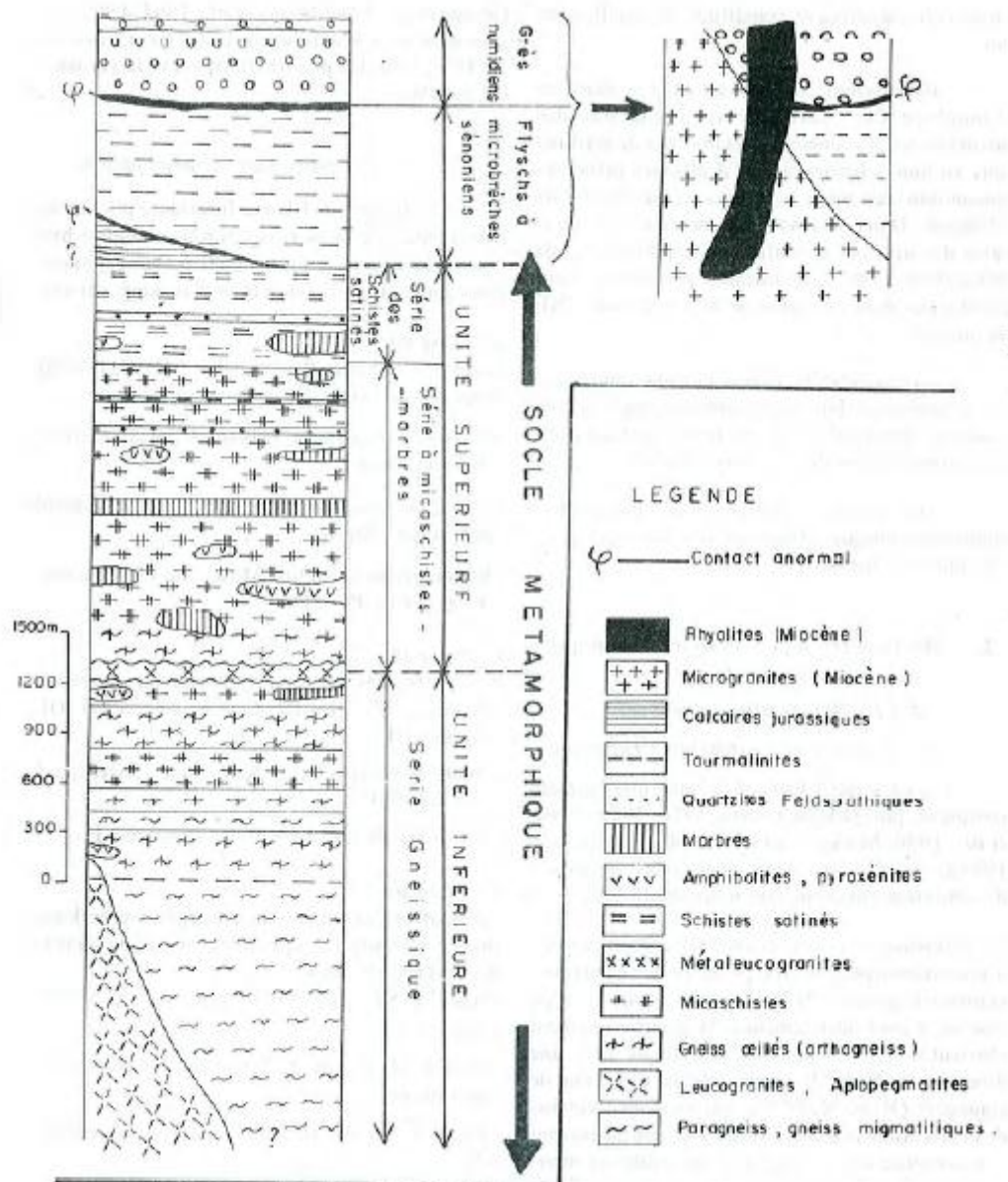


Fig. 8 : Colonne lithologique du massif de l'Edough (In Hilly, 1962, Modifiée)

I. Le socle métamorphique

Formé par la superposition de deux unités :

a. Unité inférieure (Série Gneissique) :

Constituée essentiellement des gneiss migmatitiques à biotite d'âge Précambrien (Panafrique) ils sont présents dans la partie basale du massif de l'Edough, formant le centre de l'antiforme. Ces roches sont foliées et plissées composées principalement par une variété ocellée située à des niveaux leptynitiques allant de quelques dizaines de mètres à plusieurs dizaines de mètres riches en tourmaline en plus d'une autre variété plus ou moins migmatitique. Ces

deux variétés ont été considérées comme des orthogneiss et des paragneiss respectivement (Gleizes et al. 1988) Cependant les travaux de Hammor et Lancelot (1998) ont donné les âges de 606 à 595 millions d'années, pour les ortho gneiss et de 630 ± 50 millions d'années, pour le para gneiss. Les orthogneiss constitués principalement de la biotite, du quartz, ... mais aussi de l'andalousite, la fibrolite, la muscovite, l'amphibole, la tourmaline, l'apatite et le zircon sont présents renfermant des méga cristaux de feldspath potassique contenant des inclusions d'autres minéraux, leur taille peut atteindre 8 cm de diamètre. L'étude géochimique des éléments majeurs, des éléments en traces et des isotopes de Rb-Sr) des orthogneiss (Ahmed-Saïd et Leake, 1993) indiquent qu'ils sont à l'origine des roches ignées de nature acide, à caractère calco-alcalin et qui ont été plus tard, affectées par un métamorphisme isochimique.

b. Unité supérieure (Série à micaschistes-marbres) :

Cette unité surmonte les gneiss basaux du massif. Elle est constituée essentiellement des micaschistes englobant des bancs de marbre et d'amphibolites. Ces micaschistes se caractérisent par :

- L'ensemble inférieur, reposant sur les gneiss, caractérisé par des niveaux plus ou moins lenticulaires de marbre à épaisseur très variable (quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres) localisé dans les zones périphériques du massif de l'Edough et dans la région appelée la Voile Noire au Nord-Est du massif.

- La partie supérieure, constituée par une série dite « des alternances » (Gleizes et al, 1988, Caby et Hammor, 1992), surmonté par une unité épimétamorphique. La série des alternances est caractérisée par une alternance régulière de micaschistes, souvent fortement alumineux, et quartzites feldspathiques d'épaisseur décimétrique à métrique

II. L'ensemble sédimentaire

Les formations sédimentaires correspondent à un ensemble non uniforme où on trouve un espace marécageux, des dunes sableuses et des plaines fertiles. Ces deux dernières sont considérées comme des formations potentiellement aquifères, elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires. Deux types de flyschs recouvrant partiellement le massif sont présents :

1. Les flysch à microbrèches sénoniens d'âge *Maestrichtien* :

Affleurent sous le numidien en lambeau près d'El Mellaha et Saf-Saf au Nord-ouest du massif de manière transgressive sur le socle métamorphique d'aspect schiste-argileux de teinte noire bleutée devenant verdâtre par l'altération intercalé avec 20 à 50 cm de calcaire sableux et une microbrèche calcaire de couleur gris bleutée (in Laouar R2002) avec des indices de traces de matériels volcano-clastique (fragment de lave vitreuse ou microlitique).

2. Les flysch (grés numidiens) d'âge *Oglio-Miocène* :

Constitués par une alternance de grosses barres métriques à décamétriques de grés grossier à dragées de quartz avec de minces couches pelitiques. Ces grés forment de grosses barres au sommet de la série (Laouar, 2002). Les flyschs numidiens reposent sur les flyschs sénonien, séparés l'un de l'autre par une zone bréchiq ue intensément silicifiés et chloritisé.

3. Le sédimentaire :

3.1. L'ère Secondaire :

Constitué par les terrains allochtones constitués par des calcaires riches en silex, datés du jurassique et par des flysch appartenant du créta cé.

3.2. L'ère Tertiaire :

Très épais et montre trois étages :

- l'étage inférieur dit de l'Eocène est une série transgressive, riches en calcaires massifs à faciès épinéritiques.

-l'étage moyen correspondant à l'Oligocène contient des niveaux argileux-gréseux numidiens à l'origine du relief des montagnes situées au Sud de la plaine.

- l'étage supérieur du Mio-pliocène, remplissage graveleux de sablo-argileux du bassin.

3.3. L'ère récente ou Quaternaire :

Le quaternaire de la plaine d'Annaba montre :

3.3.1. L'ancien :

Composé par des formations alluviales dont les graviers contenant un réservoir d'eau superficielle, c'est la haute terrasse située à une altitude oscillant entre 75 et 150 mètres. Présent au piémont de l'Edough et dans les alentours du lac Fetzara jusqu'à la région de Chihani ; quelques affleurements sont à Besbes et à Zerizer.

3.3.2. Le moyen :

Epais de 20 à 50 mètres et correspond à la basse terrasse, présent dans toute la région, particulièrement au niveau de la vallée d'oued Seybouse et comprend des argiles et des sables supporte des terres cultivées.

3.3.3. Le récent :

Correspond au cordon dunaire littoral d'Annaba, constitué par des dépôts alluvionnaires, limoneux très fins avec dominance d'argile c'est la basse et la moyenne terrasse.

3.3.4. L'actuel :

Il est représenté par des dépôts des lits actuels des oueds à matériaux variés tel que les argiles, les sables et les cailloux, dues à l'érosion des formations traversées par l'oued les plages actuelles par les sables d'origine marine.

Les formations quaternaires s'étendent presque sur la plaine, sont considérées comme des formations potentiellement aquifères.

III. L'ensemble éruptif

Caractérisé par des leucogranites et aplo-pegmatites d'âge Burdigalien (Aissa, 1995), des microgranites et rhyolites d'âge Langhien (Marignac et Zemmermann, 1983). Les leucogranites sont généralement confinés dans les gneiss, alors que les aplo-pegmatites se rencontrent aussi bien dans les gneiss que dans les micaschistes, y compris ceux de la série « des alternances ».

Les microgranites et rhyolites de l'Edough s'intègrent dans le cadre du magmatisme de la marge Nord algérienne appartiennent d'une manière générale à l'ensemble Edough-Cap de Fer (Hilly, 1962).

-les produits de ce magmatisme scellent les grands accidents et les contacts tectoniques plus particulièrement les contacts socle-couverture.

6.1.3. La Tectonique et la déformation de l'Edough

a. Déformations synmétamorphiques

Le socle de l'Edough a subi une histoire tectono-métamorphique complexe où deux séquences d'événements peuvent être individualisées :

- Plissements synschisteux contemporains d'un métamorphisme de type barrovien (disthènestaurotide- grenat).
- Plissements synschisteux et cisaillements ductiles, contemporains d'un métamorphisme de basse pression (andalosite-sillimanite) dans le contexte distensif d'une faille de détachement (Brunel et al, 1988), d'âge Burdigalien (Monié et al, 1992 ; Aissa et al, 1994 ; 1995).

b. Déformations tardives

Elles sont à l'origine de la formation de plis et de failles

- Plis droits à Nord 140° Est et brachyanticlinal Nord 50-60° Est, façonnant la forme actuelle du massif.

- Failles avec un premier type dit (F1) constituant une famille dont l'orientation dominante varie de Nord 120° à Nord 150° Est, et qui correspondrait à des failles décrochantes dextres. Les failles Nord 150° à Nord 160° Est contrôlent les minéralisations polymétalliques hydrothermales et paraissent par ailleurs, avoir guidé la mise en place des rhyolites.

- Les failles (F2), d'orientation Ne-Sw, semble conjugué au type précédent, et aurait probablement joué en décrochements senestres.

6.1.4. Minéralisation du massif de l'Edough

Définie par les gîtes polymétalliques d'Aïn Barbar et des gisements ferrifères sur le versant Sud.

6.2. Plaines littorales

Elles s'étalent le long de la Seybouse, sur une largeur d'environ 15 kilomètres et une longueur de 110 kilomètres – constituées par un ensemble hétérogène avec :

- des dunes sableuses,
- des espaces marécageux,
- des plaines fertiles,
- des petits reliefs.

Dans le détail, nous observons d'ouest en Est :

- la plaine de Guerbes,
- la dépression du lac Fetzara,
- la plaine d'El Hadjar,
- la plaine d'Annaba.

Ces dernières se caractérisent par des sédiments quaternaires récents, constituant le fond. Les grès numidiens sont présents sur les sommets, cas du village de Daghoussa et ses alentours.

Les formations récentes jouent un rôle considérable dans la constitution géologique de la région d'Annaba qui se présente aussi comme un secteur jeune de l'Algérie (Zenati, 2010).

6.3. Le lac Fetzara et sa stratigraphie (Fig.9) :

Le Fetzara, est une vaste dépression de 18 600 ha environ dont le fond est formé par une vase riche en matières organiques. La paroi englobant le lac Fetzara se caractérise par l'affleurement des formations suivantes :

-des alluvions récentes du quaternaire présentes dans la partie supérieure de la colonne lithologique, correspondant au massif de l'Edough et sont constituées de limons, de sable, de gravier et de travertin occupant la plaine alluviale.

-les formations marécageuses actuelles, constituées par les limons du lac Fetzara, forment le fond de la cuvette et ne sont pas bien drainées.

-dépôt récents, présents sur la bordure du lac et est constituées par des limons, d'âge Néopléistocène.

-dépôt anciens, constitués de sable et de limons, datées du récent Pléistocène.

-dépôts d'alluvions riches en sables et en cailloux roulés, parfois mêlés au fer à 30 mètres environ sur les bordures du vieux thalweg, c'est le cas des moyennes terrasses des vallées creusé jadis sur l'emplacement de la dépression du lac Fetzara, d'âge pléistocène ancien.

-les alluvions des hautes terrasses des vallées riches en sables et en cailloux roulés, du niveau de 50 mètres, comprenant de nombreux blocs de grés de Numidie, d'âge pléistocène ancien.

-Alluvions des niveaux bas des plateaux, on y trouve des cailloux roulés au niveau de 100 mètres.

-les grés de Numidie, soit de l'Eocène supérieur ou de l'Oligocène. Ces grès sont quartzeux massifs. On observe des éboulis sur les pentes argileuses qu'ils surmontent.

-argile de Numidie, de couleur verdâtres ou brunâtres. Parfois schisteuses et intercalent avec de petits bans de grés quartzeux ou de marnes calcaires gris bleuâtres, d'âge Eocène supérieur ou Oligocène.

-argiles plus ou moins schisteuses avec bans de calcaires, des brèches à petits éléments de Nummulites, grés de 150 à 200 mètres d'épaisseur et d'âge Eocène moyen.

-Schistes argileux talqueux ou sériciteux.

-Gneiss pouvant se diviser en deux catégories dont les Gneiss inférieurs, 1500 mètres d'épaisseur à micas noirs et blancs, se désagrègent facilement en arènes blanchâtres.

Les gneiss supérieurs fréquemment intercalés de lits de micaschistes et sillonnés de granulite et pegmatite dérivant des micaschistes granulaires.

-Micaschistes traversées par des intercalations de bandes subcontinues ou continues de cipolins.

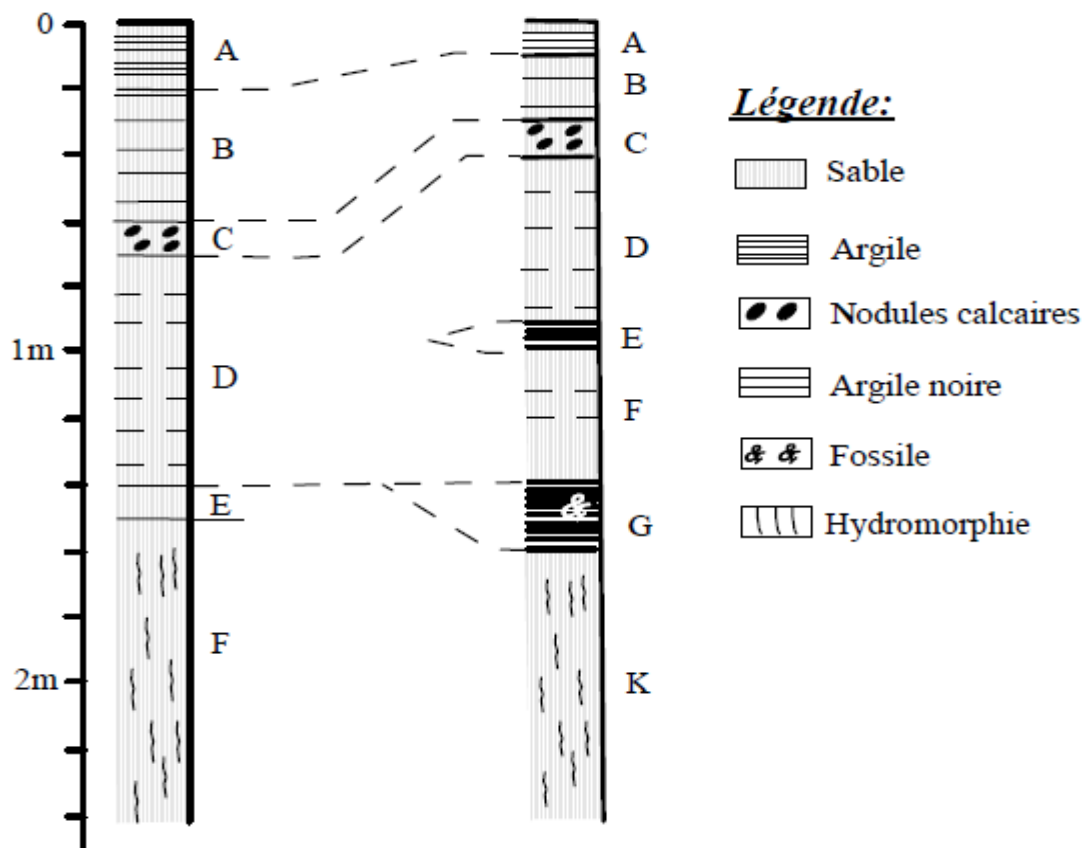


Fig. 9 : Stratigraphie des unités lithologiques du lac Fetzara (In Marre, 1992).

- Des affleurements de flysch de grés de Numidie (quartzeux et rougeâtres), alternant avec des lits d'argile formant les reliefs des massifs du Nord-Ouest et du Sud de la zone, ils sont datés de l'Eocène supérieur associés à des affleurements de marne à ammonites pyriteuses du Crétacé inférieur ainsi que du calcaire du Trias.

- Des roches éruptives et métamorphiques (schistes cristallins et granites) du trias, formant les massifs du Nord de la zone.

Conclusion

La description réalisée montre la mise en place et la contribution de chaque forme de relief sur le fonctionnement du lac. Ainsi la cuvette qui présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques, avec une remarquable couverture végétale, le maquis sur les niveaux plus ou moins hauts et la forêt sur les niveaux de haute altitude.

-Au Sud, est présent un véritable piémont avec plusieurs niveaux de glaciais, s'est construit en avant du Tell Nord Guelmien.

- Au Nord, le massif de l'Edough tombe brutalement dans la cuvette du lac Fetzara.

- A l'Est, une partie sableuse dite lunette sableuse, contribue à l'isolement du lac de la plaine d'El Hadjar.

La région étudiée se caractérise par deux types de formation :

-les terrains métamorphiques, de faible potentialité hydraulique, mais constituent des zones d'alimentation pour les nappes de la région.

-les terrains sédimentaires, un ensemble non uniforme, constitué des dunes sableuses et des plaines fertiles se caractérisent par la présence de sédiments quaternaires, considérés comme des formations potentiellement aquifères.

Chapitre II :

Hydrologie

Introduction

Les caractéristiques climatiques influencent les variations des réserves hydriques souterraines, ainsi il devient impératif de connaître leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Aujourd'hui de nombreuses questions se posent concernant l'avenir de la planète terre vis-à-vis les changements des caractéristiques climatiques. Le continent Africain reste le plus exposé aux soubresauts du climat. La connaissance des paramètres climatiques est primordiale pour la connaissance de la recharge des nappes. Dans la nature tout passe par le cycle de l'eau qui donne un aperçu sur l'état saisonnier des précipitations. La mesure des paramètres climatiques est souvent marquée par des lacunes ce qui complique la tâche du chercheur et biaise les interprétations conduisant souvent à des erreurs fatales. Le présent travail prend en considération les mesures issues des quatre (04) stations situées dans les environs du lac Fetzara, il s'agit de la station des Salines (Annaba), de celle de Pont Bouchet, de celle de Berrahal et celle d'Ain Berda.

La connaissance de l'hydrologie d'une région donnée conduit à l'estimation de son bilan d'eau et situation c'est-à-dire déficitaire ou excédentaire. Ce qui revient à l'estimation de la quantité d'eau transitant ou restant dans la région.

Concernant la région du lac Fetzara, les quantités transitant par les différents Oueds alimentant le lac, elles varient en fonction des précipitations enregistrées au niveau des stations prises en considération.

Dans ce chapitre, on va déterminer les facteurs impactant l'hydroclimatologie de la région qui sont :

- les variations du climat et l'estimation du bilan hydrologique pour chaque station,
- les écoulements de surface provoqué par le débit des oueds qui sont en interconnexion avec le lac Fetzara ; la relation lac-Oueds.

i. Hydroclimatologie :

Introduction

La compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines, requiert la réalisation d'une étude des caractéristiques hydroclimatique d'un bassin ou de son sous bassin versant, on doit connaître ses précipitations, ses températures et son évapotranspiration.

La détermination de la quantité d'eau écoulee ou infiltrée est faite à partir de la connaissance des paramètres climatiques. Ces paramètres peuvent expliquer les modes d'écoulement des eaux ascendants ou descendants des eaux. Dans ce contexte il devient nécessaire l'établissement du bilan hydrique. Ainsi on doit tenir compte des variations des

précipitations, des températures et de l'évapotranspiration potentielle ou réelle pour le bilan hydrique et sa situation vis-à-vis de l'écoulement.

La zone entourant le lac Fetzara, comprend quatre stations météorologiques, ce qui nous permettra d'avoir une estimation plus ou moins bonne de ses caractéristiques climatiques. .

Les stations de mesure et leurs particularités :

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 disponibles au niveau des quatre stations, situées dans les régions entourant le lac, c'est-à-dire non loin du lac Fetzara, il s'agit de celle d'Ain Berda, de celle Berrahal, de celle des Salines et de celle de Pont Bouchet. Le tableau N°1, donne des indications sur l'emplacement des stations météorologiques présentes au niveau de la Wilaya d'Annaba.

Tab. 1 : Indications sur les stations météorologiques utilisées dans cette étude. (A.N.R.H).

Stations	Coordonnées Lambert (km)		Altitudes (m)	Période d'observation	Distance par rapport au lac
	x	y			
Ain Berda	937.60	387.75	73	32ans (1981-2013)	8 km au S.E
Berrahal	923.35	405.56	33	30 ans (1987-2017)	2 km au N.O
Les salines	955.80	403.80	3	30 ans (1987-2017)	15 km au N.E
Pont Bouchet	950.25	402.80	10	41 ans (1980-2021)	12 km au N.E

Les données climatiques recueillies sont calculées selon des moyennes mensuelles et les hauteurs en fonction des pluies recueillies sur chaque station pour une période déterminée :

- de 32 ans (1981-2013), Ain Berda,
- de 41 ans (1980-2021), Pont Bouchet
- de 30 ans (1987-2017), Berrahal et Salines.

1. Analyse des facteurs climatiques :

La disponibilité de la ressource en eau est liée aux apports issus des précipitations. Ces dernières années furent particulièrement marquées par des perturbations dans la répartition saisonnière des précipitations et les quantités des précipitations enregistrées due au réchauffement climatique, compliquant toute estimation des bilans hydriques.

1.1. Analyse des précipitations et leurs variations:

L'ampleur des précipitations, conditionne le régime des cours d'eau et la recharge des nappes. Cette partie sera consacrée à l'analyse des précipitations, ce qui nous permettra de quantifier les quantités d'eau tombées sur la région.

Etats de la variation des précipitations :

Pour étudier la variation des précipitations, nous allons déterminer dans une première étape le coefficient pluviométrique ce dernier renseigne sur l'état hydrique de la zone d'implantation de la station.

1.1.1. Le coefficient pluviométrique (CP) et ses variations

Le coefficient pluviométrique annuel CP, montre les variations interannuelles des précipitations.

Ce coefficient est donné par l'équation suivante :

$$CP = Pi/P$$

Avec : Pi : précipitation annuelle enregistrée (mm),

P : Moyenne de la précipitation calculée sur la période totale (mm)..

Si $CP > 1$ = excédent.

Si $CP < 1$ = déficit.

Les valeurs du coefficient pluviométrique obtenues sont en annexes 01 et 02.

Les pluviométries moyennes annuelles des précipitations (\bar{P}) enregistrées durant la période d'observation sont de l'ordre de 653.25 mm (Ain Berda), 845.2 mm (Berrahal), 653.7 mm (les Salines) et 658.05 mm (Pont Bouchet).

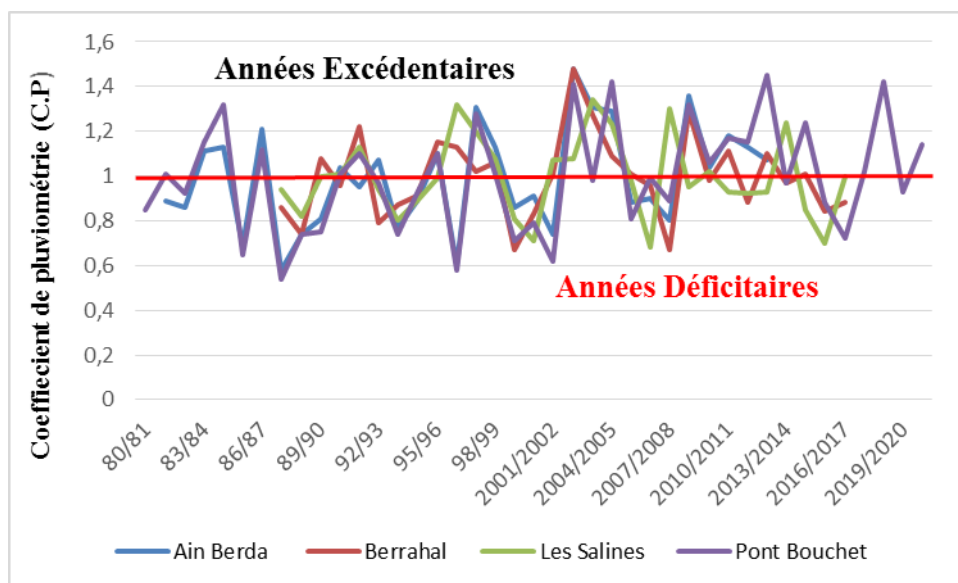


Fig. 10 : Les variations des coefficients pluviométriques aux stations considérées.

L'observation du précédent graphique (fig. 10) montre une succession des épisodes excédentaires et des épisodes déficitaires. Les années déficitaires ont marqué la période allant de 1992 jusqu'à 1998. Les années déficitaires vont de l'année 2001-2002 jusqu'à l'année 2007-2008 et de l'année 2010-2011 jusqu'à l'année 2016-2017, pour les quatre stations.

Les coefficients pluviométriques calculés pour chaque station de mesure sont reportées dans le tableau N°2 suivant :

Tab. 2 : Récapitulatif des coefficients pluviométriques.

Situation hydrique /Station	Ain Berda	Berrahal	Les Salines	Pont Bouchet
Année Excédentaire	16	15	14	20
Année Déficitaire	16	15	16	21
Moyenne (mm)	54.43	845.2	653.7	54.83
Années d'observation	32	30	30	41

L'observation du tableau (2) et en comparaison avec les courbes de variation du coefficient pluviométrique (la figure 10), montre la même évolution pour les quatre stations elle met en évidence aussi une tendance à l'égalité entre les types d'année (excédentaires et déficitaires). On retrouve sensiblement le même nombre d'années de part et d'autre.

1.1.2. Les précipitations en Algérie :

La carte des précipitations de l'Algérie, réalisée en 2021 par Saifouni A démontre que la zone d'étude se caractérise par une précipitation oscillant entre 700 à 1500 mm/an. Cette partie correspond à la région la plus pluvieuse en Algérie.

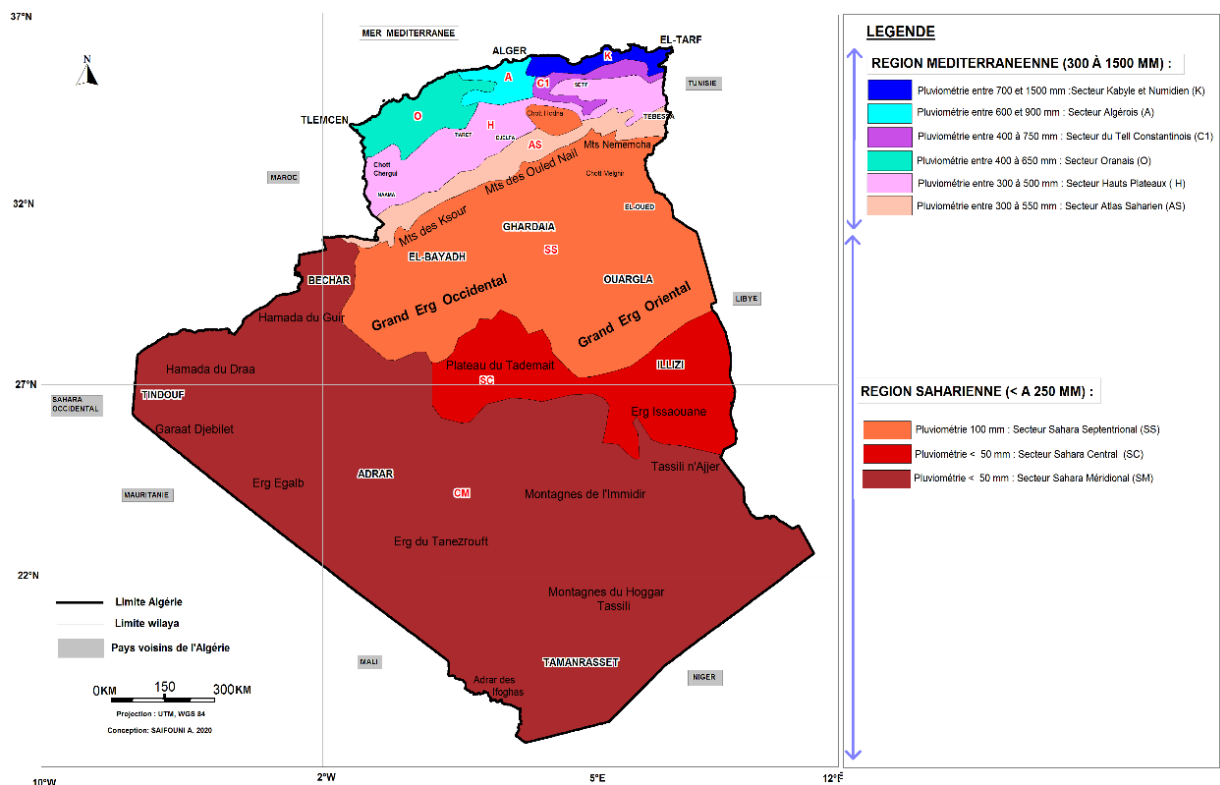


Fig. 11 : Carte pluviométrique de l'Algérie (in SAIFOUNI A. (2021))

1.1.3. Variation moyenne mensuelle

Les mesures de précipitations moyennes mensuelles des quatre stations sont portées sur le tableau (3).

Tab. 3 : Précipitations moyennes mensuelles (en mm).

Mois/Station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Ain Berda	41,01	58,14	77,59	104,76	93,73	77,04	68,22	60,35	42,9	11,38	6,5	11,6
Berrahal	43	71,8	109,6	157,5	152,3	106,5	70,7	55,8	45,2	18,1	3,4	11
Les Salines	40,9	52,9	94,3	107,8	96,7	57,7	69,2	54,5	36,6	12,3	3,4	9
Pont Bouchet	37,93	63,22	100,41	107,19	94,06	75,23	68,58	51,67	34,71	11,83	2,1	11,07

A partir de l'observation du tableau 3, on note que les mois les plus pluvieux s'étalent entre le mois de septembre et le mois d'Avril. Les mois de Juin, Juillet et Août sont considérés comme secs car il ne pleut pratiquement pas.

a. Répartition moyennes mensuelles des pluies :

Les histogrammes (fig.12), réalisés montrent la variation de la quantité de pluie mesurée au niveau de chaque station considérée.

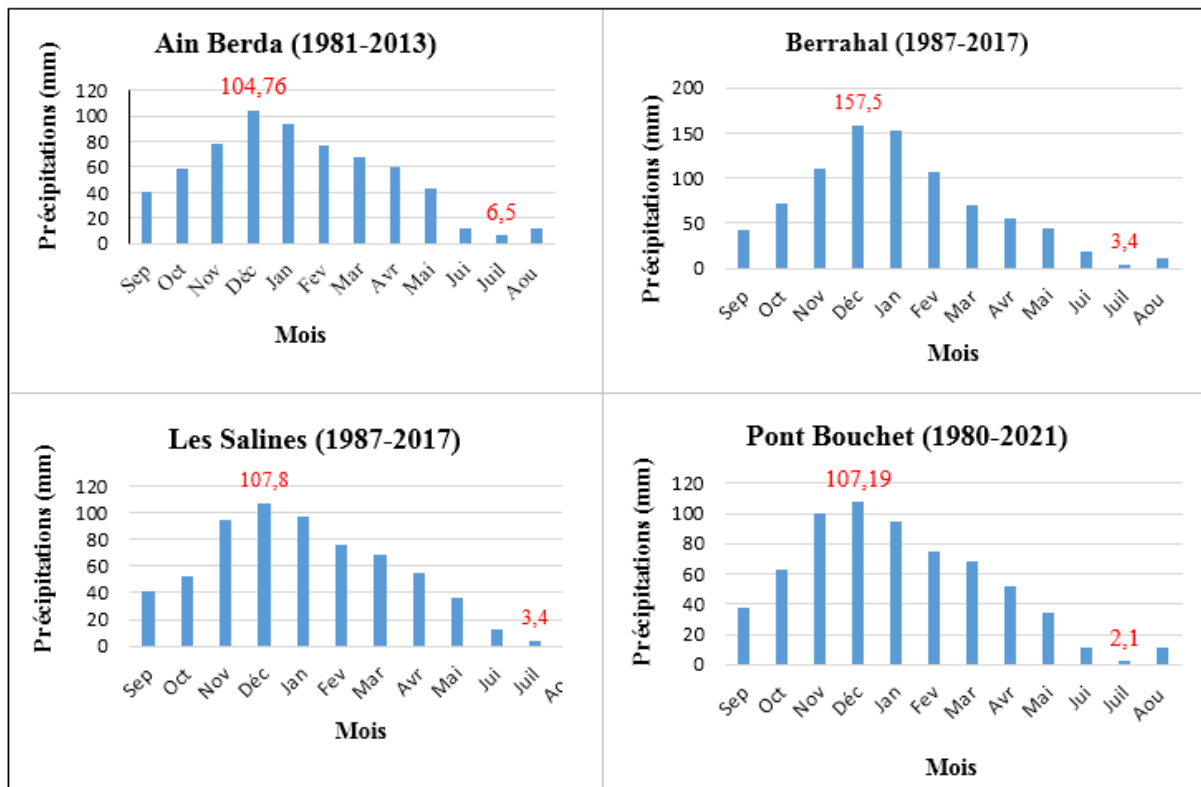


Fig. 12 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (mm). Stations d'Ain Berda, Berrahal, Les salines et Pont Bouchet.

L'observation de la figure 12, montre une variation mensuelle des précipitations. Le maximum est atteint au mois de Décembre pour les quatre stations il est de 104.76 mm à Ain Berda, de 157.5 mm à Berrahal, de 107.8 mm aux Salines et de 107.19 mm à Pont Bouchet mais le minimum est enregistré au mois de Juillet pour les quatre stations, il est de 6.5 mm à Ain Berda, de 3.4 mm à Berrahal, de 3.4 mm aux Salines et de 2.1 à pont Bouchet.

1.1.4. Variation annuelle des précipitations

Les figures, 13, 14, 15 et 16, portent sur les variations interannuelles des précipitations pour chacune des stations considérées. Ainsi on note pour chaque station :

a. Ain Berda : on remarque une alternance entre les périodes pluvieuses caractérisées par un excès des précipitations (supérieures à la moyenne (653.25 mm)) et les périodes dont les précipitations enregistrées sont inférieures à la moyenne. Par ailleurs nous remarquons deux épisodes, le premier déficitaire allant de l'année 85-86 à l'année 91-92 au cours de cette période les précipitations enregistrées sont inférieures à la moyenne. Le second épisode excédentaire part de l'année 1999-2000 et se prolonge jusqu'à l'année 2005-2006, au cours de cette période les précipitations sont supérieures à la moyenne.

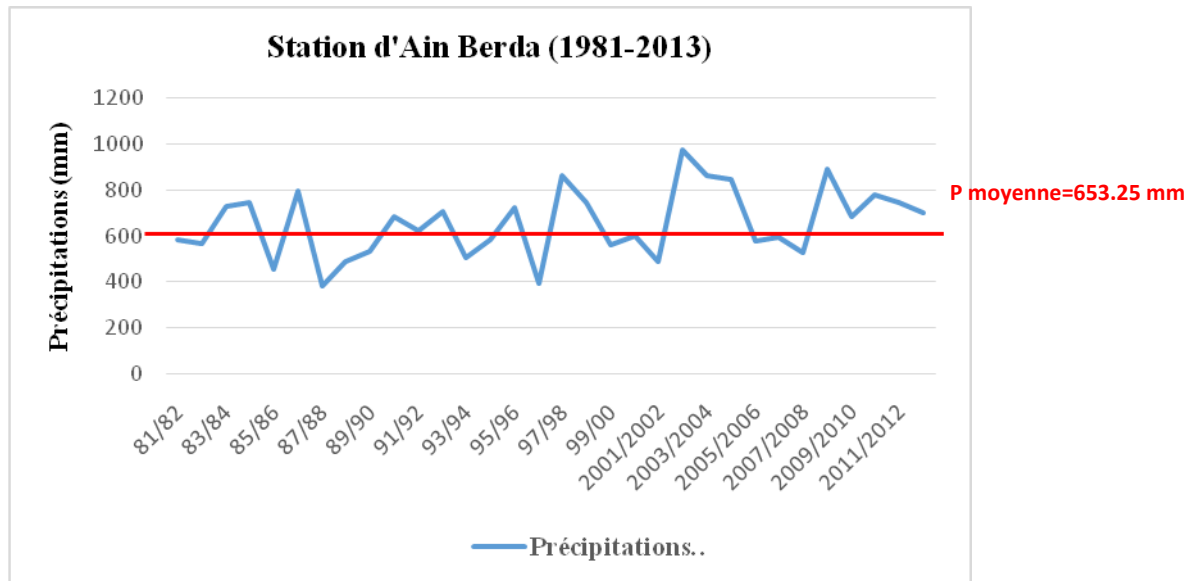


Fig. 13 : Variation des précipitations annuelles à la station d’Ain Berda (mm) (de 1981 à 2013).

b. Berrahal : l’observation du diagramme suivant montre un épisode pluvieux allant de 1999/2000 jusqu’à 2005/2006. Au cours de cette période les précipitations enregistrées sont supérieures à la moyenne déterminée (845.2 mm)

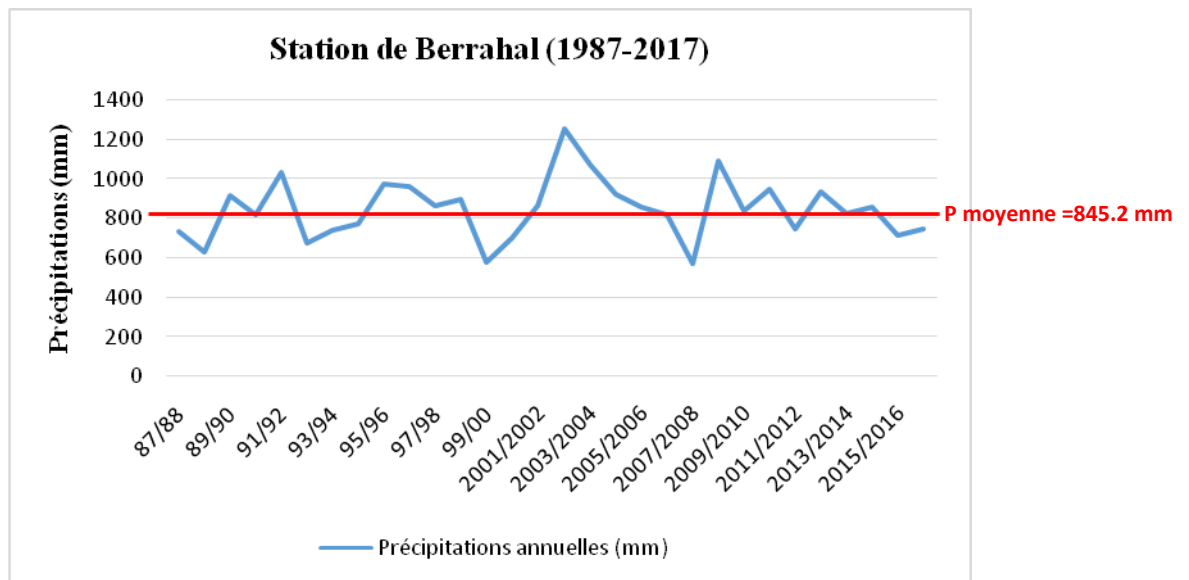


Fig. 14 : Variation des précipitations annuelles à la station de Berrahal (mm). (de 1987 à 2017).

c. Station des Salines : L'observation du diagramme suivant, montre une alternance un épisode pluvieux allant de 93/94 jusqu'à 2005/2006 entrecoupé par quatre années (97/98 à 2001/2002) au cours de cette période les précipitations enregistrées avoisinent 450 mm/an, très en dessous de la moyenne annuelle de la station traduisant un déficit.

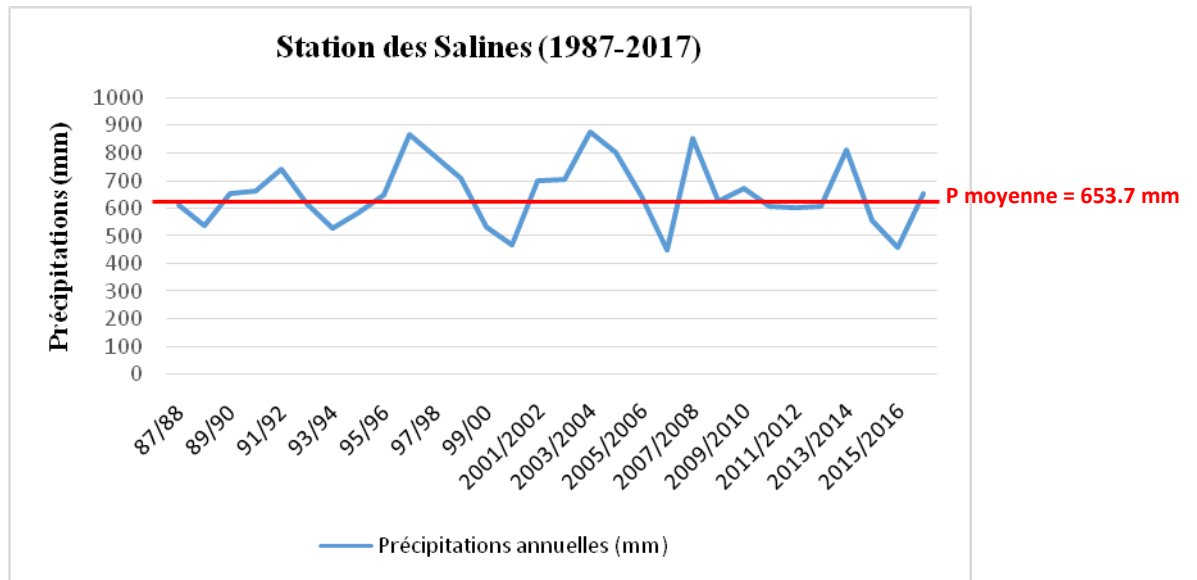


Fig. 15 : Variation des précipitations annuelles à la station des Salines (mm) (de 1987 à 2017).

d. Station « Pont Bouchet » : l'observation du diagramme, montre une alternance entre les épisodes avec cependant une période marquée par un déficit ($P < 656.05$) pour la période allant de l'année hydrologique 1983-1984 à celle de 2001/2002. Pour cette période seules les années 96/67 à 98/99, se caractérisent par un excès des précipitations.

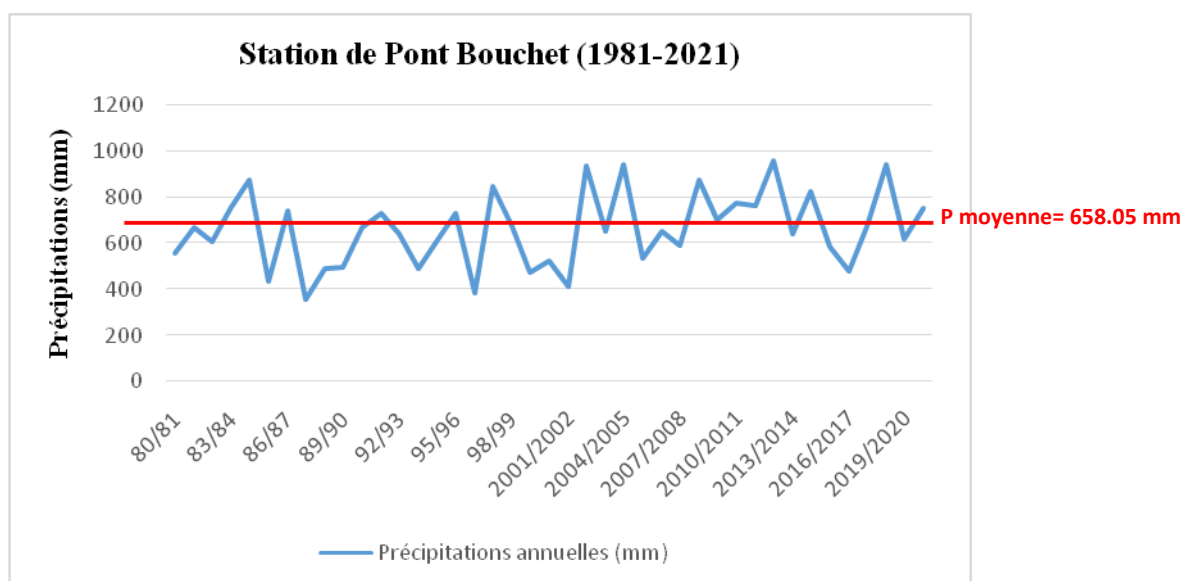


Fig. 16 : Variation des précipitations annuelles (mm) station du Pont Bouchet (1981-2021).

L'observation des courbes des variations annuelles des précipitations montre que les années les plus arrosées sont :

- l'année 2008/2009, avec 888.5 mm/an pour la station d'Ain Berda,
- l'année 2003/2004, avec 1275 mm/an pour la station de Berrahal,
- l'année 2003/2004, avec 877.7 mm/an pour la station des Salines,
- l'année 2018/2019, avec les 938.8 mm/an, pour la station de Pont Bouchet.

En outre la pluviométrie la plus faible est de 382.1 mm/an et 356.1 mm/an, ces taux ont été enregistrés en 1987-1988, respectivement à Ain Berda et Pont Bouchet. Une précipitation de l'ordre de 570 mm/an mesurée au niveau de la station de Berrahal au cours de l'année 2007-2008, des précipitations de 450.9 mm/an au niveau de la station des Salines (2006-2007).

1.1.5. Variation saisonnière des précipitations :

Il est connu, que les variations saisonnières impactent directement la répartition quantitative des précipitations.

L'année est divisée en quatre saisons (automne, hiver, printemps et été). Chaque saison d'une durée de trois mois et se caractérise par ses variations en précipitations et en températures.

Appliquée à la zone d'étude on obtient la répartition du tableau N°4.

Tab. 4 : Répartition saisonnière des précipitations dans les stations d'Ain Berda (1981-2013), Berrahal, Les Salines (1987-2017) et Pont Bouchet (1980-2021).

station	Ain Berda												
saisons	Automnes			Hiver			Printemps			Eté			Total
mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	
P (mm)	176.74			275.53			171.47			29.48			653.22
P (%)	26			43			26			5			100
station	Berrahal												
P (mm)	224.5			416.3			171.8			32.6			845.52
P (%)	27			49			20			4			100
station	Les Salines												
P (mm)	188.2			280.3			160.4			24.8			653.7
P (%)	29			43			25			4			100
station	Pont Bouchet												
P (mm)	201.56			276.48			145.96			25			649
P (%)	31			43			22			4			100

Les résultats obtenus, nous ont permis la réalisation de la figure (17) qui visualise les répartitions saisonnières des précipitations pour chaque station considérée. L'examen du tableau 4 et de la figure 17, montre que l'hiver est le plus arrosé, avec un taux de précipitations de :

- 275.53 mm, soit 43% pour Ain Berda ;
- 416.3 mm, soit 49% à Berrahal ;
- 280.3 mm, soit 43 % aux Salines,

-276.48 mm, soit 43 % à Pont Bouchet.

Ainsi autour de 50 % précipitations enregistrées tombent au cours de la saison hivernale.

Nous remarquons qu'en automne et au printemps il tombe la même quantité des pluies pour les quatre stations. Le pourcentage enregistré oscille entre 20 % et 31 %, par rapport au total des précipitations pour chaque station considérée. Par contre, l'été est le plus sec, il ne tombe que 4 à 5 % de la totalité des pluies.

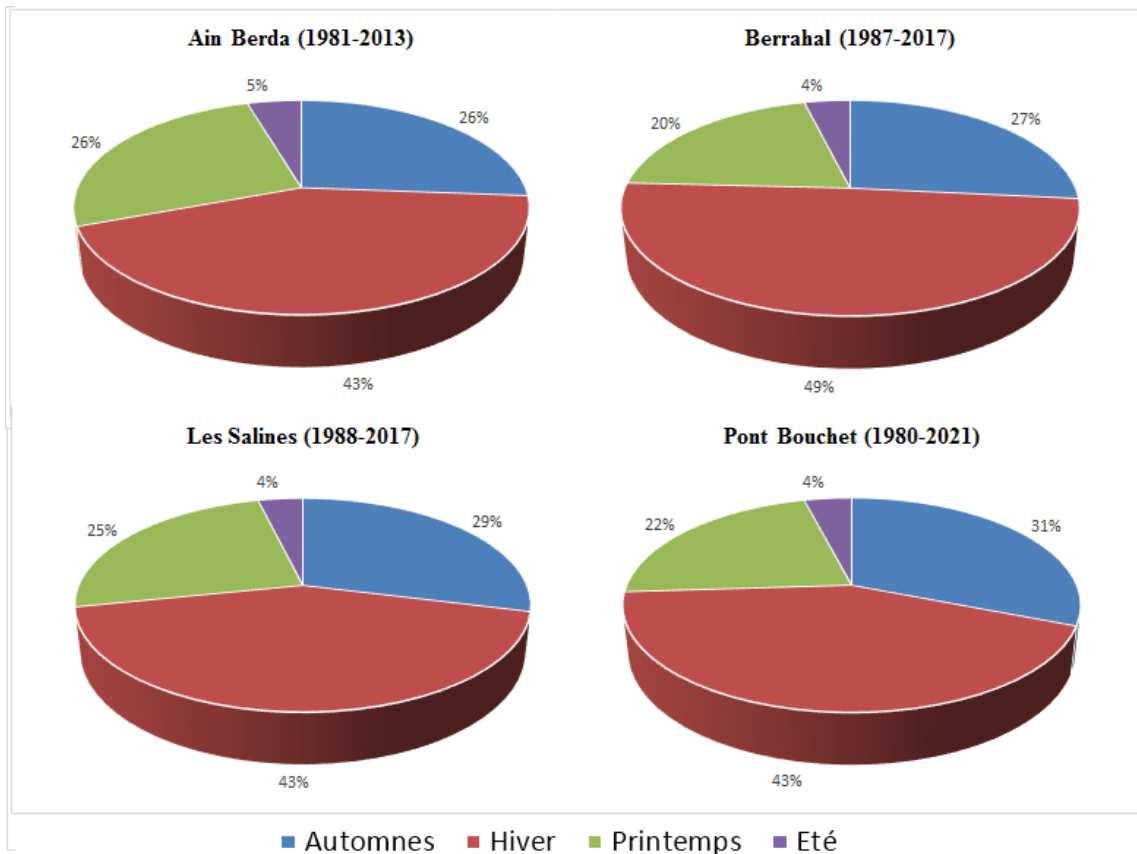


Fig. 17 : Répartitions saisonnières des précipitations (Pourcentage).

1.2. Analyse des températures

La température est le second élément conditionnant le climat d'une région, elle joue un rôle déterminant pour l'accentuation ou le ralentissement de l'évaporation et de l'évapotranspiration, elle permet aussi le calcul du bilan hydrique et par conséquent la détermination des écoulements annuels et saisonniers. Les températures mensuelles et annuelles sont issues des mesures réalisées sur les stations de Berrahal et des Salines sur une période de 30 ans (1987-2017).

1.2.1. Variations moyennes mensuelles

Contrairement aux précipitations, enregistrées au niveau des quatre stations de la zone d'étude. Les températures sont enregistrées aux stations de Berrahal et des Salines, car

disposent de moyen de mesure de la température. Les valeurs enregistrées sur 30 années d'observation (1987-2017) sont récapitulées dans le tableau N° 5 suivant.

Tab. 5 : Températures moyennes mensuelles (Berrahal et Salines (1987-2017)).

Mois	Station de Berrahal											
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Min	17.6	13.5	9.3	6	4	3.9	6.2	8.1	10.3	16.1	19	20.8
Moyenne	22.3	20.5	16.1	13.1	11.4	12.1	13.5	15.4	18.1	23	25.3	26.1
Max	31.1	28.2	22.2	19.2	17.3	18.9	21.5	23.3	26.9	31.6	34.3	35.3
Mois	Station les Salines											
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Min	21.8	18.1	13.9	10.7	7.4	8.4	8.5	13.7	12.2	11.4	20.6	20.7
Moyenne	23.6	20.5	15.7	12.3	11.8	11.4	13.0	15.4	18.4	21.7	25.1	25.8
Max	26.3	28.7	18.6	14.7	20.2	14.3	16.0	17.9	21.9	27.6	28.1	28.8

La figure 17, montre les variations annuelles des températures pour les deux stations considérées.

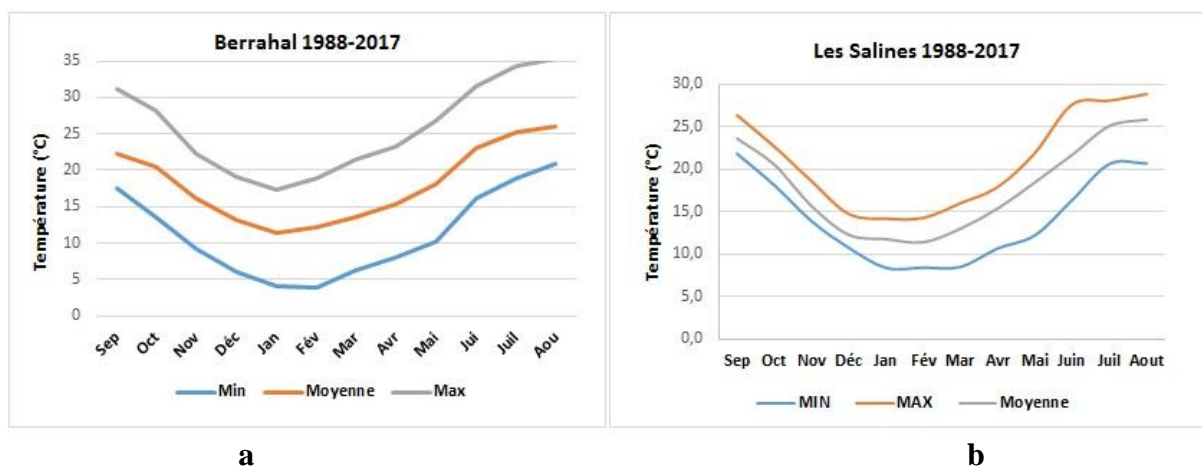


Fig. 18 : Variations des températures mensuelles maximales, moyennes et minimales (°C). Berrahal (a) et les Salines (b), de 1988 à 2017).

Les résultats reportés dans le tableau 5 et l'observation de la figure 18, montrent que les mois les plus chauds sont Juillet et Aout avec :

- 25.3 et 26.1 °C à Berrahal,
- 25.1 et 25.8 °C, aux Salines.

En opposition, les mois les plus froids sont : Décembre, Janvier et Février où sont enregistrées les températures de :

- 13.1 °C, 11.4 °C et 12.1 °C, pour Berrahal,
- 12.3°C, 11.4 °C et 11.8 °C, pour les Salines.

En comparant les variations des températures (fig. 19), au niveau des deux stations, nous remarquons une similitude dans les variations. Nous observons quelques décalages qui sont imputables au mode de mesure réalisé par les techniciens.

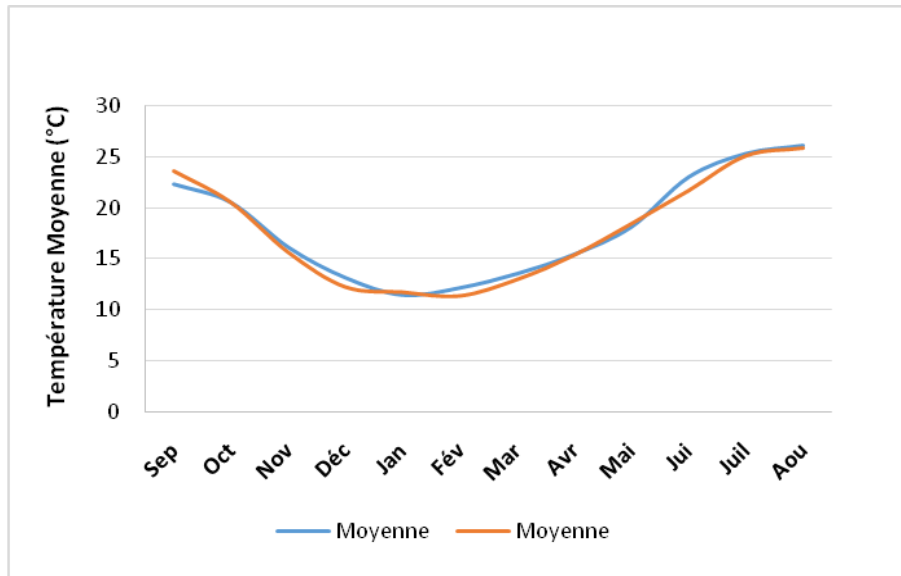


Fig. 19 : Variations des moyennes mensuelles des températures (°C) Berrahal et les Salines (1988-2017).

1.3. L'humidité de l'air

L'humidité relative est le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la température mesurée au thermomètre sec, elle est exprimée en pourcentage (%). L'analyse des moyennes mensuelles, indique une variation entre les valeurs mesurées en Hiver et celles mesurées en Eté. Au mois de Janvier, on a enregistré 79.95% par contre au mois de Juillet, on a 74.23 %. Notons que la moyenne annuelle est de l'ordre de 70.23 % et la moyenne mensuelle atteint une valeur limite de 70 %.

Le tableau N° 6, récapitule les moyennes mensuelles de l'humidité (station des Salines au cours de 30 ans ; 1987/2017).

Tab. 6 : Variations de l'humidité relative moyenne mensuelle (en %), Salines (1987-2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moyenne
Humidité (%)	71.45	74.50	75.80	77.20	79.95	77.00	74.60	74.10	73.45	71.00	70.50	71.30	74.23

1.4. Indice de De Martonne

Emmanuelle De Martonne, en 1923, a défini un indice d'aridité "A", donné par la formule suivante :

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

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles pour la station considérée (mm).

T : température moyennes annuelles pour la station considérée (°C).

L'indice de De Martonne classe le climat comme suit :

Si l'indice est:

- quand $A < 5$: climat hyperaride.
- quand $5 < A < 7,5$: climat désertique.
- quand $7,5 < A < 10$: climat steppique.
- quand $10 < A < 20$: climat semi-aride.
- quand $20 < A < 30$: climat tempéré.

Les indices obtenus sont reportés dans le tableau N°7 suivant.

Tab. 7 : Résultats de l'indice d'Aridité de De Martonne (A).

Stations	P	T	A	Climat
Berrahal	845.2	18.07	30.11	Climat tempéré
Les Salines	653.7	17.9	23.43	Climat tempéré

Les résultats obtenus, montrent que l'indice oscille entre 30.11 (Berrahal) et 23.43 (les Salines), ces valeurs classent les deux stations dans la catégorie ($20 < A < 30$), indiquant un climat tempéré pour la région d'étude.

1.5. Analyse du vent

Le vent est un élément déterminant du régime pluvial donc du climat. Le tableau (8), récapitule les vitesses du vent (en m/s), issues des mesures réalisées à la station des Salines. Les vitesses oscillent entre 3.34 et 4.03 m/s. Ces vents qui sont en contact avec le massif de l'Edough et la barrière montagneuse du Sud, déversent des pluies au passage.

Tab. 8 : Vitesse moyenne mensuelle des vents à la station des Salines (1987 – 2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
le vent (m/s)	3,71	3,96	3,87	3,82	3,62	3,86	4,03	3,81	3,65	3,34	3,65	3,75

L'observation du tableau précédent, montrent que le mois d'octobre de Mars, d'Avril et d'Août, sont les vents les plus rapides, ces derniers oscillant entre 3.75 et 4.03 m/s mais au mois de Juin la vitesse est faible de l'ordre de 3.34 m/s.

1.6. Type de Climat

Il est déterminé à partir de la courbe ombrothermique. Les figures 20a & 20b, caractérisent un climat Méditerranéen caractérisé par la succession de deux saisons, la première dite la saison humide, correspondant à la période de forte pluviométrie et une faible température, et l'autre saison dite sèche caractérisée par une forte température et une faible précipitation.

Au niveau de la station de Berrahal la saison humide s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai, au cours de cette période, les précipitations sont importantes atteignant leur maximum aux mois de Décembre et Janvier avec 157.5 mm de pluie et une température minimale de 11.4 °C.

Concernant la station des Salines, la saison humide s'étale du mois d'Octobre au mois de Juin, durant cette période les précipitations atteignent un maximum de 107.85 mm les températures sont basses et atteignent un minimum de 11.75°C, enregistré au cours du mois de Décembre. La saison sèche occupe le reste des mois, c'est-à-dire du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre, pour les deux stations. Au cours de cette période les températures maximales atteintes oscillent entre 25 et 26°C.

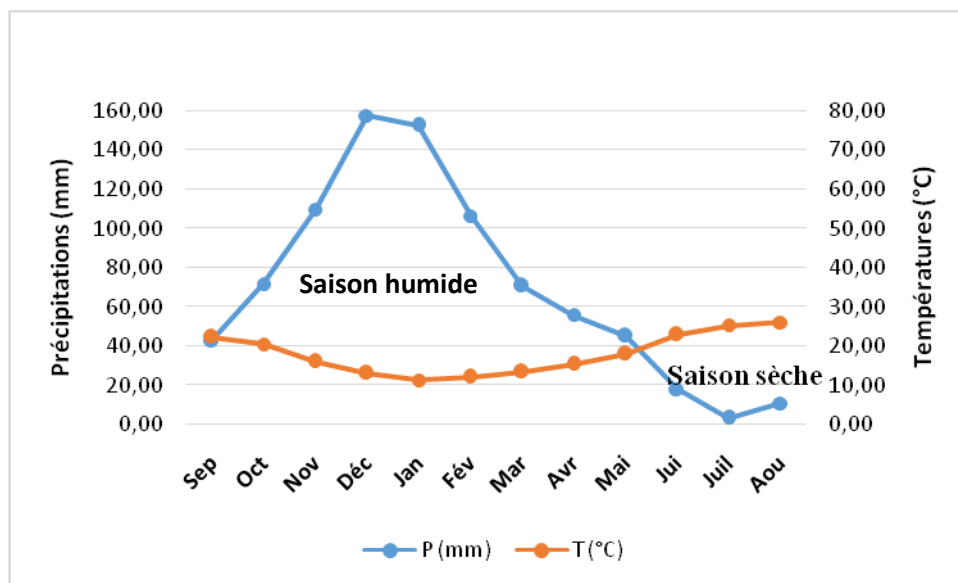


Fig. 20a. Courbe ombrothermique de la station de Berrahal. (1987-2017).

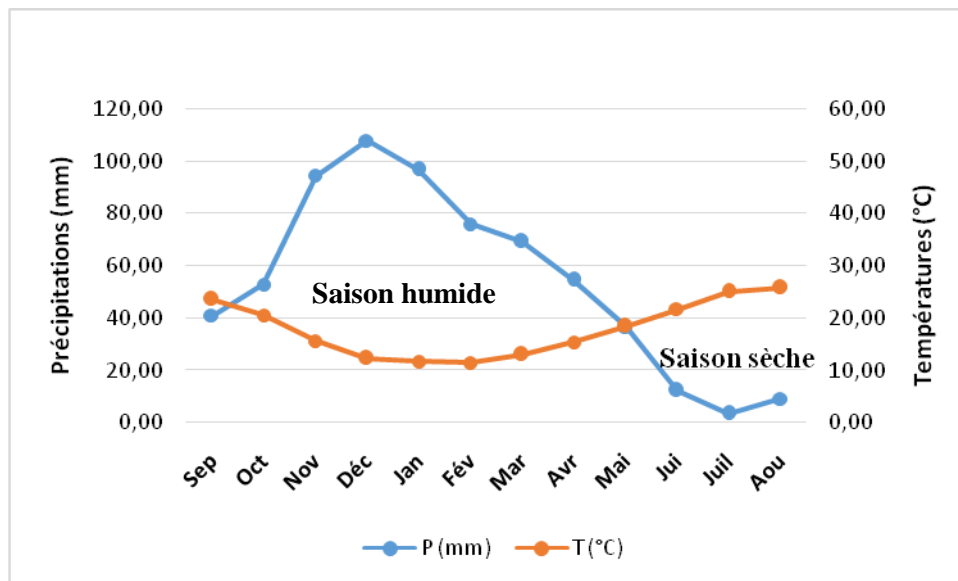


Fig. 20b. Courbe ombrothermique de la station des Salines (1987-2017).

1.7. Bilan Hydrique

Le but principal du bilan hydrique est de définir l'état de la zone d'étude en matière de quantité d'apports et d'exhaures le bilan est calculé pour évaluer l'état de la ressource et d'élaborer les projets. Le bilan hydrique est en fonction des paramètres suivants : précipitations, évapotranspiration réelle ou potentielle, du ruissellement et de l'infiltration. Ces composantes doivent être mesurées sur site (précipitations) ou calculer à l'aide de formules souvent empiriques. Le bilan hydrique est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement moyen annuel (mm)

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

Le calcul des paramètres du bilan hydrique est effectué en utilisant les données des stations de Berrahal et des Salines, car possédant des séries complètes étalées sur 30 ans (1987 à 2017).

1.7.1. Définition des paramètres du Bilan Hydrique

a. L'Evapotranspiration :

L'évapotranspiration en terme hydrogéologique, résultant de l'évaporation et de la transpiration.

Elle reste un paramètre important du bilan hydrologique et ceci après les précipitations. On a :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP).

- L'évapotranspiration réelle (ETR).

Les deux évapotranspirations, réelle et potentielle se mesurent directement sur le terrain en utilisant des bacs utilisés pour estimer l'évaporation ou à l'aide d'un évaporomètre ou par des lysimètres introduit à quelques centimètres du sol et sont aussi issues de l'utilisation des lois de Turc ou de Thornthwaite, cette dernière s'adapte mieux à la réalité du climat de la région.

L'Évapotranspiration Réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle dite déficit d'écoulement, c'est la quantité d'eau utilisé par les plantes donc évaporée ou transpirée par : le sol, les végétaux, pour une surface donnée, en tenant compte de la disponibilité de l'eau dans le sol. L'estimation de l'évapotranspiration réelle, peut se faire en utilisant les trois formules suivantes :

- Turc.
- Coutagne.
- Thornthwaite.

-TURC :

Cette loi, prend en considération la durée d'ensoleillement. S'applique à tous les climats. Donnée par :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec : **ETR** : Evapotranspiration réelle annuelle (mm),

P : Précipitation annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle (°C),

L : Pouvoir évaporant de l'atmosphère, estimé par $L = 300 + 25T + 0.05T^2$

Le Tableau N°9, récapitule les résultats obtenus.

Tableau. 9 : ETR annuelle méthode de « Turc ».

Paramètres Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
Berrahal	845.2	18.07	768.07	581.86
Les Salines	653.7	17.90	763.52	511.54

b. L'Évapotranspiration Potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale d'eau évaporée ou et respirée en tenant compte de la surface et de la période de précipitations bien définie au préalable avec des apports d'eau suffisants.

Chapitre II. Hydrologie

L'évapotranspiration potentielle, est estimée en appliquant la loi de C. W Thornthwaite (1954), cette dernière utilise :

- la température de l'air,
- la latitude de la station.

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^{\alpha} \times K \quad \alpha = 0.016I + 0.5$$

$$I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

Avec : **T** : Température moyenne annuelle (° C).

i : Indice thermique mensuel, Déterminé par l'expression ; $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.5}$

I : total des indices mensuels (i). $I = \sum C_i.P$

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle calculée (mm).

K : coefficient de correction

Les résultats de l'évapotranspiration réelle obtenus sont récapitulés dans les tableaux suivants (10&11) :

Tab. 10 : ETP obtenue pour la Station de Berrahal (1987-2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
I	9,62	8,47	5,87	4,30	3,48	3,81	4,50	5,49	7,01	10,08	11,64	12,21	86.48
ETP	100.05	74,00	38,69	24,49	19,65	23,50	37,76	54,56	84,90	134,33	160,75	158,92	911.61

I = 86.48 ; **a** = 1.88, avec ; **a** : se calcul à partir de la formule : $a = 1.6(I/100) + 0.5$

Tab. 11 : ETP obtenue pour la station des Salines (1987-2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
I	10.47	8.47	5.63	3.89	3,65	3,48	4,25	5,48	7,22	9.22	11.49	12,01	85.26
ETP	109.85	79.71	42.71	25.52	25.33	23,36	36.18	52.86	81.60	111.16	148.17	146.49	882.93

I = 85.26 ; **a** = 1.86

De nombreux auteurs préconisent (Benchaib W, Aoun Sebaiti B, Djabri L...), l'utilisation de la méthode de Thornthwaite car c'est la plus appropriée pour le calcul du bilan hydrique dans la région. Cette méthode en plus de sa facilité d'utilisation contient un facteur de correction K qui intègre la durée d'insolation, cette durée d'insolation est importante dans la région.

A titre indicatif, nous donnons dans le tableau suivant la durée annuelle d'ensoleillement à Annaba. Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 12 suivant.

Tab. 12 : Durée d'ensoleillement à la station des Salines.

Mois	Moyenne quotidienne	Total par mois	Mois	Moyenne quotidienne	Total par mois
Janvier	4.5	140	Aout	10	315
Février	6	165	Septembre	8,5	250
Mars	6.5	200	Octobre	6,5	200
Avril	7	205	Novembre	5	155
Mai	8.5	260	Décembre	4,5	135
Juin	10	300	Année	7,3	2675
Juillet	11.5	350			

La durée d'ensoleillement avec une moyenne mensuellement de 223 heures/mois, est considérable et conforte notre choix pour la méthode de Thornthwaite.

c. Le Ruissellement (R)

Le ruissellement est calculé par les deux formules suivantes :

➤ La formule de Tixeront-Berkaloff :

$$R = \frac{P^3}{3} \times (ETP)^2 \quad \text{assortie de la condition suivante : les précipitations inférieures à 600 mm/an (P < 600 mm/an).}$$

Avec :

R : ruissellent en (mm),

P : précipitation moyenne annuelle (mm),

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

➤ La loi établie par Tixeront-Berkaloff, a été modifié par Romantchouk (1974) (in Daifallah, 2008), on obtient :

$$R = \frac{P^3}{3} \quad \text{Quand } P > 600 \text{ mm/an.}$$

Avec :

R : ruissellent en (mm),

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

Les précipitations enregistrées au niveau des deux stations, dépassent 600 mm, de ce fait on va utiliser la formule de Romantchouk. Les résultats obtenus pour les deux stations sont reportés dans le tableau 13 suivant.

Tab. 13 : Résultats du ruissellement obtenus pour les deux stations (1988-2017).

Stations \ Paramètres	P (mm)	R (mm)
Berrahal	845.2	201.25
Les Salines	653.7	093.11

d. L'Infiltration (I) :

Elle correspond à la quantité d'eau qui va percoler vers la nappe. Elle est donnée par la formule suivante issue du bilan hydrique:

$$R = ETR + R + I \iff I = P - (ETR + R)$$

Avec :

I : L'infiltration (mm),

P : Précipitation moyenne annuelle (mm),

R : Ruissellement (mm),

ETR : Evapotranspiration annuelle (mm).

Les résultats sont dans le tableau N°14, suivant :

Tab. 14 : Valeurs de l'infiltration calculées en utilisant l'équation fondamentale du bilan hydrique.

Stations / Paramètres	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Berrahal	845.2	581.86	201.25	62.09
Les Salines	653.7	511.54	093.11	49.05

1.7.2. Calcul du bilan selon la méthode de Thornthwaite :

Thornthwaite, utilise la RFU (Réserve Facilement Utilisable). Pour la zone d'étude on considère que la RFU maximale est de 100 mm.

Les résultats de calcul des paramètres du bilan hydrique pour Berrahal et les Salines sont dans les tableaux suivants N° 15 et N° 16.

Tab. 15 : Résultats du bilan hydrique station de Berrahal (1987-2017).

Mois	P (mm)	T (°C)	i	k	ETP (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	DA (mm)	EXC (mm)
Sept	43,03	22,30	9,62	1,05	100,05	0	43,03	57,02	0
Oct	71,83	20,50	8,47	0,91	74,00	0	71,83	2,17	0
Nov	109,63	16,10	5,87	0,75	38,69	70,94	38,69	0,00	0
Déc	157,50	13,10	4,30	0,7	24,49	100	24,49	0,00	103,95
Jan	152,33	11,40	3,48	0,73	19,65	100	19,65	0,00	132,68
Fév	106,50	12,10	3,81	0,78	23,50	100	23,50	0,00	83,00
Mar	70,70	13,50	4,50	1,02	37,76	100	37,76	0,00	32,94
Avr	55,87	15,40	5,49	1,15	54,56	100	54,56	0,00	1,31
Mai	45,27	18,10	7,01	1,32	84,90	60,37	84,90	0,00	0
Jui	18,17	23,00	10,08	1,33	134,33	0	78,54	55,80	0
Juil	3,40	25,30	11,64	1,33	160,75	0	3,40	157,35	0
Aout	11,03	26,10	12,21	1,24	158,92	0	11,03	147,89	0
Total	845,27	18,08	86,48	/	911,61	/	491,38	420,24	353,88

Tab. 16 : Résultats du bilan hydrique à la station des Salines (1988-2017).

Mois	P (mm)	T (°C)	i	k	ETP (mm)	RFU	ETR (mm)	DA (mm)	EXC (mm)
Sept	40,91	23,6	10,47	1,03	109,85	0,00	40,91	68,94	0,00
Oct	52,91	20,5	8,47	0,97	79,71	0,00	52,91	26,80	0,00
Nov	94,35	15,7	5,63	0,86	42,71	51,64	42,71	0,00	0,00
Déc	107,85	12,3	3,89	0,81	25,52	100,00	25,52	0,00	82,32
Jan	96,72	11,8	3,65	0,87	25,33	100,00	25,33	0,00	71,39
Fév	75,76	11,4	3,48	0,85	23,36	100,00	23,36	0,00	52,40
Mar	69,26	13,0	4,25	1,03	36,18	100,00	36,18	0,00	33,08
Avr	54,51	15,4	5,48	1,1	52,86	100,00	52,86	0,00	1,65
Mai	36,61	18,4	7,22	1,21	81,60	55,01	81,60	0,00	0,00
Jui	12,34	21,7	9,22	1,22	111,16	0,00	67,35	43,81	0,00
Juil	3,44	25,1	11,49	1,24	148,17	0,00	3,44	144,73	0,00
Aout	9,05	25,8	12,01	1,16	146,49	0,00	9,05	137,44	0,00
Total	653.71	17.9	85.26	/	882.93	/	461.22	421.72	240.85

1.7.3. Interprétation issue de la représentation graphique du bilan hydrique

Après observation des graphiques, on remarque une alternance de deux périodes :

- Une période hivernale qui s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril, caractérisée par des précipitations importantes d'ordre de 157.5 mm (Berrahal) et 107.85 mm (les Salines), au cours de cette période l'évapotranspiration est de 24.49 mm à Berrahal et de 25.52 mm aux Salines.

- Une période estivale qui s'étale du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre où l'évapotranspiration est nettement supérieure aux précipitations, de 160.75 mm à Berrahal et 148.17 mm aux Salines. Ce qui se traduit par un déficit agricole, ce dernier atteignant son maximum au mois de juillet avec -157.35 mm à Berrahal et avec -144.73 mm aux Salines. Ce déficit traduit un épuisement du stock, d'où un recours à l'irrigation à partir de ce mois et elle doit se poursuivre jusqu'au mois de septembre.

La RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum (100 mm) à partir du mois de Décembre en se prolongeant jusqu'au mois d'Avril. Le surplus ruisselle ou s'infiltre. A partir du mois de Mai la RFU diminue et est totalement épuisée au mois de Juin D'où un déficit agricole, qui doit se poursuivant jusqu'au mois d'Octobre.

L'évapotranspiration potentielle atteint son maximum en juillet (160.75 mm à Berrahal et 148.17 mm aux Salines), son minimum est atteint au mois de Février avec respectivement pour les deux stations (23.50 mm, 23.36 mm) L'excédent commence à partir du mois de Décembre et va jusqu'au mois d'Avril avec un maximum au mois de Janvier avec 103.95 mm à Berrahal et 82.32 mm aux Salines.

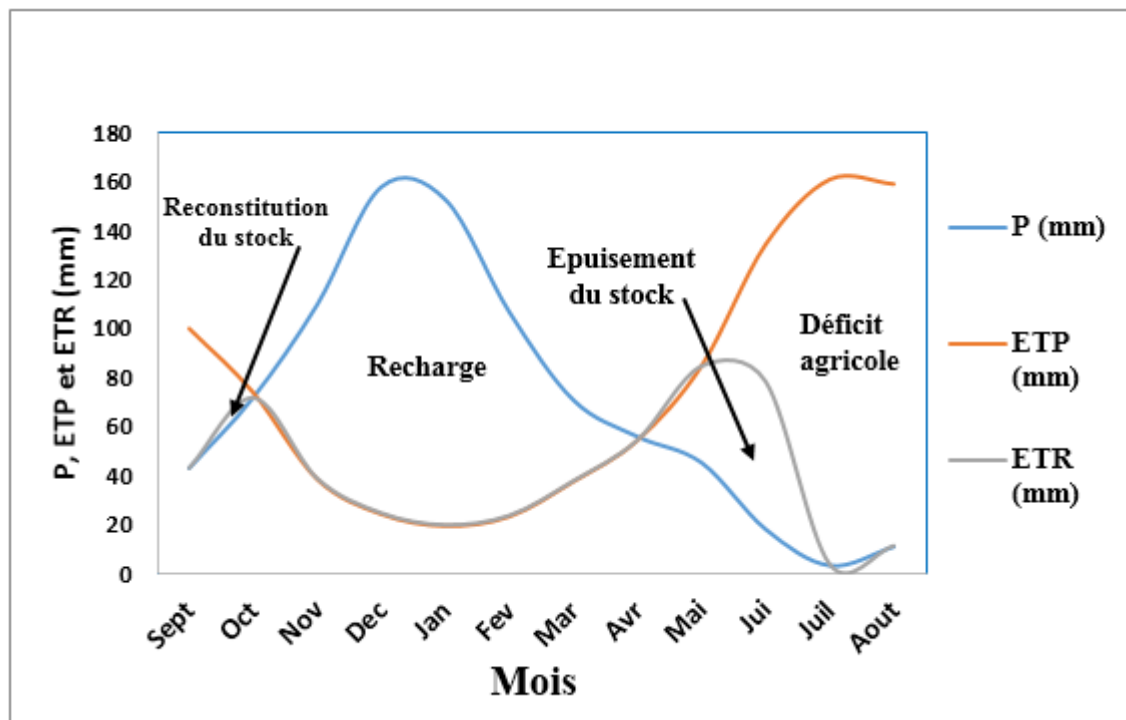


Fig. 21 : Variations du bilan hydrique (Berrahal de 1987 à 2017).

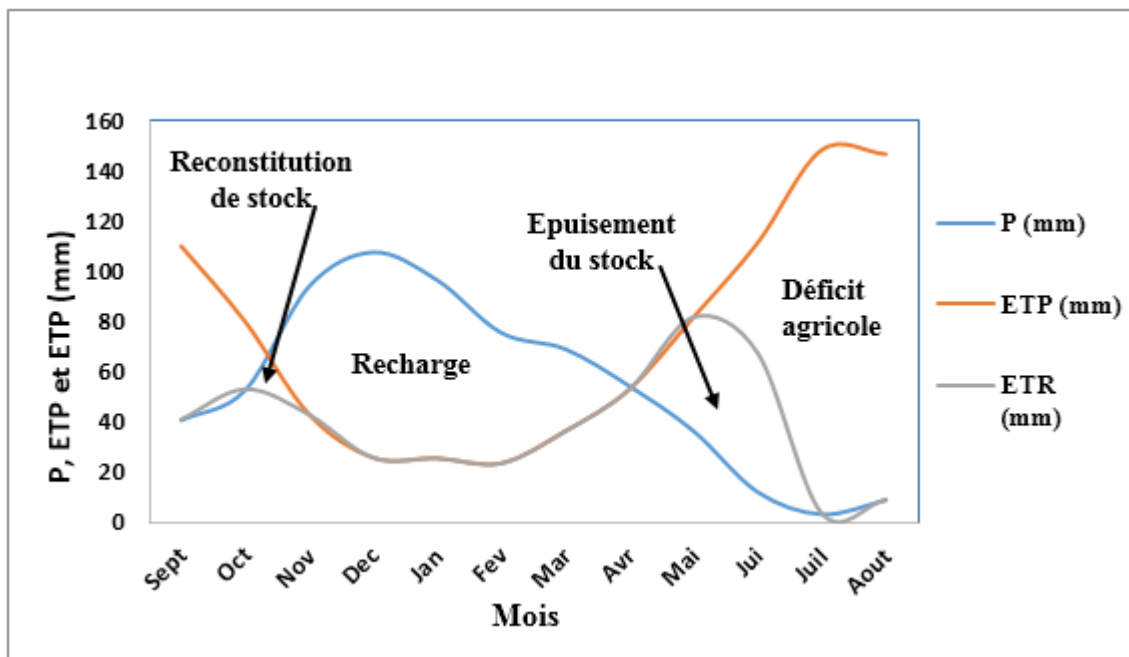


Fig. 22 : Variations du bilan hydrique (les Salines de 1987 à 2017).

Conclusion :

L'aperçu climatique réalisé a montré que la zone d'étude fait partie des régions les plus arrosées d'Algérie, elle jouit d'un climat méditerranéen caractérisé par l'alternance de deux saisons l'une humide et la seconde sèche. Les coefficients pluviométriques calculés montrent une égalité presque parfaite entre les années excédentaires et déficitaires. Les bilans hydriques donnent la même succession des saisons et des paramètres du bilan pour les deux stations.

ii. Hydrologie de surface

1. Caractéristiques morphologique du bassin versant côtier constantinois :

Le lac Fetzara, fait partie du bassin versant côtier constantinois (fig.23), ce dernier est limité :

- Au Nord par la Mer Méditerranée ;
- Au Sud par le bassin versant de la Medjerda ;
- A l'Ouest par le bassin versant de la Seybouse ;
- A l'Est par la frontière Algéro-Tunisienne. Le bassin versant est à vocation essentiellement agro-sylvo-pastorale où l'application d'une très grande variété de cultures est favorable (périmètres irrigués de : Bounamousa 14800ha, Cheffia 250 ha, El Frin 250 ha, Mouaissia 100 ha, Zeribi 110 ha et Souarek 50 ha). L'activité industrielle est importante surtout au niveau des grandes agglomérations.

Il couvre une superficie totale de 11509 km² (A.N.R.H, 2005).

Le bassin versant côtier constantinois est présent sur dix wilayas et 131 communes, il se comprend :

- le côtier Constantinois Ouest.

- le côtier Constantinois Est.
- le côtier Constantinois Centre contenant le lac Fetzara, ce dernier est à cheval entre le bassin versant de la Seybouse et le bassin versant du Kébir Ouest.

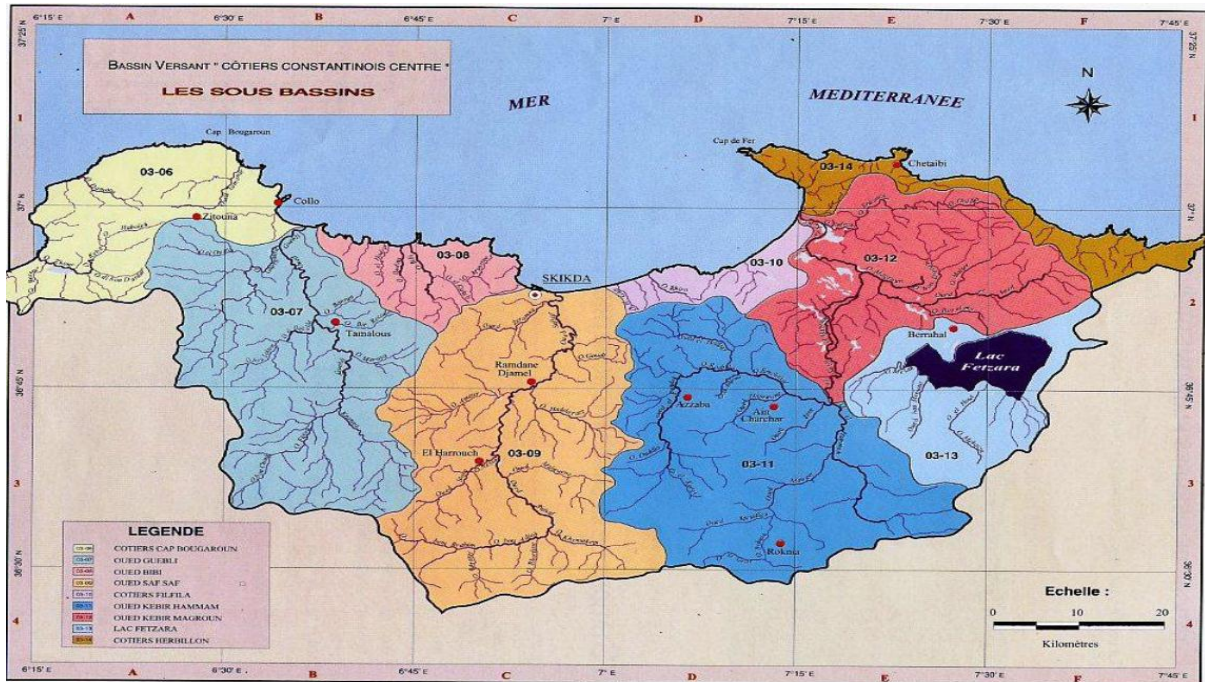


Fig. 23 : La partie centrale du Côtier Constantinois en plus de ses sous bassins.
(Khelfaoui H, 2014).

1.1. Le lac Fetzara et ses sous bassin :

Coté 03 13, constitué de 30 sous-bassins versants petits et moyens avec une superficie totale de l'ordre de 515 Km² (AJCI, 1985).

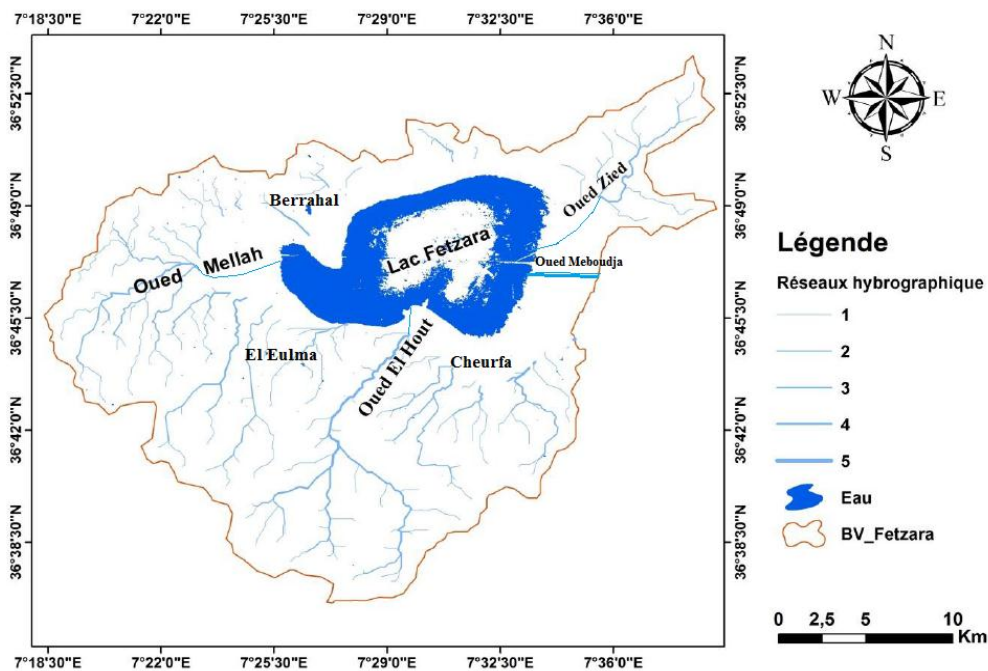


Fig. 24 : Situation géographique du bassin versant du lac Fetzara.

L'alimentation de la région y compris le lac Fetzara, se fait directement à partir des précipitations ou par les apports qui se font à partir des Oueds et des zones de montagnes environnantes. Nous distinguons ainsi :

- au Sud du sous bassin versant du lac Fetzara, les apports proviennent de la région d'Ain Berda.

- au Nord, les apports se font par les montagnes de Belelieta favorisés par la présence d'une pente raide.

- à l'Ouest, Berrahal à l'Ouest (à Berrahal) et El Gantra dans sa partie Est, là où se trouve le cordon dunaire qui se situe entre 20 et 30 mètres.

Le tableau N°17, suivant récapitule les caractéristiques du sous bassin englobant le lac Fetzara.

Tab. 17 : Les indications sur les sous bassin du lac Fetzara (A.N.R.H, 2000)

Sous bassin versant du lac Fetzara							
Numéro de cote		03 13					
Potentiel des nappes (en hm³/an), selon P.N.E		13.4					
Superficie (km²)		515					
Retenues collinaires		Nombre	Capacité (m³)	Destination			
		31	2563000	irrigation			
Eau potable	Forages en exploitation	Nombre de réservoirs		Volume (m³)			
		17		5920			
				Débit (l/s)	Profondeur (m)		
		DràaErrich		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 (m³)	Longueur du réseau de distribution	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		

Le lac Fetzara, est entouré également trois principaux sous-bassins, qui sont ceux des oueds Zied, El Hout et El Mellah, leurs superficies sont respectivement de 19 km², 81 km² et 47 km², représentant 29 % de la superficie totale du bassin versant constantinois centre. Le tableau n° 18, récapitule les caractéristiques de ces sous bassins.

Tab. 18 : Caractéristiques des principaux sous bassins versants du lac Fetzara. (A.N.R.H)

Paramètres	Principaux sous bassins versants			Ruisseaux et autres sous bassins versants mineurs		
	Oued Zied	Oued El Mellah	Oued El Hout	Versant Nord	Versant Sud-Ouest	Versant Sud-Est
Superficie (km ²)	19	47	81	138km ²	114km ²	116km ²
Longueur (km)	10.5	8	10			
Superficie (%)	3.69	9.13	15.73	26.80	22.13	22.52
Superficie du bassin versant du lac Fetzara (km ²) : 515.52						
Périmètre (km) : 125.91						

1.2. Le réseau hydrographique du lac Fetzara (fig.25)

L'alimentation du le lac Fetzara est assurée par les Oueds, Hout, Mellah, Zied et les eaux se déversant directement et provenant des pentes périphériques. En hiver la superficie submergée avoisine les 1 700 hectares mais lors de la saison sèche, peu d'eau arrive au lac car les précipitations sont presque nulles le drainage du lac a lieu toute l'année par le biais de la Meboudja assurant la vidange du lac. La fonction hydrologique du lac contribue à la maîtrise des crues, à la rétention des sédiments et des nutriments ainsi qu'à la recharge de la nappe phréatique situées en Amont quand le Lac est plein et en Aval par l'oued Meboudja.

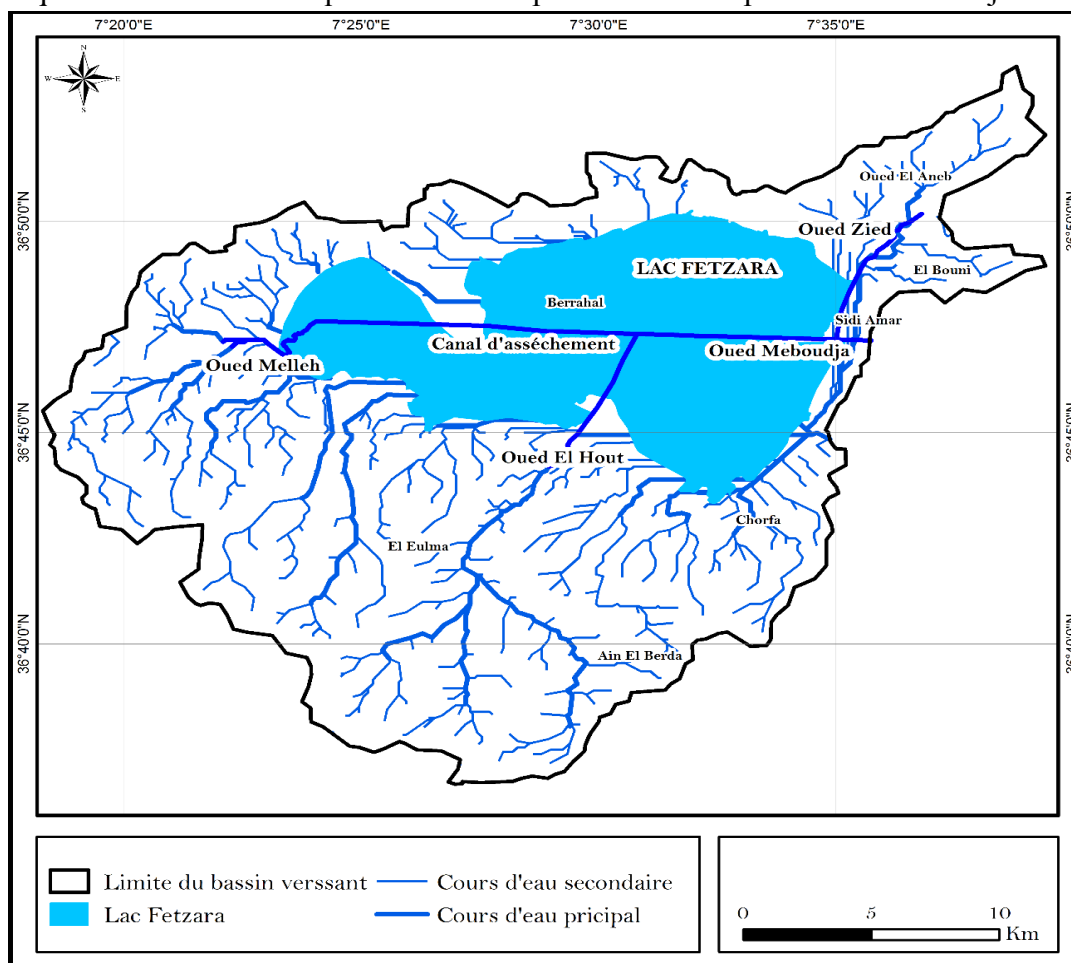


Fig. 25 : Le réseau hydrographique du lac Fetzara.

Le canal principal d'assèchement qui traverse le centre du lac, a pour but d'assurer un équilibre d'écoulement à l'intérieur du lac. Ce canal se termine par un pont-vanne qui assure l'alimentation de l'oued Meboudja, ce dernier se déverse au niveau de l'oued Seybouse qui débouche dans la mer Méditerranée un peu plus à l'Est du site (DGF, 2003).

1.3. Le régime hydrologique du lac Fetzara

Le lac Fetzara est une dépression avec une superficie d'environ 18600 ha, elle est enserrée entre le massif de l'Edough au Nord, les monts de Ain Berda au Sud, et les deux cordons dunaire à l'Est (El Gantra) et à l'Ouest (Berrahal) (Habes, 2006).

La partie la plus profonde du lac est formée par une sédimentation à une altitude d'environ 10 mètres (DGF, 2003). Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la côte 12 m environ, soit à 2 m du niveau centre du lac. Durant la période sèche, les précipitations sont nulles, le lac se trouve à 98 % sec.

2. Régime des affluents du lac Fetzara :

L'absence de station de jaugeage rend toute quantification des débits alimentant difficile, ce qui compromet tous projets. Pour palier à cette absence nous avons utilisé la méthode basée sur le choix de trois (03) points de mesure au niveau de chaque Oued alimentant le lac. Pour chacun des trois points, nous avons déterminé une surface issue du choix d'une Longueur et d'une largeur ($L \times l$) en mesurant la hauteur correspondant pendant un certain temps.

Par la suite nous avons ramené les valeurs obtenues au débit en divisant par l'unité de temps (seconde). Ce qui nous a permis d'exprimer les débits au niveau de chaque section et pour de chacun des Oueds. Cette opération a été réalisée à un pas hebdomadaire pour chaque point de mesure.

On a pu déterminer les variations des débits des différents Oueds. La situation climatique qui prévaut au niveau de la région, nous a contraint à estimer les débits durant la période allant du mois de Novembre 2016 jusqu'au mois de Mai 2018. Nous avons également réalisé un comparatif avec les résultats des débits obtenus par S. Habes en 2006 et 2007 (in Habes, 2013). Durant les deux cycles hydrologiques sur lesquels nous avons travaillé, les précipitations étaient faibles qui a biaiser nos travaux.

- Ainsi durant le premier cycle allant du mois de Novembre 2016 au mois de juillet 2017, les précipitations se répartissaient comme suit au niveau de la station de Pont Bouchet prise en considération car la plus proche du lac :

- * au mois de Novembre 2016 (24.6 mm),
- * au mois de Décembre 2016 (77.9 mm),
- * au mois de Janvier 2017 (121.6 mm)
- * au mois de Février 2017, (102.2 mm),
- * au mois de Mars 2017 (70.1 mm)
- * au mois d'Avril 2017 (32.1 mm).

Ces faibles précipitations traduisent le faible apport au lac durant la période d'observation.

- Durant le second cycle d'observation, on remarque une certaine élévation du taux des précipitations, durant la saison pluvieuse où on a enregistré des quantités de pluies suivantes :

- * mois de Novembre 2017 (105 mm),
- * mois de Décembre 2017 (168.6 mm),
- * mois de Janvier 2018 (142.8 mm),
- * mois de Février 2018 (120.5 mm),
- * mois de Mars 2018 (67.3 mm),
- * mois d'Avril 2018 (44.3 mm).

En comparant nos résultats avec ceux obtenus au cours de l'année 2004/2005, on remarque :

-les précipitations étaient plus importantes de 185 mm au mois de Décembre 2004, de 135 mm au mois de Janvier 2005 et de 179 mm au mois de février 2005.

Ces fortes précipitations, sont à l'origine des débits jaugés au niveau de l'Oued Meboudja, ils débits vont de 6,95 m³/s à 16.98 m³/s, dans le détail, on note :

- 07 décembre, 12,41 m³/s
- 07 janvier, 16.98m³/s
- 11 février, 13.63 m³/s.

Pour 2006/2007, les fortes précipitations sont enregistrées au mois de Décembre 2006 avec 43.9 mm, au mois Février 2007, avec 72.1 mm et au mois de Mars 2007, avec 195.9 mm. Ces fortes précipitations, ont générées la crue du 12 mars 2007, conduisant au débordement du lac ayant entraîné la fermeture de la route nationale Annaba-Constantine (Habes, 2013).

Cette partie est un aperçu exhaustif des valeurs des débits des cours d'eau effluant le lac pendant deux cycles hydrologique 2016-2017 et 2017-2018.

2.1. Régime des apports au lac :

2.1.1. Oued Zied

a. Régime de l'Oued Zied (cycle 2016/2017) :

Le tableau N°19, donne un aperçu sur les variations du débit d'oued Zied, au cours de cette période d'observation.

Tab. 19 : Débits et précipitations mesurés sur l'oued Zied, mois pluvieux cycle (2016/2017).

Mois de mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	24,6	77,9	121,6	102,2	70,1	32,1	16	19	2,1
Q (m ³ /s)	1,3	2,1	3	2	1,4	1,1	0,7	0,3	0

Au niveau d'oued Zied et durant la période allant du mois de Novembre 2016 jusqu'au mois de Juillet 2017, les débits mesurés varient entre : 3 m³/s et 0 m³/s. Les niveaux les plus élevés sont mesurés au mois : de Décembre2016 (2.1 m³/s), Janvier 2017 (3 m³/s) et Février 2017 (2

m³/s). Par contre, les plus faibles débits sont mesurés à partir du mois de Mai 2017, introduisant le début de sécheresse marquée durant la période estivale.

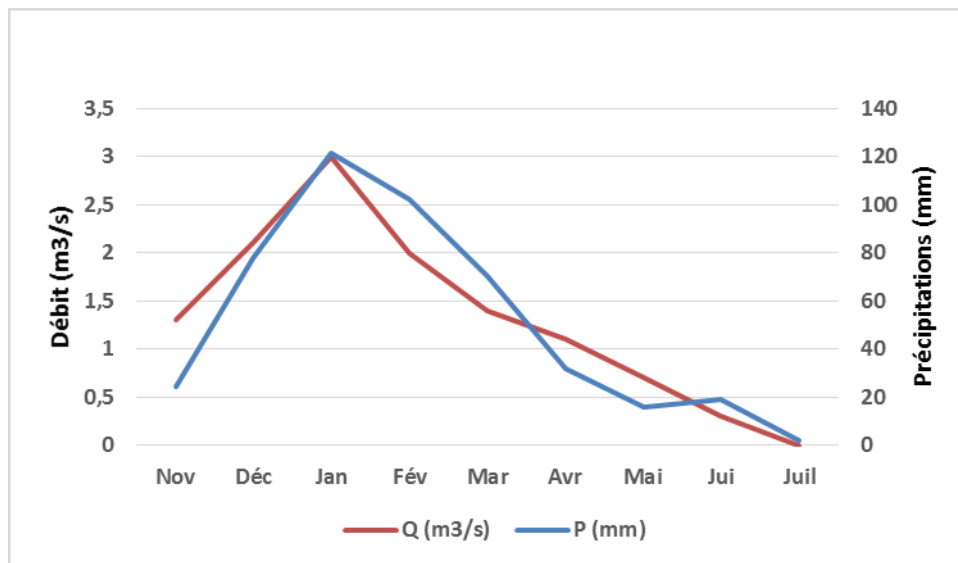


Fig. 26 : Variations du débit et des précipitations (Oued Zied, cycle (2016/2017)).

b. Régime de l'Oued Zied (cycle 2017/2018) :

Le tableau N°20, donne un aperçu sur les variations du débit d'oued Zied, au cours de cette période d'observation.

Tab. 20 : Débits et précipitations mesurés sur l'oued Zied, mois pluvieux cycle (2017/2018).

Mois de mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	105	168,6	142,8	120,5	67,3	44,3	31,6	19	10,1
Q (m ³ /s)	2,8	3,1	2,9	2,6	1,7	1,5	1,2	0,9	0,4

Pendant le cycle hydrologique (2017/2018), les plus forts débits enregistrés oscillent entre 3.1 m³/s et 1.5 m³/s, mais les débits commencent à baisser et atteignent 0.4 m³/s, au mois de Juillet indiquant ainsi l'entrée de la saison estivale. En nous référant à l'allure des courbes débits et précipitations (fig. 26 et 27), on note évolution similaire des deux courbes indiquant que l'oued Zied est alimenté à partir des eaux des précipitations.

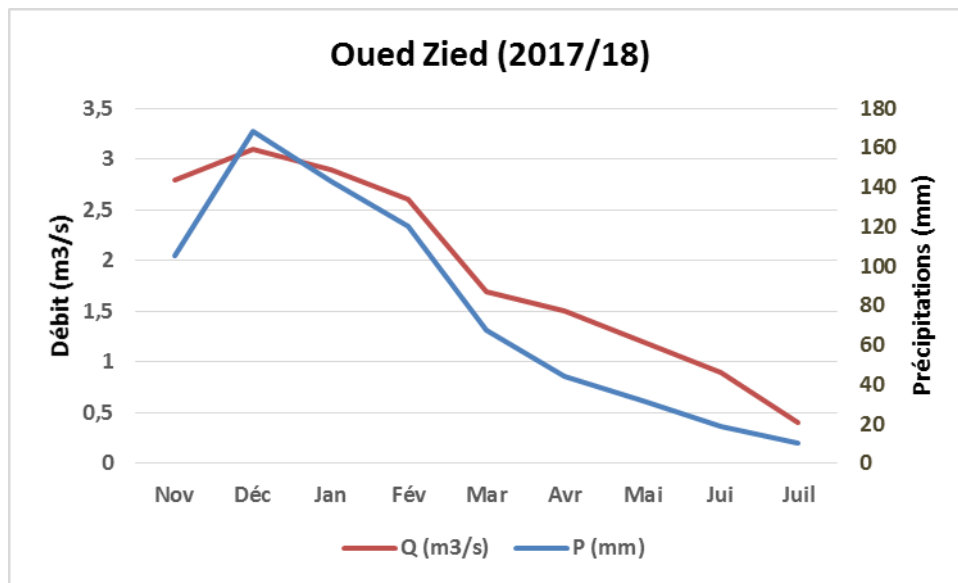


Fig. 27 : Variations du débit et des précipitations (Oued Zied, cycle (2017/2018)).

2.1.2. Oued Mellah

a. Régime de l'Oued El Mellah (cycle 2016/2017) :

Le tableau N°21, donne un aperçu sur les variations du débit d'Oued Mellah, au cours de cette période d'observation.

Tab. 21 : Débits et précipitations mesurés sur l'Oued Mellah, mois pluvieux cycle (2016/2017).

Mois de mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	24.6	77.9	121.6	102.2	70.1	32.1	16	19	2.1
Q (m³/s)	0.5	2.7	3.6	3.4	2.9	1.9	1.3	0.9	0

Le tableau précédent montre que les débits importants sont mesurés au cours de la période allant du mois de Décembre jusqu'au mois d'avril. Les plus forts débits caractérisant la saison hivernale oscillent entre $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces débits caractérisent la période allant du mois de décembre jusqu'au mois d'avril. Les faibles débits ne dépassent pas $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ et parfois ils sont nuls ($0 \text{ m}^3/\text{s}$), c'est le cas du mois de Juillet.

La figure suivante (fig. 28) met en évidence la relation entre les précipitations et les débits mesurés, on note la présence d'un lien étroit entre les deux paramètres.

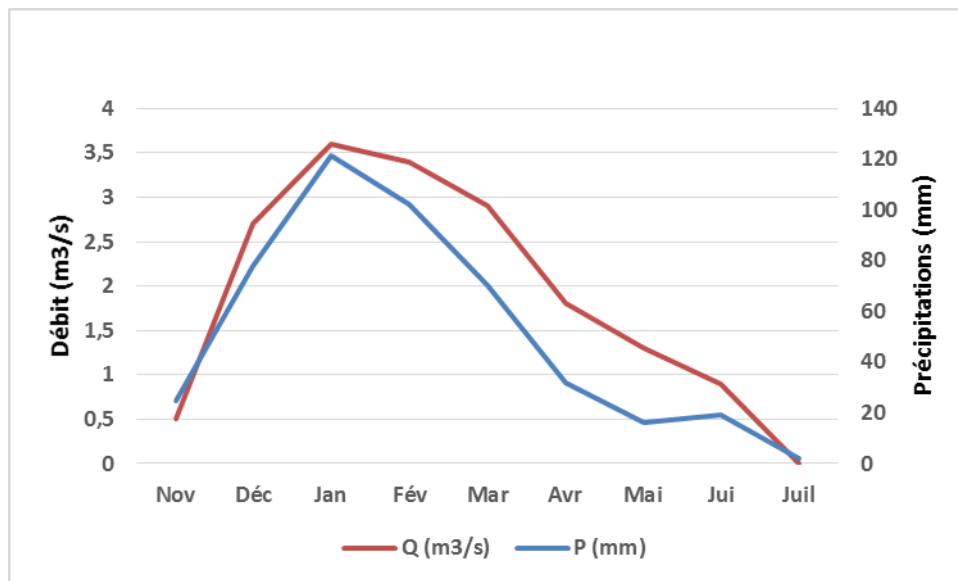


Fig. 28 : Variations du débit et des précipitations (Oued Mellah, cycle (2016/2017)).

b. Régime de l'Oued Mellah (cycle 2017/2018) :

Le tableau N°22, donne un aperçu sur les variations du débit d'Oued Mellah, au cours de cette période d'observation.

Tab. 22 : Débits et précipitations mesurés sur l'Oued Mellah, mois pluvieux cycle (2017/2018).

Mois de Mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	105	168.6	142.8	120.5	67.3	44.3	31.6	19	10.1
Débits (m³/s)	2.76	3.9	3.78	3.1	2.6	2.1	1.9	1.4	0.7.

Notons que durant le mois d'Aout, le lac est à sec par contre durant les mois de Septembre et d'Octobre, le lac commence à ce remplir. On note que les plus forts débits, varient de 3.78 m³/s à 1.9 m³/s, ces valeurs caractérisent la période allant du mois de Décembre 2017 jusqu'au mois de Mai 2018. Au contraire le débit 0.7 m³/s, est considéré comme les plus faibles au cours de cette période d'observation et est mesuré au mois de Juillet, pouvant indiquer le début du tarissement de l'Oued.

La figure 29, montre que les débits et les précipitations suivent la même tendance. Les débits croissent et baissent de la même manière que les précipitations, ce qui indique que l'alimentation de ce cours d'eau se fait uniquement par les précipitations.

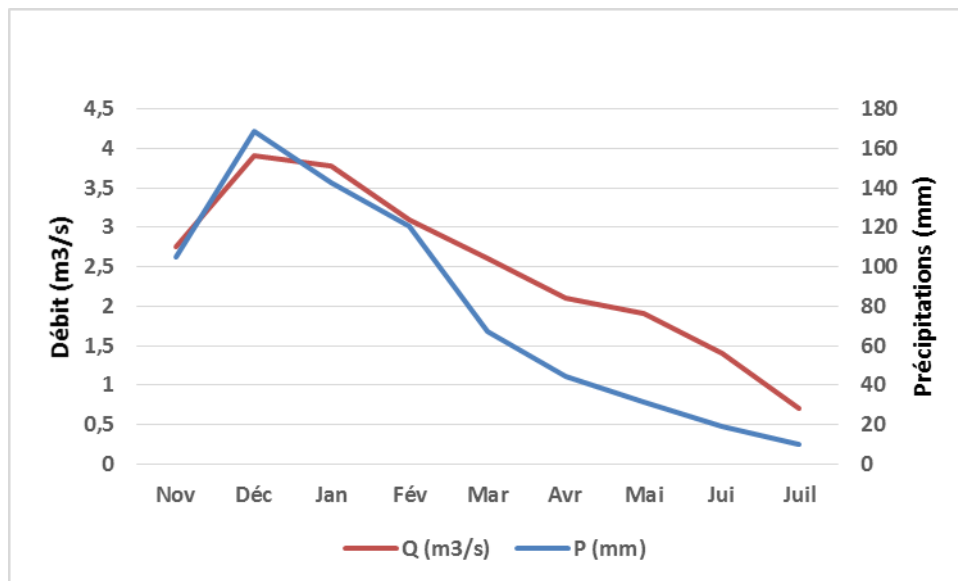


Fig. 29 : Variations du débit et des précipitations (Oued Mellah, cycle (2017/2018)).

Observations :

D'après l'allure des courbes des variations des débits (fig. 28 & 29), on note deux pics assez importants aux mois de Décembre 2017 et Janvier 2018, les débits enregistrés sont $3.9 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3.78 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces forts débits sont dus aux fortes précipitations, ces dernières ont engendré un fort ruissellement vers le lac. Cette conséquence (pluies), se poursuit car les débits oscillent entre : $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.1.3. Oued Hout

a. Régime de l'Oued Hout (cycle 2016/2017) :

Au cours du premier cycle (2016-2017), les valeurs du débit au niveau d'oued El Hout sont assez faibles, de ce fait on n'a pas jugé utile de les considérer.

b. Régime de l'Oued Hout (cycle 2017/2018) :

Le tableau N°23, donne un aperçu sur les variations du débit d'Oued Hout, au cours de cette période d'observation.

Tab. 23 : Débits et précipitations mesurés sur l'Oued Hout, cycle (2017/2018).

Mois de mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	105	168.6	142.8	120.5	67.3	44.3	31.6	19	10.1
Q (m^3/s)	0.8	1.8	1.9	1.7	1.3	0.9	0.7	0.4	0

On remarque que les fortes valeurs de débits varient entre $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, et ceci au cours de la période allant du mois de Décembre 2017 au mois de Mars, au-delà de ces mois, on note une baisse des débits atteignant $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ au mois de Juin.

La figure 30, relative aux variations des débits en fonction des précipitations indique une harmonie de l'évolution du débit d'oued El Hout et des précipitations au fil du temps, ce qui prouve que cet oueds est alimenté par les eaux des précipitations.

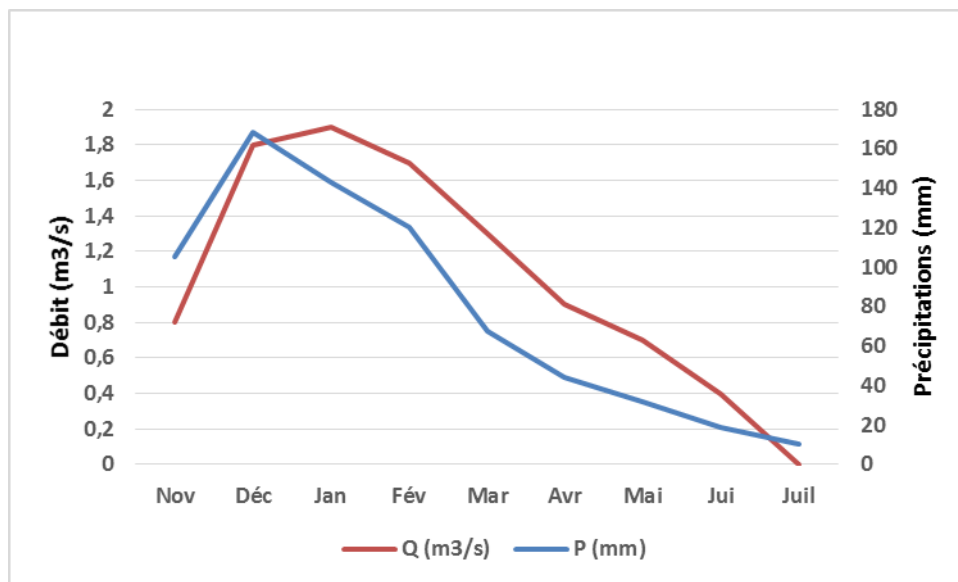


Fig. 30 : Variations du débit et des précipitations (Oued El Hout cycle (2017/2018)).

Observations :

En comparant les débits entrant au lac par l'intermédiaire d'Oued Zied, El Mellah et El Hout, pendant les deux cycles hydrologiques (2016-2017) et (2017-2018), on note que les valeurs mesurées durant le deuxième cycle (2017-2018) sont élevées par rapport au premier cycle, cela est dû à l'élévation du taux des précipitations entre les deux cycles, où le taux des précipitations annuelles durant le premier cycle (2016/17) était de l'ordre de 465.6 mm et le coefficient de pluviométrie était de l'ordre de : 0.7 et cela affirme que c'est une année déficitaire, cependant qu'on a enregistré durant le deuxième cycle (2017/18) des précipitations annuelles de 709.2 mm et un coefficient de pluviométrie de 1.07 affirmant que c'est une année excédentaire.

Donc on peut affirmer qu'il y a une relation étroite entre les débits qui coulent dans les oueds et les précipitations.

2.2. Régime des exhaures

2.2.1. Oued Meboudja

a. Régime de l'Oued Meboudja (le cycle 2016/2017) :

Le tableau N°24, donne un aperçu sur les variations du débit d'Oued Meboudja, au cours de cette période d'observation.

Tab. 24 : Débits et précipitations mesurés sur l'Oued Meboudja, cycle (2016/2017).

Mois de mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	24.6	77.9	121.6	102.2	70.1	32.1	16	19	2.1
Q (m ³ /s)	0.5	1.1	1.5	1.06	0.86	0.75	0.7	0.6	0.47

On remarque que les débits mesurés sur l'Oued Meboudja sont inférieurs aux débits mesurés sur les Oueds Zied, El Hout et El Mellah, montrant qu'une grande quantité d'eau reste dans la cuvette et constitue le lac. Les débits mesurés atteignent un maximum de 1.5 m³/s au mois de janvier 2017 et sont proches de cette valeur au mois de décembre 2016 (1.1 m³/s) et au mois de Février 2017 (1.06 m³/s). Durant les mois restant Novembre 2016, Mars, Avril, Mai, Juin et Juillet 2017, les débits avoisinent 0.5 m³/s. La valeur du débit (0,5 m³/s) mesurée durant la période estivale, est liée à l'ouverture de la vanne de sortie d'eau qui malheureusement reste ouverte pendant toute l'année.

Selon la figure 31, il est observé que les deux paramètres, les débits et les précipitations, ne sont pas synchronisés au niveau de la Meboudja, ce qui confirme que la quantité d'eau qui entre dans le lac n'est pas équivalente à celle qui sort, ce qui entraîne un déséquilibre entre les apports et les exhaures du lac.

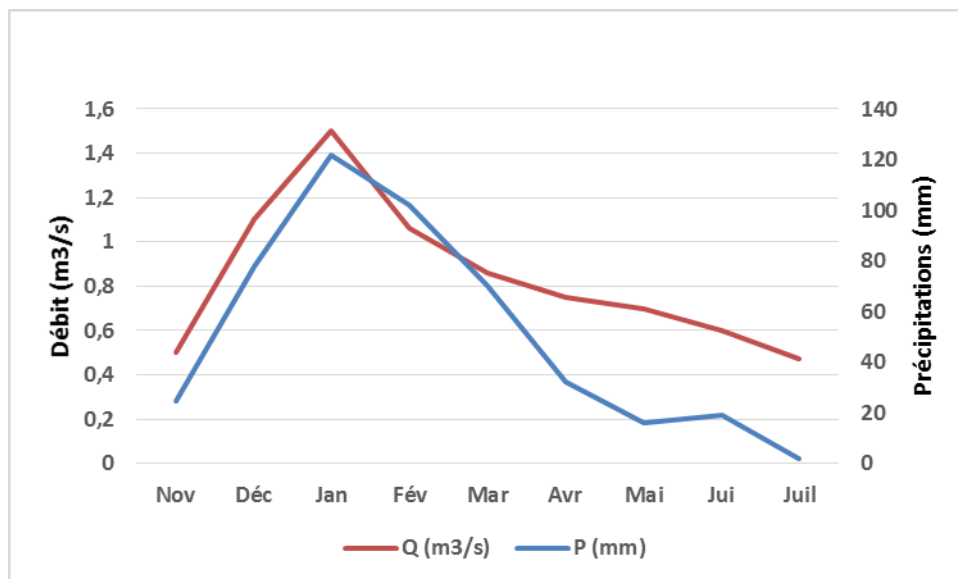


Fig. 31 : Variations du débit et des précipitations sur Oued Meboudja, cycle (2016/2017).

b. Régime de l'Oued Meboudja (cycle 2017/2018) :

Pour le deuxième cycle, les valeurs de débit de l'Oued Meboudja sont plus ou moins élevées, les fortes valeurs du débit sont de l'ordre de 2.9, 2.3 et 1.9 m³/s, mesurée au mois de Novembre, Décembre 2017 et Janvier, Février 2018. Le reste des débits ne dépasse pas 1.4 m³/s. Le tableau suivant N°25, donne les débits mesurés au cours de ce cycle.

Tab. 25 : Débits et précipitations mesurés sur l'Oued Meboudja, cycle (2017/2018).

Mois de mesure	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Pluie (mm)	105	168.6	142.8	120.5	67.3	44.1	31.6	19	10.1
Q (m ³ /s)	1.9	2.9	2.3	1.9	1.7	1.4	0.83	0.65	0.4

La figure 32, montre un décalage entre les deux courbes particulièrement sur la seconde tranche se rapportant aux mois du mois de Mars au mois de Juillet 2018, au cours de cette période le taux des précipitations diminue mais la sortie des eaux du lac continue, contrairement aux autres Oueds, confirmant que la sortie des eaux, se fait par la Meboudja.

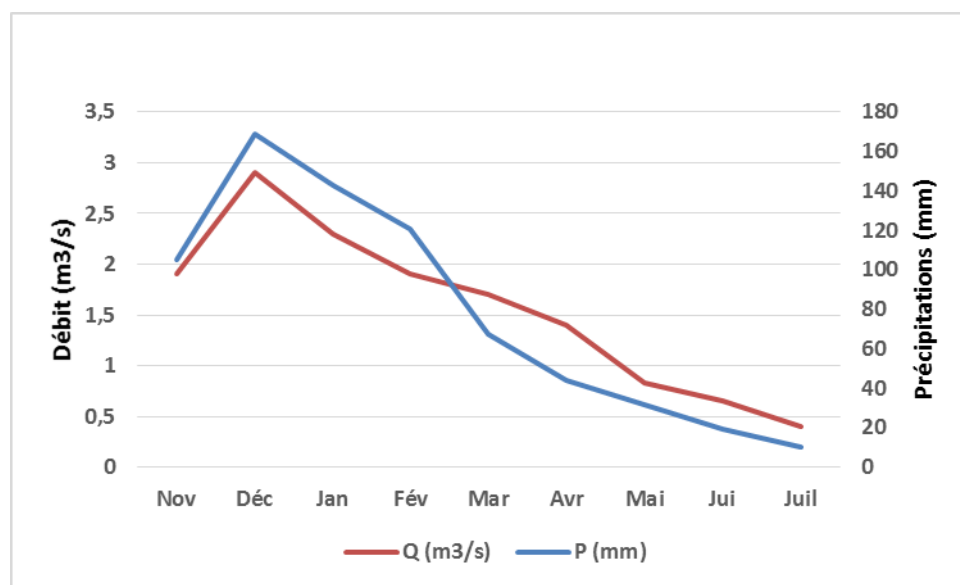


Fig. 32 : Variations du débit et des précipitations sur Oued Meboudja, cycle (2017/2018).

3. Visualisation de l'évolution spatio-temporelle de la surface d'eau du lac Fetzara

Afin de suivre l'évolution de la surface d'eau du lac Fetzara au cours des cycles considérés, nous avons dressé la cartographie mettant en valeur des variations de l'étendue du lac. Cette opération a été possible grâce à l'utilisation de la télédétection permettant l'identification et le suivi des zones humides au cours des deux cycles hydrologique (2016/17 ; 2017/18), considérés.

3.1. Cartes d'évolution spatiotemporelle de la surface d'eau

3.1.1. Mois de Novembre 2016 (fig.33) :

On remarque que le sol nu occupe la totalité de la surface du lac (fig. 33). Au cours de cette période le lac est à sec. Ceci s'explique par la faiblesse des précipitations et ce mois succède à la période estivale avec des conditions climatiques sévères surtout durant le mois d'Aout caractérisé par de fortes températures ($> 27^{\circ}\text{C}$). Cet assèchement provoque des crevasses à la surface du sol, la superficie de la surface du couvert végétal est diminuée aussi. Ce sont généralement des forêts pérennes occupant les zones les plus hautes. Cette carte montre clairement la dominance des sols nus dans ce mois, suivi en deuxième place la surface de végétation avec absence totale de la surface humide. Le sol nu est la particularité de cette date.

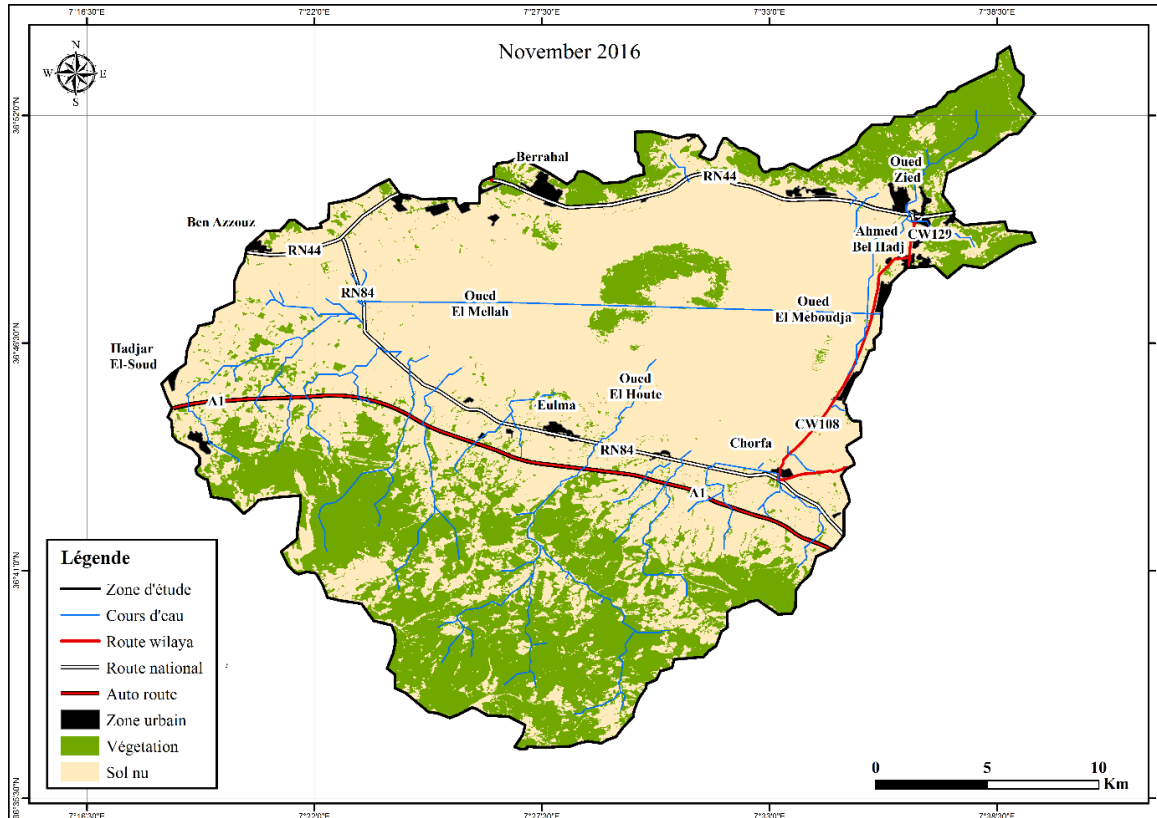


Fig. 33 : Carte montrant l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Novembre 2016.

3.1.2. Mois de Mars 2017 (fig. 34) :

On note que le plan d'eau se reconstitue partiellement au cours de cette période (mois de Mars 2017). Le lac Fetzara s'élargit sur les cotés pour atteindre une superficie estimée à 733.32 ha soit 4% de la superficie totale du lac (fig. 34). Cependant on note toujours qu'une partie de la zone humide est entourée de surfaces nues, le reste de terres est occupé par la végétation se trouvant dans les alentours de la dépression du lac.

On note la présence d'une végétation durant ce mois par rapport au précédent, suivi par des terrains nus en deuxième place.

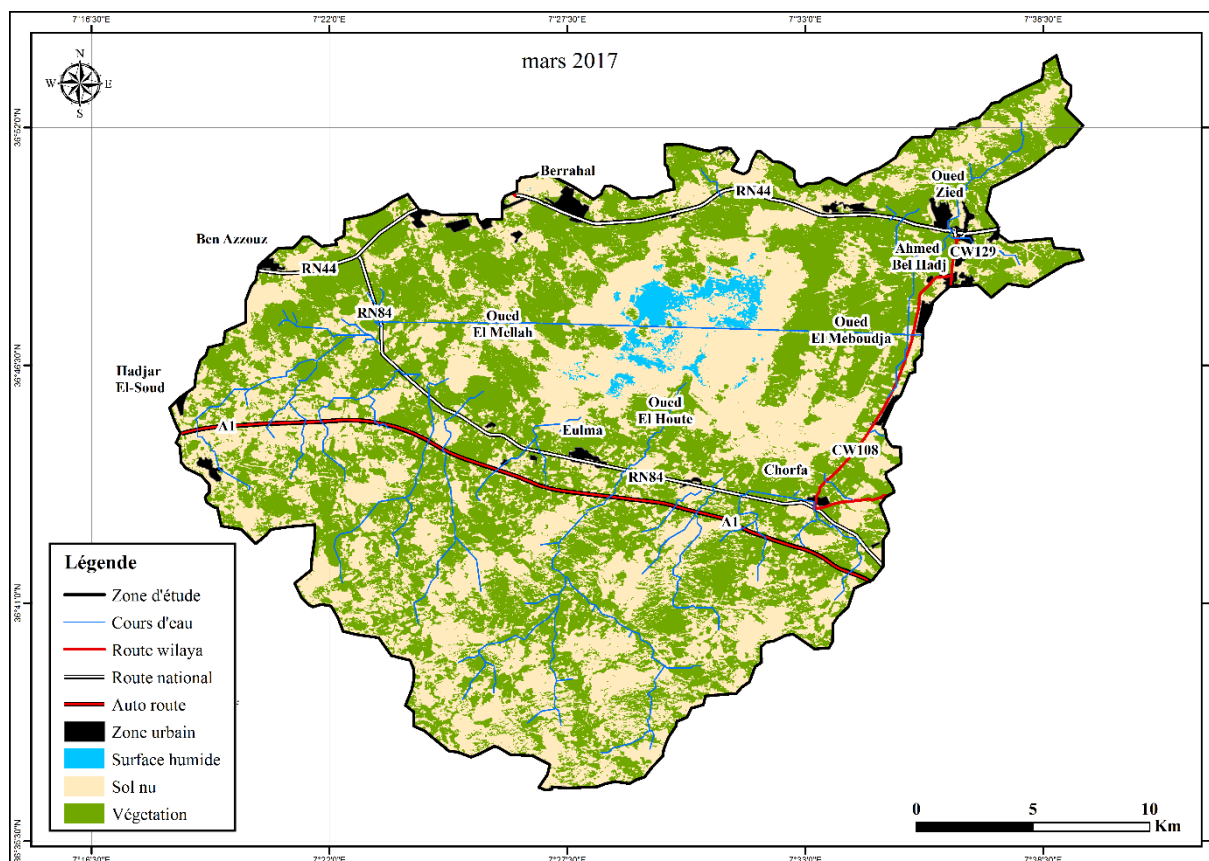


Fig. 34 : Carte montrant l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Mars 2017.

3.1.3. Mois de Novembre 2017 (fig. 35)

Au mois de Novembre 2017, le lac, est encore rétrécie, la surface occupée par les eaux est petite de l'ordre de 136.40 ha, correspondant à 1% de la surface totale du lac, indiquant marquant une perte de l'ordre de 596.92 ha et ceci entre les mois de Mars et novembre 2017. Cette diminution est liée au fait que cette période vient après l'été, marqué par une absence de pluies. Les débits aboutissant au lac sont de l'ordre de $1.76\text{m}^3/\text{s}$ alors que ceux mesurés à l'exutoire (Oued Meboudja) sont de $0.9\text{m}^3/\text{s}$, ce qui démontre une reconstitution du lac (fig. 35). La surface du couvert végétal a diminué aussi laissant la place au sol nu. Ce sont généralement des végétaux morts qui n'apparaissent pas avec la couleur verte. Ils ont été attribués automatiquement aux surfaces du sol nu.

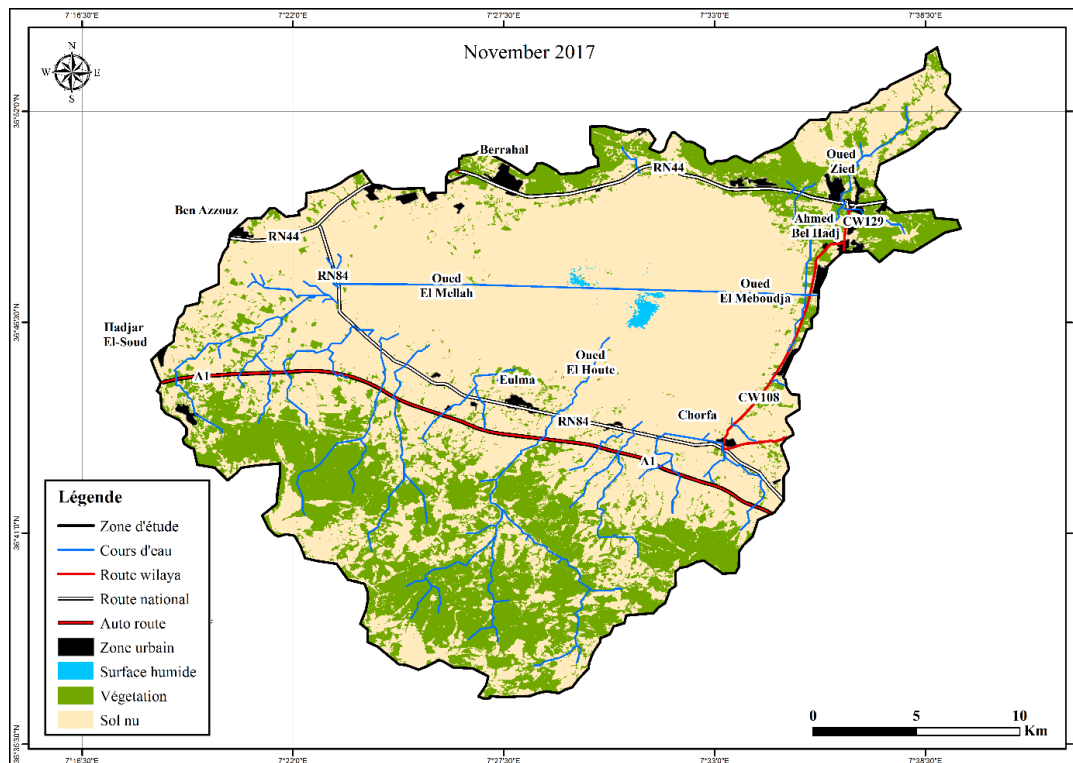


Fig. 35 : Carte montrant l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Novembre 2017.

3.1.4. Mois d'Avril 2018

Durant le mois d'Avril 2018, la carte réalisée (fig. 36), montre une reconstitution presque complète du lac Fetzara, ainsi la surface du lac atteint 1744.37 ha, soit 10% de la surface totale du lac. Nous remarquons que les apports issus des Oued alimentant le lac sont important totalisant $8.3 \text{ m}^3/\text{s}$, se répartissant comme suit Oued El Hout avec $Q=1.7 \text{ m}^3/\text{s}$, Oued Zied avec $Q=3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ et Oued El Mellah avec $Q=3.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

La surface du couvert végétal est augmentée par rapport la date précédente (Novembre 2017), elle est aussi favorisée par les conditions climatiques qui caractérisent cette période.

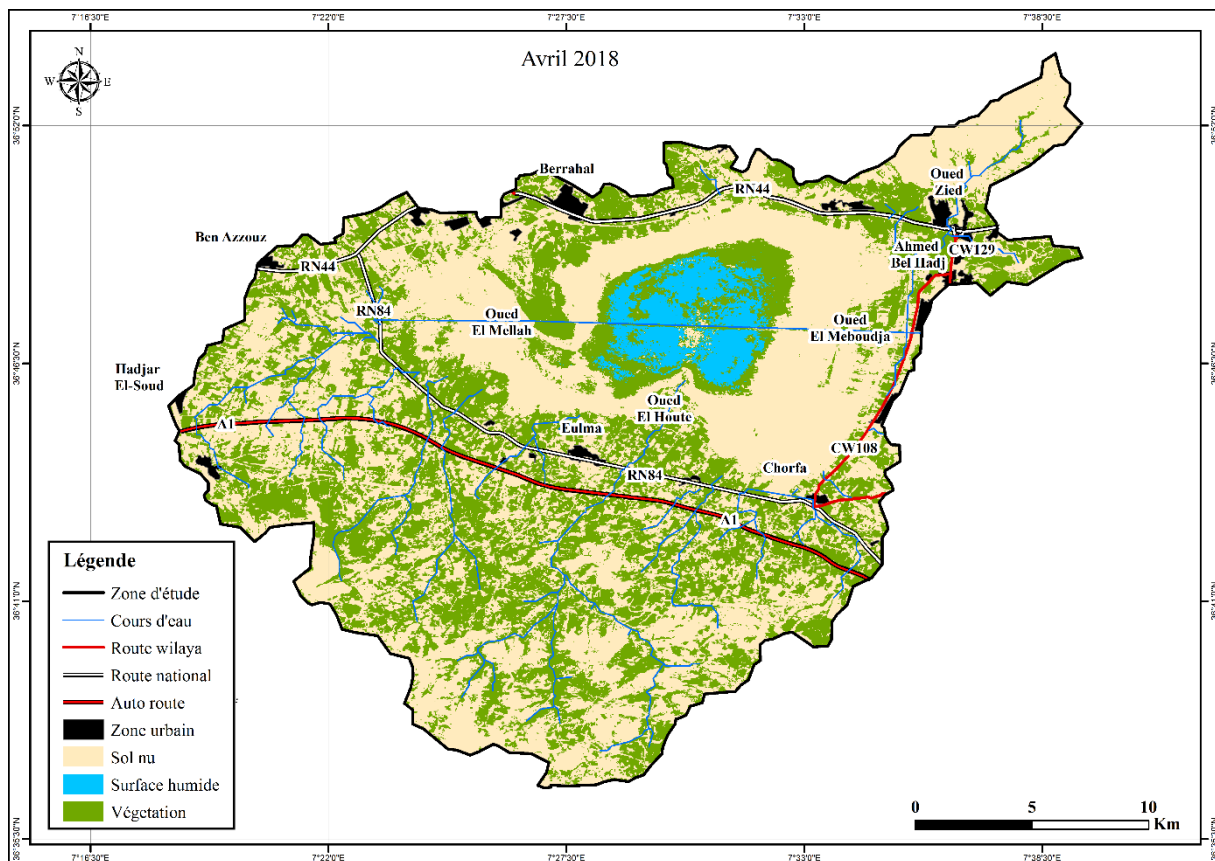


Fig. 36 : Carte de l'évolution spatiale du lac Fetzara au mois de Mars 2018.

Les cartes réalisées montrent la présence d'une relation de cause à effet entre les précipitations et la quantité d'eau dans le lac. La fluctuation de la surface d'eau entre apports et exhaures mise en évidence est liée aux apports s'effectuant à partir des monts entourant le lac et par les Oueds (El Mellah, El Hout et Zied), se déversant dans le lac. Ces apports assurent la pérennité du lac. Nous remarquons que l'extension du lac change en fonction des saisons et des années qu'elles soient pluvieuses ou sèches, ceci rend particulièrement vulnérable le lac vis-à-vis de la minéralisation renouvelée en chaque saison.

Conclusion

Comme le reste du monde, la région d'étude a connu ces dernières années les aléas de la baisse du total des précipitations probablement dues aux effets des changements globaux. De ce fait toute quantification des paramètres du bilan hydrique devient approximative.

Partant de l'analyse des données climatiques des quatre stations météorologiques (Ain Berda, Berrahal, les Salines, Pont Bouchet), a montré que le climat de la région est de type Méditerranéen tempéré caractérisé par la succession de deux saisons, la première humide, dure du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, la seconde sèche occupant le reste de l'année.

Les précipitations enregistrées permettent la classification décroissante suivante :

- Station de Berrahal : 854.2 mm/an,
- Pont Bouchet : 658.05 mm/an,
- Les Salines : 653.70 mm/an,
- Ain Berda : 653.20 mm/an.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de :

- 18.07°C (Berrahal),
- 17.89 °C (les Salines).

L'ETR obtenues par la méthode de C. W. Thornthwaite, montrent qu'une grande partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration (ETR = 491.38 mm à Berrahal et ETR = 420.24 aux les Salines).

Le bilan hydrique réalisé indique que la reconstitution du stock commence au mois d'Octobre et s'achève au mois d'Avril.

A partir du mois de Mai, commence alors l'épuisement du stock, générant ainsi un déficit agricole (DA) important (420.24 mm à Berrahal et 421.72 mm aux Salines), d'où la nécessité d'une irrigation particulièrement au cours de la période allant du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre, notons qu'au cours de cette période la recharge est relativement faible voir absente.

Le sous bassin versant du lac Fetzara, occupe une superficie de 515 Km², son réseau hydrographique est constitué de quatre Oueds assurant la pérennité du lac. Nous constatons

deux types d'Oueds, ceux assurant les entrées au lac et sont Oued El Hout au Sud, Oued El Mellah à l'Ouest et Oued Zied au Nord-Est et celui assurant la vidange du lac l'Oued Meboudja.

Les apports au lac sont tributaires des précipitations et par conséquent aux débits charriés par les Oueds alimentant le lac.

On a démontré que les débits mesurés atteignaient le maximum durant les mois les plus pluvieux à savoir Janvier, Février, Mars et Avril pour l'année 2017, les précipitations oscillent entre 121mm/mois et 102 mm/mois, il en est de même pour et les mois Décembre 2017, Janvier, Février, Mars 2018, au cours de cette période les précipitations dépassaient les 130mm/mois, ((2016/17 une année déficitaire ; 2017/18 une année excédentaire) voir annexe) Durant le cycle hydrologique 2016/2017, les débits mesurés étaient de 3.68 m³/s, 2.68 m³/s, respectivement pour les oueds de Zied et El Mellah, par contre durant le cycle hydrologique 2017/2018, les précipitations dépassent les 130 mm/mois, les débits mesurés étaient de 3.3m³/s, 2.9 m³/s et 2.5m³/s, cas des Oueds alimentant le lac (Zied, El Mellah, El Hout. En opposition aux entrées les débits maximum à l'exutoire étaient de 1.5 m³/s au mois de Janvier (2017) et de 1.2 m³/s au mois de Décembre 2017.

la reconstitution spatio-temporelle de la surface d'eau dans le lac montre que celle-ci est pérenne durant toute l'année malgré sa petitesse. La surface totale varie selon les apports et les exhaures suivant les saisons d'une manière remarquable. Ce résultat peut être utilisé dans un plan de gestion de cette zone humide.

Chapitre III :

Hydrogéologie

La connaissance de circulation des eaux en surface pose d'énormes problèmes aux chercheurs, cette difficulté s'accroît quand il s'agit des eaux souterraines. Les hydrogéologues mettent beaucoup de temps pour comprendre les mécanismes des écoulements de l'eau dans une région. Ces difficultés augmentent quand les terrains sont hétérogènes, comme le cas de la présente zone d'étude où on passe de terrains argileux vers des terrains sableux et inversement de ce fait les limites entre les différentes entités sont difficilement décelables.

Introduction

Le lac est tantôt alimenté par les Oueds et par les eaux de la nappe l'entourant tantôt c'est l'inverse qui se produit. Cette relation est à l'origine de la relation hydraulique nappes-lacs-oueds. La relation entre le lac et ses limites est assez mal connues, fautes de connaissance des paramètres hydrodynamiques. Les puits implantés dans cette zone sont situés à quelques mètres de profondeurs (au maximum 25 mètres), ce qui rend tout d'essais par pompages de longue durée impossible. Dans ce chapitre, nous commençons par définir les aquifères de la région d'étude afin de définir les processus régissant les écoulements souterrains et les relations entre les différentes nappes. Nous débutons notre travail par la réalisation d'une synthèse des aquifères présents dans la région d'Annaba nous donnerons plus de précision sur les nappes entourant le lac et leurs capacités hydriques.

Hydrogéologie de la région (fig.37)

La région Annaba recèle les nappes schématisées sur la figure suivante.

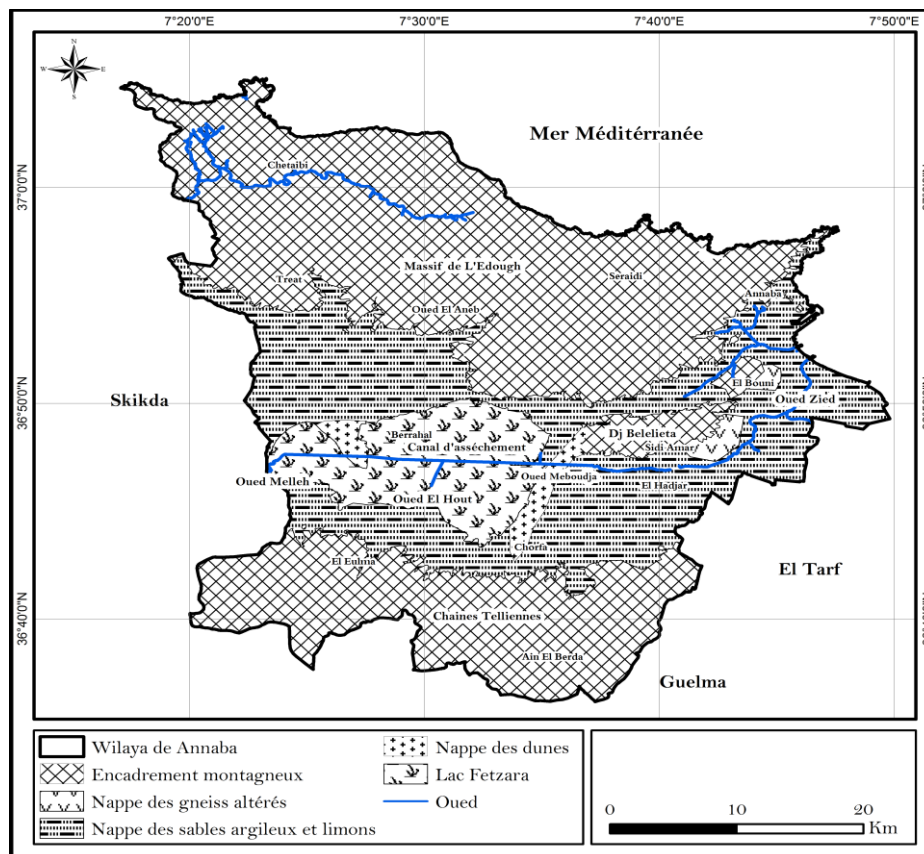


Fig. 37 : Carte des nappes dénombrées dans la région

1. Les aquifères présents dans la région

La plaine d'Annaba (Fig. 37), recèle trois nappes d'inégale importance. Nous dénombrons la nappe superficielle située au nord en contact avec la mer, elle se positionne au dessus de la nappe profonde dite des Salines. La seconde nappe qui est située dans la zone Sud-ouest d'El Hadjar et la troisième est la nappe libre ou nappe des graviers à Dreaan. Cette nappe résulte du bizutage de la partie peu perméable séparant la nappe superficielle de la nappe des Salines au nord. Nous allons décrire ces nappes.

1.1. La nappe superficielle ou nappe des formations superficielles :

Cette nappe en contact avec la mer, contenue dans des sablo-argileuses parfois mêlées à des lentilles de sables. Le substratum est argileux. Cette nappe est située au-dessus de la nappe captive des Salines.

1.2. La nappe captive des Salines :

Cette nappe est captée par une batterie de forages. Elle alimente en partie la ville d'Annaba. Elle est contenue dans des graviers datant du Plio-Quaternaire (Fig. 38). Cette nappe est très exploitée, d'où le risque d'une intrusion marine, ce qui a obligé les décideurs à arrêter les pompages au niveau de cette nappe, ces derniers ont repris en 2016, suite à pénurie d'eau qu'avait connue la ville d'Annaba.

1.3. La nappe des graviers (fig. 38) :

C'est la plus importante dans la région. L'interprétation des pompages d'essai, réalisés, montrent des valeurs de transmissivité, élevées, (le long de la Seybouse) et les plus faibles, (région d'El-Kerma), située dans la partie Ouest du terrain.

Cette nappe, tantôt libre tantôt captive, avec une épaisseur très variable selon les zones, allant de 2 à 70 mètres. A Annaba, la nappe est captive est située en dessous de la nappe superficielle et devient libre dans la région de Dreaan. Cette nappe se caractérise par une perméabilité oscillant entre 10^{-4} à 10^{-5} m/s, sa transmissivité va de $3 \cdot 10^{-2}$ à $3.5 \cdot 10^{-3}$ m²/s dans la région de Dreaan et change pour atteindre des valeurs allant de $4 \cdot 10^{-2}$ à $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s, vers littoral situé au Nord de Ben M'Hidi de même elle varie au niveau de la zone de l'Oued Mafragh (région de Bouteldja), pour osciller entre 10^{-3} et $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s. Le coefficient d'emménagement est parfois très faible de l'ordre de 10^{-4} où la nappe est captive et atteint 10^{-2} où elle est libre (Derradji et al, 2005 ; Zenati, 2010).

Il est à noter que les études antérieures, ont montré une alimentation de la nappe des graviers par la nappe superficielle. Ce lien est particulièrement présent dans la région située entre El Hadjar et Allélick. Une seconde alimentation dite verticale est faite dans la zone située entre Allélick et la mer. Le débit a été estimé à 4,75 l/s au Nord d'El Hadjar et à 9,85 l/s dans la région d'El Hadjar.

Au Nord dans la zone littorale entre la nappe superficielle et la nappe des graviers, un horizon semi-perméable argilo-sableux, constitue à la fois le substratum semi-perméable de la nappe superficielle et le toit de la nappe des graviers.

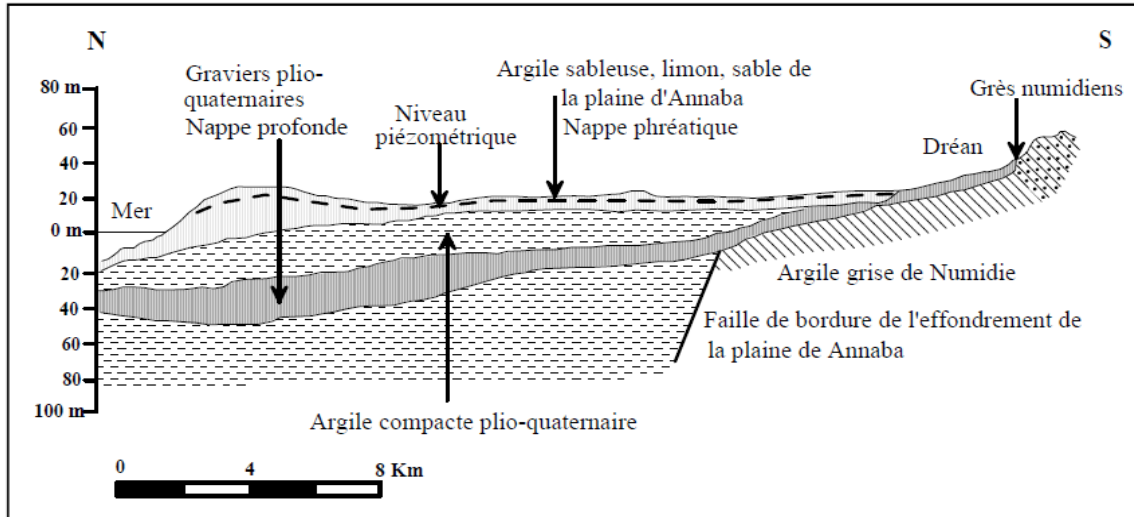


Fig. 38 : Coupe schématique des systèmes aquifères étudiés (In Debieche, 2002).

La précédente coupe indique bien la séparation entre les deux nappes l'horizon séparant les deux niveaux est peu-perméable (argile sableuse, de silt, d'argile et de lit sableux) l'épaisseur de cette couche varie et passe de 0 m sur les bordures Sud et Ouest à plus de 75 m dans la zone côtière de l'aquifère. Notons qu'à travers cette couche, se font les transferts entre les deux nappes (superficielle et profonde). Elle favorise le passage des polluants la pollution de la surface vers les nappes (Djabri 1996).

1.4. Conclusion :

La zone d'étude recèle deux nappes superposées :

- la première nappe est superficielle, captée par les puits domestiques elle est discontinue dans l'espace
- la seconde nappe est profonde captée par les forages, elle est à la fois captive au niveau de la zone Nord, au niveau des Salines, confirmé par la batterie de forge captant cette nappe en cette partie. Elle devient libre dans la partie Sud (Drean), dans cette partie les deux nappes sont confondues. Le tableau suivant N°26 récapitule les paramètres hydrodynamiques des deux principaux aquifères :

Tab. 26 : Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la plaine d'Annaba.

Aquifères	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emménagement
Nappe superficielle	10 ⁻³	10 ⁻³ à 10 ⁻⁵	10 ⁻²
Nappe profonde	5.10 ⁻³ à 5.10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴

2. Aperçu sur les aquifères de la zone du lac Fetzara (fig. 39) :

Les études réalisées par Zenati N (1999 & 2010), Habes S (2007 et 2013) et Zahi F (2008 & 2014), ont montré que le Lac est entouré par un ensemble de petites nappes. Ces dernières sont surtout utilisées pour l'irrigation. Nous donnons un aperçu sur leur emplacement et leur utilisation.

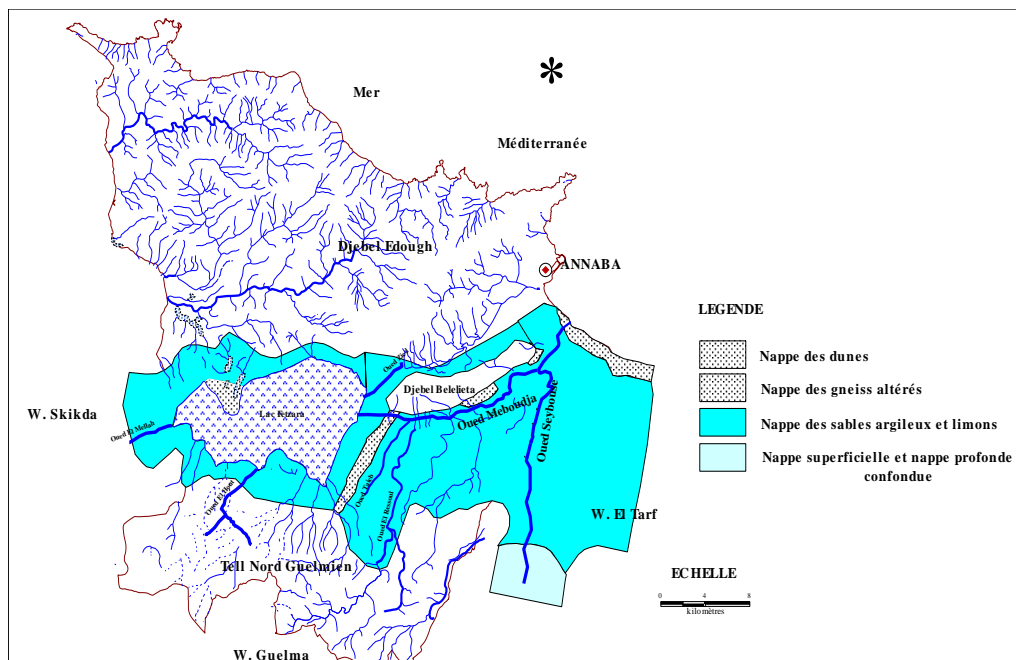


Fig. 39 : Nappes d'eau recensées au niveau de la zone du lac Fetzara (In Zenati, 1999).

2.1. Aquifère des gneiss altérés ou nappe des cipolins :

Elle est de faible extension environ 100 ha de superficie (in Hani 2003), elle est présente dans les massifs de bordure comme Belelieta et Boukhadra (massif de l'Edough).

La profondeur de cette nappe oscille entre 12 à 80 mètres et son épaisseur peut atteindre 70 mètres. le substratum de cet aquifère, est constitué par les gneiss et les micaschistes. Cette nappe est uniquement captive au niveau de la zone Ouest de la région. Les débits d'exploitation des forages sont de l'ordre de 15 l/s, la transmissivité varie entre : 5*10⁻⁵ et 10⁻³ m²/s (Derradji et al. 2005) et la perméabilité varie entre 10⁻⁶ et 10⁻⁵ m/s (Zenati, 2010). Les valeurs de perméabilité calculées oscillent entre 10⁻⁶ et 10⁻⁵ m/s, indiquant une faible perméabilité.

2.2. Nappe du cordon dunaire ou nappe des dunes :

La nappe du cordon dunaire, très limitée dans l'espace, elle s'étend au maximum sur deux (02) kilomètres entre Annaba et Oued Mafragh limitée par les argiles sableuses de la nappe phréatique au sud mais au nord la mer Méditerranée constitue sa limite. Cette nappe, repose sur un substratum argileux et est alimentée par les eaux de pluie.

2.3. Nappe des sables argileux et limons :

En l'absence d'une étude géophysique de détail, cette nappe est mal connue même si certains auteurs la décrivent comme présentant les limites suivantes :

- Au sud le Tell Nord Guelmien,
- Au nord par la retombée brutale du massif de l'Edough,
- A l'Est par les sables dunaires d'El Gantera (bordure du lac Fetzara),
- A l'Ouest par la plaine de Guerbes.

Suite aux essais par pompage réalisés sur cette nappe. Les résultats obtenus montrent que la nappe présente une perméabilité oscillant entre $5.5 \cdot 10^{-4}$ m/s et $14 \cdot 10^{-4}$ m/s.

3. La lithologies des aquifères de la zone d'Annaba

3.1. Description de la coupe hydrogéologique réalisée par Khelfaoui H 2014 :

Dans son travail Khelfaoui H (2014), a utilisé les données lithologiques des puits d'eau (forages) implantés dans la plaine de Berrahal (BH1, BH3 et Guirech), (Fig. 40a & 40b) a réalisé une coupe hydrogéologique, ce qui lui a permis d'identifier une succession de couches perméables constituées de sables et de graviers séparées par des couches imperméables constituées particulièrement d'argiles. Le bloc diagramme (fig. 40b), (in Khelfaoui 2014), montre la succession et l'extension des différents niveaux composant la lithologie de la région de Berrahal. On remarque que les niveaux aquifères sont situés au plus à 20 mètres de profondeur.

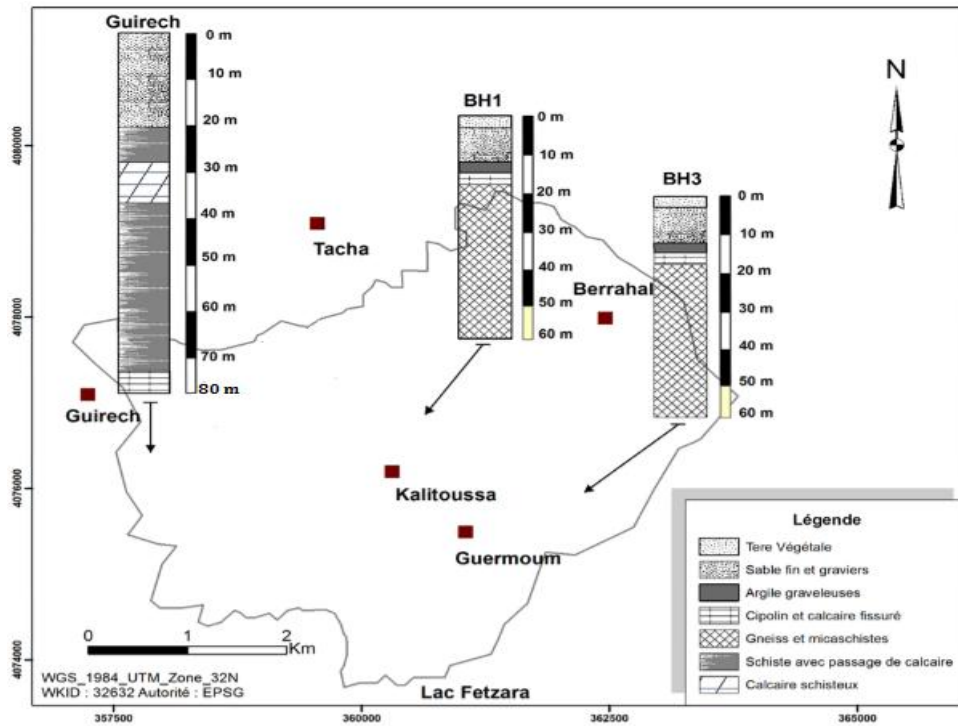


Fig. 40a : Coupe hydrogéologique de la région de Berrahal (Khalfaoui H, 2014).

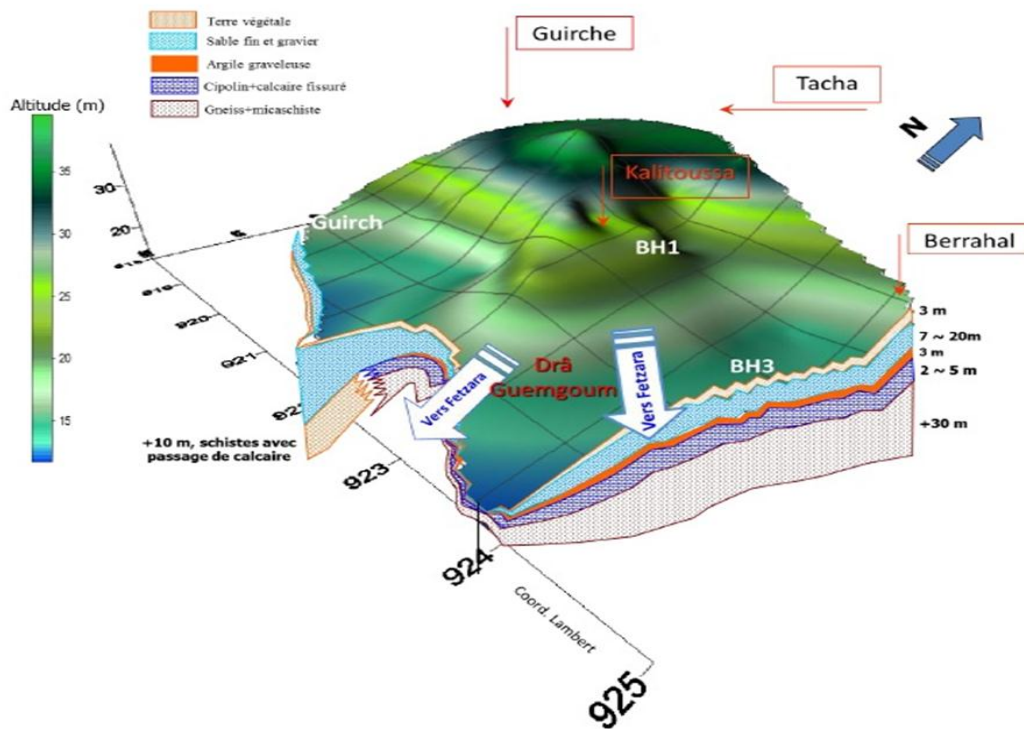


Fig. 40b : Empilement des horizons aquifères à l'Ouest du lac Fetzara (Khalfaoui H, 2014).

4. Indications piézométriques :

Pour cela, nous avons repris et réalisé une cartographie piézométrique. Cette dernière, nous permettra d'étudier les fluctuations des niveaux piézométriques de la nappe superficielle entourant le lac Fetzara et de comprendre son fonctionnement. La réalisation de la cartographie piézométrique a été faite en effectuant des mesures du niveau statique sur trente-deux (32) puits implantés autour du lac.

4.1. Chronique des piézométries :

Les travaux réalisés sur la région, ont conduit les auteurs à réaliser des campagnes piézométriques, nous donnons les interprétations faites par les auteurs et nous terminons par donner la description de la carte réalisée par nos soins. Les résultats obtenus montrent tous un écoulement dirigé vers le lac. Nous allons détailler la piézométrie réalisée par nos soins.

4.1.1. Piézométrie réalisée par Z. Bouhali Avril 2018 :

a. Difficultés rencontrées :

La réalisation d'une campagne piézométrique, ne donne de bon résultats que si le nombre de puits est très important or la sécheresse observée dans la région a fait que certains puits étaient à secs de ce fait nous n'avons pas pu avoir plus de 32 puits, ce qui n'est pas représentatif pour région comme la notre. La carte piézométrique, se rapportant au mois d'avril 2018, période supposée de hautes eaux, en réalité ne donne qu'un aperçu exhaustif sur la relation hydraulique entre le lac et son environnement.

L'observation de la carte (fig. 41), est identique aux précédentes, elle indique deux écoulements, le premier dirigé vers le lac, le second allant vers l'Oued Meboudja. Les lignes de partage des eaux observées au niveau des zones Ouest et Nord, sont à l'origine des écoulements observés.

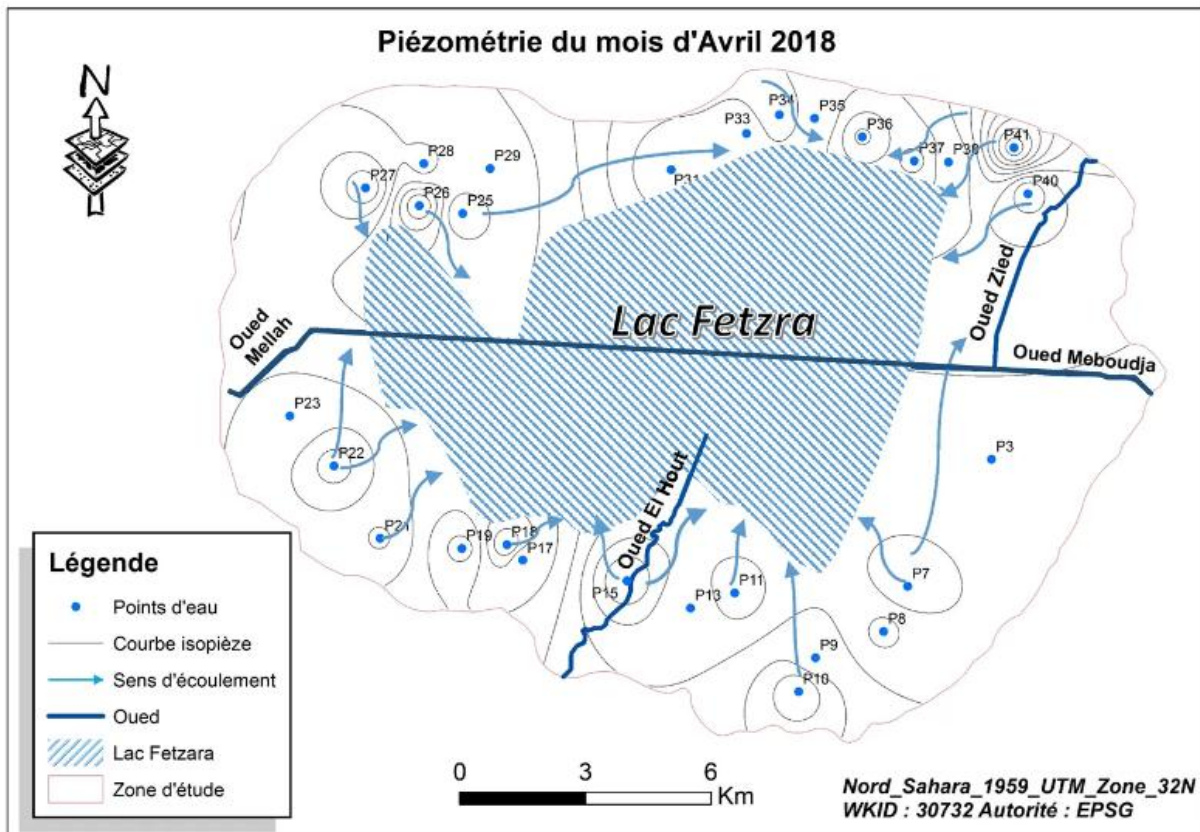


Fig. 41 : Piézométrie de la nappe entourant le lac Fetzara (Avril 2018).

4.2. Conclusion :

Les interprétations piézométriques réalisées par les auteurs ayant travaillé sur la nappe entourant le lac Fetzara, convergent tous vers les mêmes constatations à savoir que les écoulements se font vers le lac, ils ont montrés que cet écoulement se fait selon des zones préférentielles, ces dernières sont liées aux lignes de partage des eaux.

5. La nappe des graviers

Cette nappe est positionnée entre un substratum argileux et un toit imperméable à semi-perméable qui disparaît dans la partie Sud (Drean et Chihani).

La perméabilité de cette nappe varie de 10^{-5} à 10^{-4} m/s,

la transmissivité est de $3,5 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2}$ m²/s dans la région de Drean mais elle est de $4,6 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s dans la partie Nord.

Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 10^{-4} dans la partie captive et atteint 10^{-2} dans la partie libre (in Zenati. 1999). Cette nappe est fortement exploitée.

La dernière campagne piézométrique réalisée en 1996, avait montré une avancée signification du biseau salé, ce qui a entraîné l'arrêt des pompages sur la batterie des salines (nappe profonde) de la région d'Annaba.

Conclusion :

La région d'étude, recèle plusieurs petites nappes exploitées localement. Cette situation est liée à la variation des formations géologiques à l'affleurement et dans le sous sol. La seule ressource hydrique viable dans cette région est la nappe des graviers qui constitue un apport indéniables pour les usagers de l'eau. Cependant la sécheresse récurrente observée dans la région comme dans le pays risque d'exposer cette nappe à l'intrusion marine particulièrement dans sa partie nord où elle est captive (Salines).

La nappe phréatique d'Annaba est exploitée par l'intermédiaire de 500 puits de surface destinée à l'irrigation et la nappe profonde est exploitée par 32 forages pour l'alimentation en AEP des agglomérations ; c'est par conséquent la surexploitation des ressources hydrique menace la région et la qualité des eaux la dedans est entrain d'être dégradé à savoir la salinité à plusieurs endroits de ces nappes.

Chapitre IV: Hydrochimie

De nombreux chercheurs ont travaillé sur les problèmes relatifs à la qualité des eaux de la région du lac Fetzara, ainsi que tour à tour Zenati N (1999 & 2010), Habes S (2007 & 2013), Zahi F (2008 & 2014), Karima Mellouk & coll. (2015), FEKRACHE Fadila (2018), ont démontrés dans leurs travaux que les eaux du lac Fetzara se caractérisaient par une forte salinité. Pour confirmer les résultats obtenus par les chercheurs cités, nous avons réalisé des mesures de la conductivité étalées dans le temps. Les résultats obtenus sont visualisés dans les histogrammes suivants.

Points de prélèvements des échantillons

Pour assurer un suivi rigoureux de la qualité et de la quantité de l'eau entrant et sortant du lac, des campagnes piézométriques saisonnières ont été réalisées. Pour l'échantillonnage, les sites choisis se trouvent dans des zones périurbaines près du lac Fetzara, où il y a un grand nombre d'habitants qui ne bénéficie très rarement d'eau du réseau public de distribution de l'eau potable. Le nombre des puits retenus est de l'ordre de 39 puits. (fig.42)

Les paramètres in situ ont été mesurés en utilisant des multi-paramètres de bande WTW (Multi line P3 PH / LF-SET).

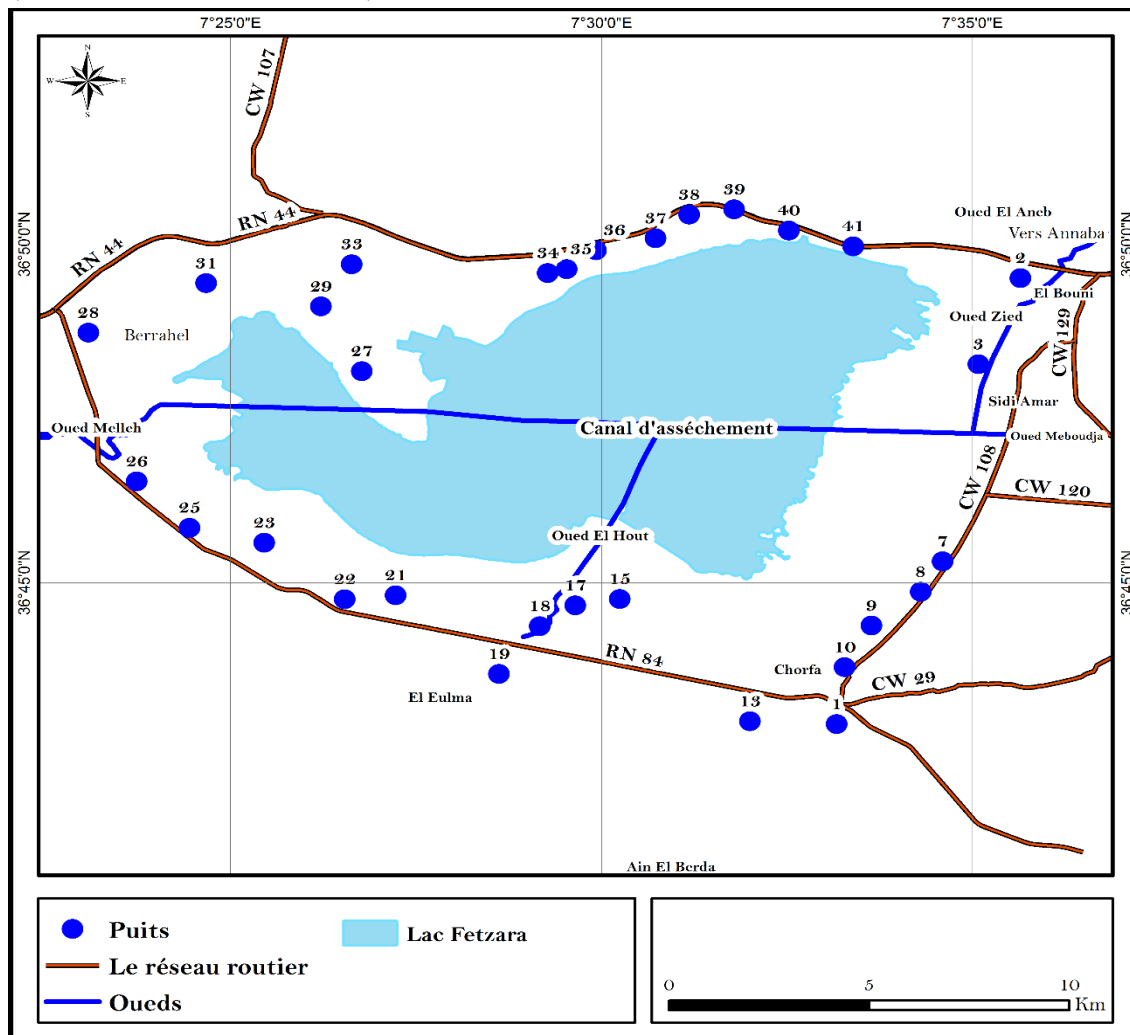


Fig.42 : Carte d'inventaire de points de prélèvement.

1. Variations de la conductivité : Oued et puits confondus

Le graphe suivant (fig. 43), montre que les valeurs de la conductivité oscillent entre 2000 et 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur moyenne de la conductivité reste élevée dans les points les plus proches au lac, ce qui compromet l'utilisation des eaux pour l'irrigation.

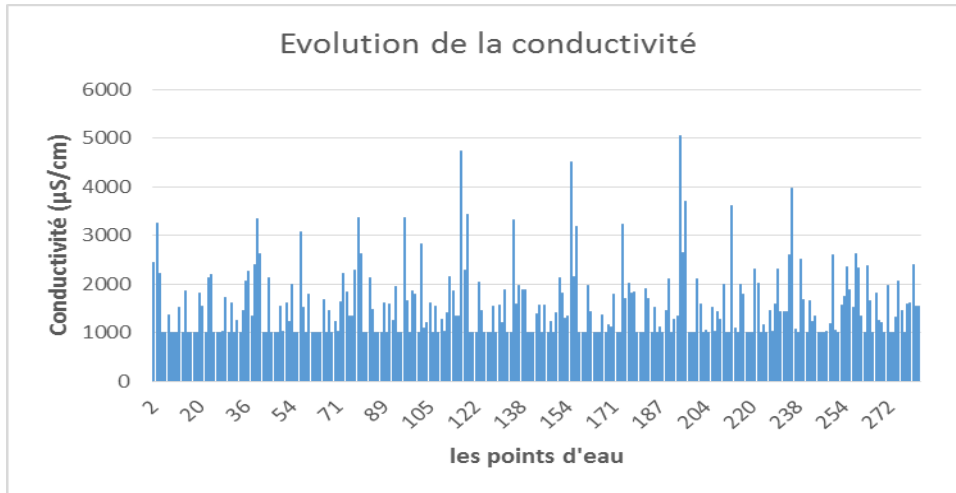


Fig.43 : Variations de la conductivité Oued et puits confondus.

1.1. Variations de la conductivité au niveau des puits de la zone d'étude

L'observation de l'histogramme (fig.44), monte des conductivités oscillant entre 500 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces variations au niveau des puits s'expliqueraient par l'emplacement des puits par rapport au lac.

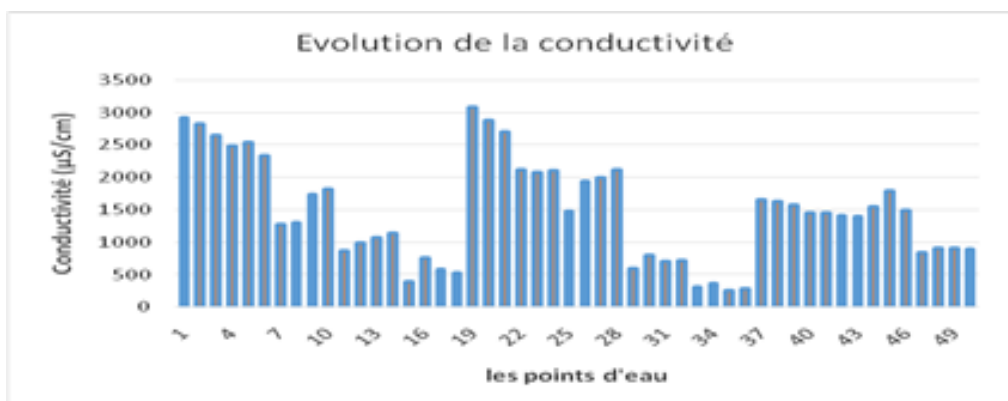


Fig.44 : Variations de la conductivité mesurée au niveau des puits.

1.1.1. Les variations mensuelles de la conductivité au niveau des puits

a. Mois d'Avril et mois de Novembre 2017

Les histogrammes réalisés (fig. 45), au cours des mois d'Avril 2017 (a) et novembre 2017 (b), montrent une variation hétérogène c'est-à-dire, la conductivité n'est pas stable, elle atteint un maximum de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au mois de novembre alors qu'elle ne dépasse pas 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au

mois d'avril. Cette situation est liée au manque de précipitations au cours de cette période impliquant une absence de la dilution pouvant se produire lors des précipitations.

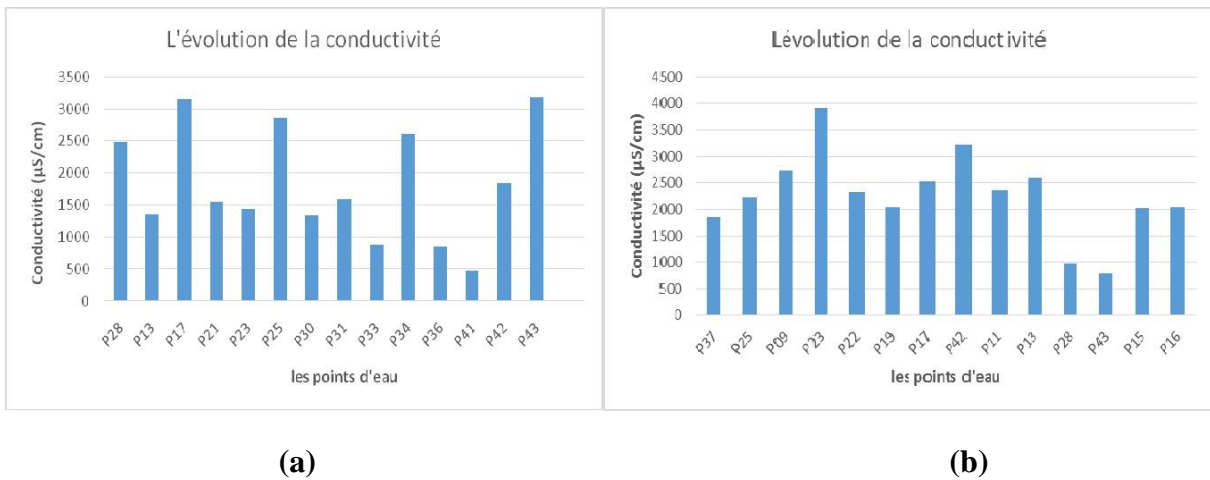


Fig.45 : Histogramme montrant les variations de la conductivité au cours des mois d'Avril 2017 (a) et Novembre 2017 (b) au niveau des puits.

1.2. Variations de la conductivité au niveau des Oueds (fig. 46)

Les histogrammes réalisés se rapportant au mois de Décembre 2016 (a) et au mois de Mai 2018 (b), montrent pour le mois de Décembre des conductivités ne dépassant pas 2400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs sont enregistrées au niveau de l'Oued Zied à l'approche du lac. L'Oued Meboudja indique des conductivités de l'ordre de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, supposées relativement faibles. Ces valeurs sont dues au temps de séjours des eaux relativement courts au niveau du lac (période de précipitations). Au cours du mois de Mai, nous constatons un léger accroissement de la conductivité particulièrement au niveau de l'Oued Meboudja, on a enregistré 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

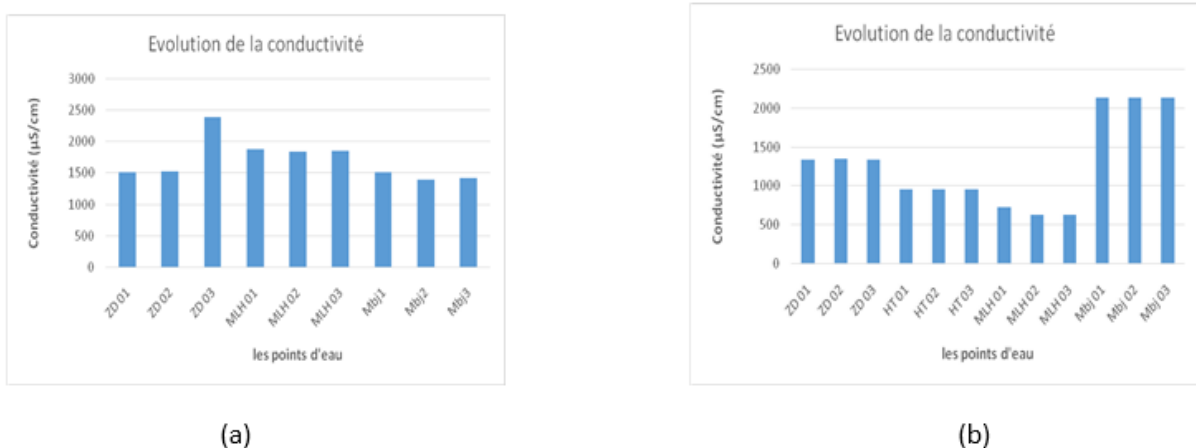


Fig. 46 : Histogrammes montrant les variations de la conductivité au niveau des Oueds (mois de Décembre 2016 (a) et mois de Mai 2018 (b))

Les histogrammes réalisés, montrent d'une manière générale une variation saisonnière de la conductivité. Cette variation reste très hétérogène dans l'espace et dans le temps. Pour

essayer d'expliquer ces variations, nous allons rechercher les paramètres à l'origine de ces changements. Nous allons réaliser une analyse en composantes principales.

Analyses chimiques

Les principaux éléments présents dans l'eau ont été analysés par un appareil de chromatographie ionique (Metrohm 883 basic IC plus) avec détecteur conductimétrique.

Préalablement à leur analyse chimique, les échantillons d'eau ont été filtrés sur membrane en nylon (0,22 µm).

La phase mobile utilisée est un mélange de NaHCO₃ (168 mg) et de Na₂CO₃ (678 mg) dissous dans deux litres d'eau ultra pure. Le débit d'injection est de 0,7 mL / min et le volume injecté est de 20 µL. Le chromatographe a été étalonné en utilisant cinq solutions standard contenant une concentration de cations ou d'anions allant de 1 à 50 mg / L

2. Analyse en composantes principales

Pour visualiser les liens existant entre les éléments chimiques composant les eaux, nous avons réalisé une ACP globale portant sur 599 analyses d'eau.

Pour l'interprétation, de l'ACP, nous allons commencer par analyser la matrice de corrélation, pour ensuite interpréter le cercle ACP, constitué par les deux F1F2, ce cercle avec 66,55% de l'inertie donne le maximum d'information.

L'ACP comprend 599 échantillons et 9 variables.

2.1. Les corrélations obtenues :

Le tableau (27), indique les associations entre les éléments deux à deux. On note des associations positives et d'autres négatives. Parmi ces associations il y a les significatives, elles peuvent être positives ou négatives.

Le nombre d'échantillons utilisé dans la matrice étant de 599, le coefficient de corrélation à prendre en considération est $r = 0.15$

Tab. 27 : Matrice de corrélation entre les variables.

Vari	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS
Ca ²⁺	1							
Mg ²⁺	0,08	1						
Na ⁺	0,28	0,40	1					
K ⁺	-0,10	-0,11	0,07	1				
HCO ₃ ⁻	0,20	0,33	0,54	0,01	1			
Cl ⁻	0,45	0,53	0,78	-0,13	0,51	1		
SO ₄ ²⁻	0,35	0,35	0,48	-0,23	0,39	0,58	1	
TDS	0,51	0,55	0,87	-0,08	0,63	0,94	0,71	1

L'observation du tableau précédent montre deux corrélations :

Une première positive et concerne les couples suivants (tab.28) :

Tab. 28 : Les couples indiquant des corrélations significatives.

Couple	Valeur de r	Couple	Valeur de r	Couple	Valeur de r	Couple	Valeur de r
Ca-Na	0.28	Mg-HCO ₃	0.33	Na-SO ₄	0,48	SO ₄ -TDS	0,71
Ca-HCO ₃	0.20	Mg-Cl	0.53	Na-TDS	0,87		
Ca-Cl	0.45	Mg-SO ₄	0,35	HCO ₃ -Cl	0,51		
Ca-SO ₄	0.35	Mg-TDS	0,55	HCO ₃ -TDS	0,63		
Ca-TDS	0.51	Na-HCO ₃	0,54	Cl-SO ₄	0,58		
Mg-Na	0.40	Na-Cl	0,78	Cl-TDS	0,94		

-la seconde négative dite aussi inverse concerne le couple K-SO₄ avec $r = -0.23$

2.2. Interprétation du cercle ACP

Le cercle formé par les deux F1F2 (fig. 47), fournit 66 % de l'inertie totale ou information totale, Selon l'axe horizontal F1 (52.48 %), nous remarquons une opposition entre deux familles d'eaux ainsi la partie négative de l'axe correspond aux eaux faiblement minéralisées mais riches en potassium. Les eaux fortement minéralisées occupent la partie positive de l'axe horizontal. Nous remarquons que la TDS, est influencée par tous les éléments analysés excepté le potassium qui se détache du groupe indiquant une origine différente.

En observant l'axe F2 (14, 06%), on remarque deux pôles le premier caractérisé par les bicarbonates, le sodium et le potassium, le second déterminé par les eaux sulfatées calciques qui s'opposent aux eaux bicarbonatées sodiques.

D'une manière générale selon l'axe F2, la TDS est liée directement aux chlorures par contre tantôt les eaux bicarbonatées sodiques influencent la TDS tantôt les sulfatées calciques influencent la TDS. Cette répartition, est dictée par la période de prélèvement. Cette tendance est confirmée par les variations du potassium. Cet élément est lié aux apports issus de l'Edough alimentant la zone au cours de la période pluvieuse, ce qui enrichie les eaux en potassium cependant au cours de la période sèche les eaux changent de composition chimique par le biais d'échange de base.

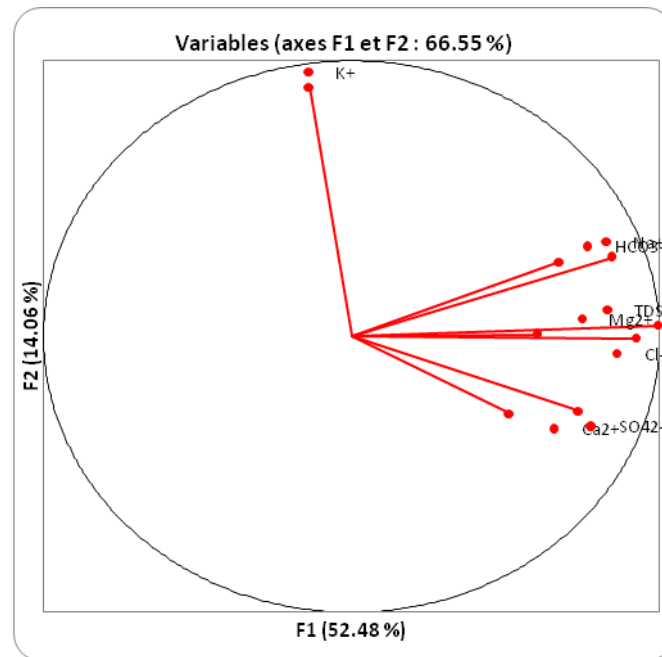


Fig.47 : Cercle ACP des eaux souterraines région du lac Fetzara.

3. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper (fig. 48), réalisé en utilisant les résultats des analyses en notre possession que nous avons combinées avec des eaux embouteillées (Bouglez) et les eaux de mer. Ainsi nous avons déterminé les six familles suivantes :

- la famille des eaux de mer,
- la famille des eaux d'intrusion marine,
- la famille des eaux légèrement douces,
- la famille des eaux issues des mélanges,
- la famille des eaux indiquant une légère intrusion,
- la famille des eaux d'adoucissement (rejets).

Ces familles se répartissent selon les pôles du diagramme. Dans le détail, on observe : -

- Les eaux indiquant une intrusion marine, constituée par un grand nombre d'échantillons, mettant en évidence une relation mer-nappe. En observant le losange, nous remarquons qu'une partie des échantillons formant cette famille, se situe au-

dessus de la droite de mélange théorique avec les eaux de mer, confirmant ainsi l'origine marine des eaux.

- En dessous de la précédente famille, on retrouve les eaux dont la composition est très proche de celle de l'eau de mer. Cette famille caractérise les échantillons prélevés au niveau de la zone littorale (Aéroport, El Chatt, ...), la zone de mélange, avec un maximum d'échantillons,
- légère intrusion, les échantillons caractérisant cette famille sont nombreux et succèdent aux eaux chlorurées sodiques en allant vers le centre du losange.
- intrusion marine, constituée par un nombre appréciable d'échantillons, mettant en évidence une relation mer-nappe
- La famille des eaux légèrement douces, constituée de quelques échantillons moins d'une dizaine, correspondent aux eaux des forages d'El Hadjar.
- Eau légèrement douce, sont peu nombreux les échantillons caractérisant cette catégorie.
- La famille des eaux indiquant un adoucissement, contient quelques échantillons, ces eaux proviendraient des rejets industriels.
- La famille des eaux indiquant un mélange constituée de quelques échantillons.

L'interprétation réalisée montre deux tendances des eaux :

La première concerne les eaux fortement minéralisées caractérisant le pôle chloruré sodique sur sa bordure par contre les eaux moins minéralisées occupent le centre du losange. Cette interprétation montre une salinité avérée des eaux. Nous allons rechercher les origines de cette minéralisation. Nous remarquons également que les eaux les moins minéralisées situent au centre du losange constituant le domaine mixte.

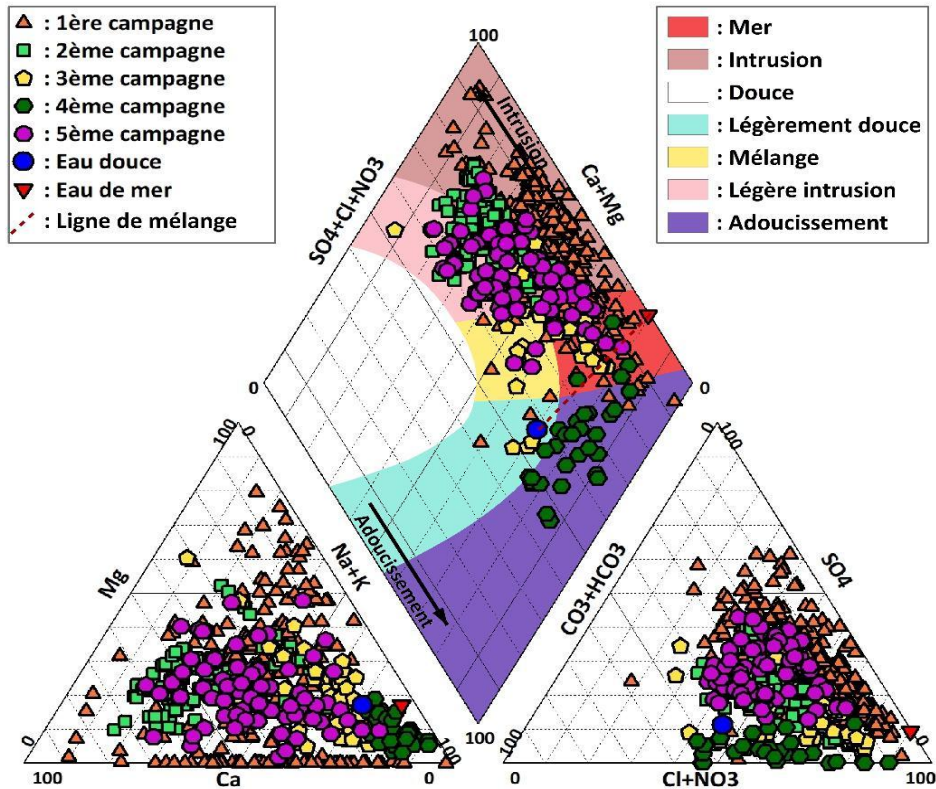


Fig.48 : Les familles des eaux selon le diagramme de Piper.

L'ACP et le diagramme de Piper indiquent une minéralisation importante des eaux. Nous allons rechercher les paramètres induisant la minéralisation.

4. Classification des eaux

Les résultats issus de l'interprétation de Piper nous ont permis de déduire la classification suivante (fig. 49 (a) et (b)). Nous remarquons que la grande partie des eaux oscillent entre les classes eau légèrement salée et injurieusement salée, indiquant ainsi une minéralisation certaines des eaux. Par ailleurs la classe eau douce, la classe eau fortement salée et la classe eau sévèrement salée contiennent peu d'échantillons. Cette classification indique une variation spatio-temporelle de la minéralisation. Nous allons essayer de déterminer les origines de cette minéralisation.

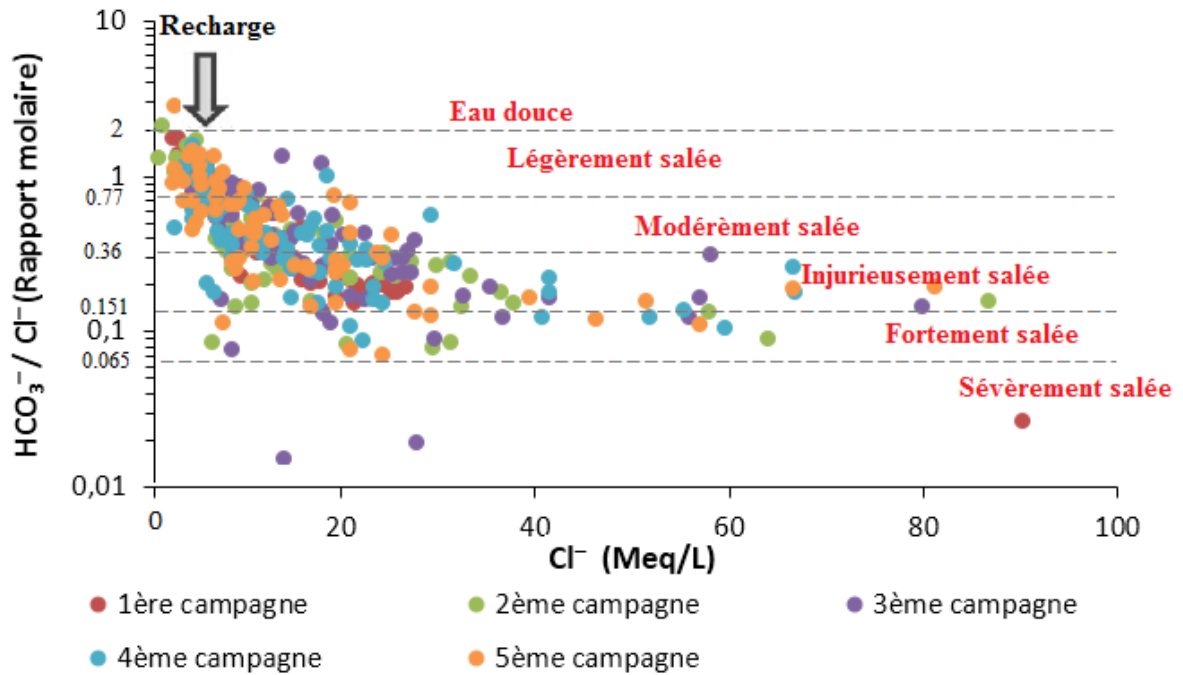


Fig.49 (a) : Degré de salinisation en graphique inverse du rapport de Simpson pour l'aquifère entourant le lac Fetzara.

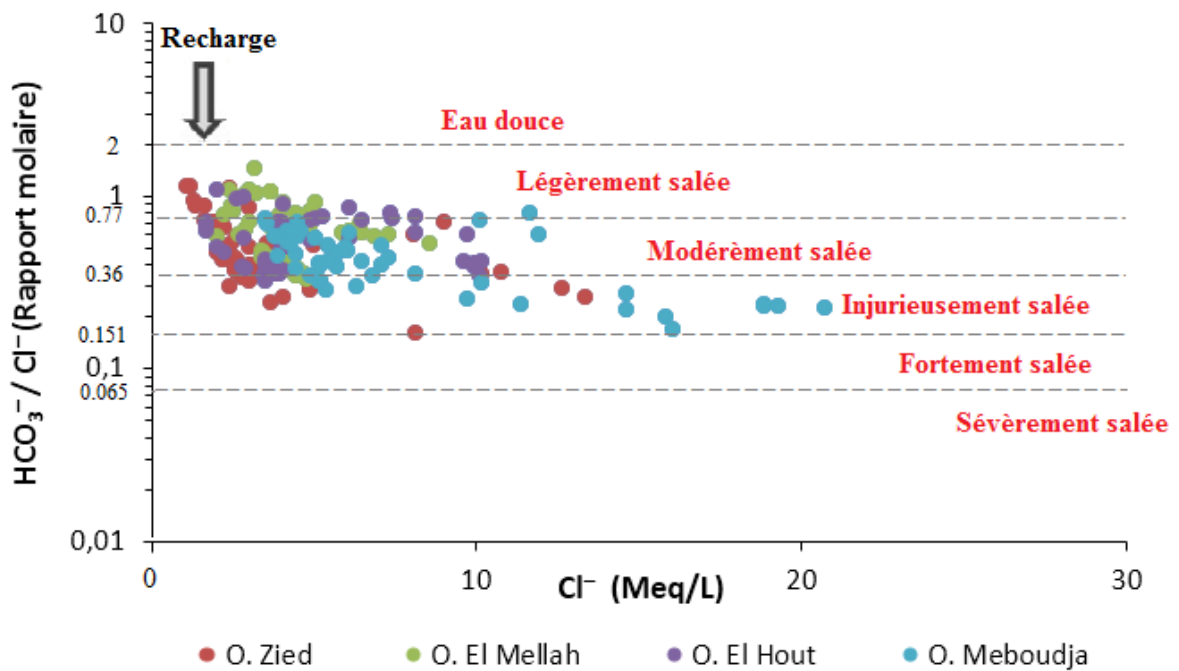


Fig.49 (b) : Degré de salinisation en graphique inverse du rapport de Simpson pour les oueds alimentant le lac Fetzara.

5. Origines de la minéralisation observée

Parmi les facteurs à l'origine de cette minéralisation, nous observons :

- les variations de la conductivité et par conséquent de la composition chimique à l'entrée et à la sortie du lac.
- l'influence de la géologie locale,
- la présence marine,
- le climat

6. Caractéristiques des eaux entrantes et sortantes e du lac

Les précipitations et les apports d'eau issus des Oueds Hout, Mellah et à degré moins l'Oued Zied, alimentent le lac. La sortie des eaux se fait par le biais de l'Oued Meboudja, qui joue le rôle de canal de vidange.

Le tableau suivant N° 29, donne un aperçu sur la minéralisation des eaux en période pluvieuse à l'entrée et à la sortie du lac.

Tab. 29 : Variabilité de la conductivité des eaux des cours d'eau. (Entrée et sortie du lac).

Oued	Conductivité entrée $\mu\text{s}/\text{Cm}$	Conductivité sortie $\mu\text{s}/\text{Cm}$
Hout	601	
Mellah	370	
Zied	1400	
Meboudja		3100

Le tableau précédent indique une augmentation de la conductivité des eaux au niveau de l'Oued Meboudja (sortie du lac). Nous recherchons les paramètres à l'origine de cette variation de la conductivité.

7. Influence de la géologie locale

Le lac est alimenté par les eaux de pluie, ces dernières proviennent des monts de l'Edough par ruissellement et par les oueds Zied en partie, El Hout, El Mellah, les petits ruisseaux qui s'écoulent directement des pentes périphériques du lac, des rejets industriels et urbains, et enfin directement des pluies.

L'Edough est formé de formations métamorphiques, à composition pétrographique variable, (gneiss et des leptynites alternant avec des micaschistes à grenats et parfois même à disthène et de calcaires métamorphiques). Ces formations vont influencer la composition chimique des eaux.

La superficie submergée varie en fonction des saisons, elle peut être de quelques kilomètres en été et va jusqu'à 60 km² en hiver. Nous donnons ici quelques valeurs des débits mesurés au niveau des différents Oueds ainsi Oued Meboudja (1,00 m³/s), Oued Mellah (0.44 m³/s), Oued Hout (0.4 m³/s) et Oued Zied (0.21 m³/s).

7.1. Mise en évidence d'une Dynamique hydrosaline du lac Fetzara

Les eaux alimentant le Lac, proviendraient du massif de l'Edough, les roches constituant ce dernier, contiennent entre autre des silicates qui par le biais de l'hydrolyse qui se produit vont enrichir les eaux en cations, anions et en silice, selon le processus (in Appelo et Postma).

L'altération et la mise en solution des silicates, vont enrichir l'eau en cations et en silice. Cette réaction consomme de l'acide et s'accompagne donc d'une augmentation du pH avec production de bicarbonates.

L'altération des minéraux considérés s'accompagne de la formation de minéraux secondaires.

7.2. Altération de différents minéraux silicatés en kaolinite d'après APPELO et POSTMA

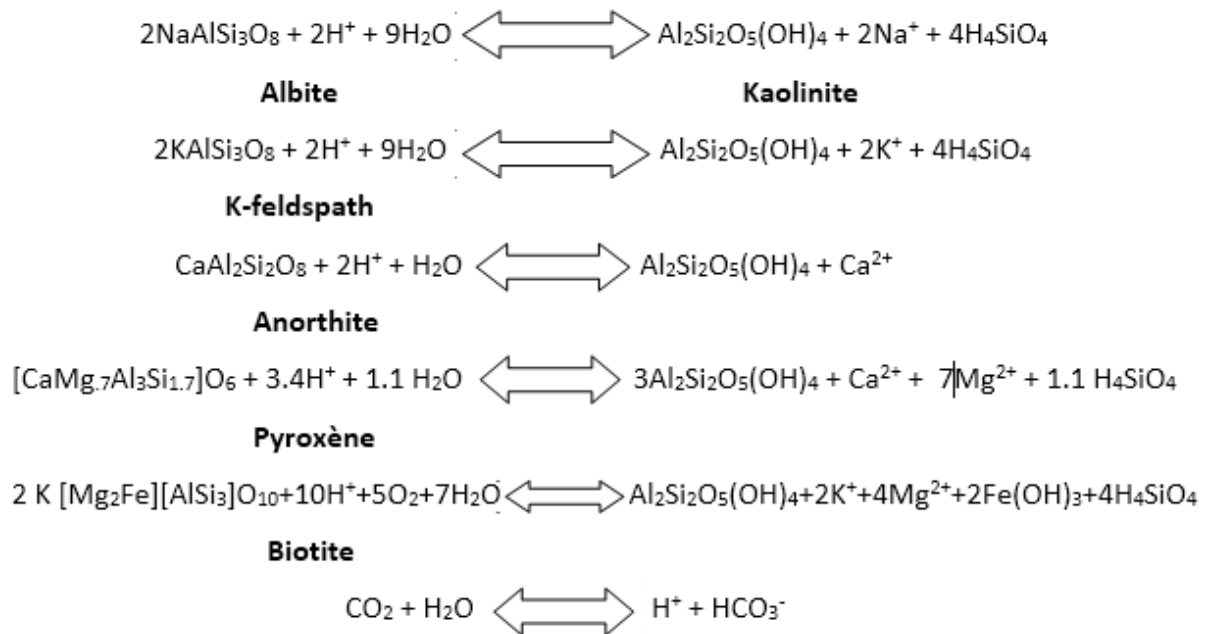
L'altération des silicates, qui représentent 97% des roches de la croûte terrestre, est un phénomène majeur de la géologie. Il est à l'origine de la formation :

-des sédiments détritiques : argiles, silts, sables...

-et, à la suite de la mise en solution dans l'eau des ions sodium, potassium, calcium, magnésium, fer ferreux, et partiellement de la silice, à l'origine d'une grande partie des roches carbonatées, évaporitiques et siliceuses.

L'altération des silicates est un ensemble de réactions grandes consommatrices de CO₂ (puits ou « pompe à CO₂ ») ce qui en fait un processus important pour comprendre le cycle du carbone et l'évolution des climats du passé (paléoclimats) et actuels.

C'est un processus qui se fait essentiellement en phase aqueuse. Après son passage au travers des sols superficiels, l'eau chargée de dioxyde de carbone (CO₂) et d'acides organiques, comme les acide humiques, s'acidifie et attaque les silicates au niveau du sol et du sous-sol, en particulier aux endroits où l'eau stagne (contact sol/sous-sol, fissures du sous-sol...). Par altération, les ions des minéraux silicatés (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺...) sont en partie remplacés par des ions H⁺. Les ions non remplacés (aluminium, fer ferrique et une partie de la silice) recristallisent en place. En prenant l'exemple d'un minéral silicaté de la croûte terrestre, appartenant à la famille des feldspaths, le plagioclase, et en considérant le pôle calcique des plagioclases, l'anorthite (CaAl₂Si₂O₈), le bilan de son altération est le suivant :



Cette dissolution entraîne une modification du rapport des concentrations des éléments en solution vis-à-vis du minéral considéré des rapports constants en solution avec libération de Na, K, Ca, Mg ...

7.3. Apports des eaux de pluies issues du massif de l'Edough

Tab. 30 : Les apports des éléments chimiques par les précipitations météoriques kg/s (In Zenati, 2010).

Elément	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
Flux (kg/s)	0,28	0,159	0,29	0,11	0,03	0,13	0,03

L'observation du tableau précédent (tab.30), montre un apport en Chlorures, Bicarbonates, Calcium et Sodium, ceci va conférer aux eaux les faciès suivants :

- Faciès Chloruré-sodique ou Chloruré calcique,
- Faciès Bicarbonaté-Calcique ou bicarbonaté sodique.

7.4. Influence de la mer et du lac sur la qualité des eaux de la région

Les plans d'eau sont tous sujets à une forte évaporation, le diagramme de Gibbs, s'avère utile pour mettre en évidence une éventuelle évaporation des eaux. Nous avons établie trois diagrammes de Gibbs, le premier dit global englobant les données du lac, des oueds et des nappes, le second caractérise les Oueds et le troisième traite des eaux des nappes. Pour rappel, les diagrammes de Gibbs, sont largement utilisés pour évaluer la source fonctionnelle des ions dissous dans l'eau tels que la dominance des précipitations, l'altération des roches et la dominance de l'évaporation qui contrôle la chimie de l'eau.

8. Diagramme de Gibbs global (Fig.50)

Nous remarquons les échantillons sont dans leur totalité se localisent dans la partie indiquant une influence de l'évaporation sur l'accroissement de la minéralisation. Cet accroissement s'explique par le fait que les eaux sont superficielles (lac) et subissent directement les aléas des variations saisonnières du climat. On note que l'influence de la mer reste franche mais influencée les sortants du lac par l'Oued Meboudja.

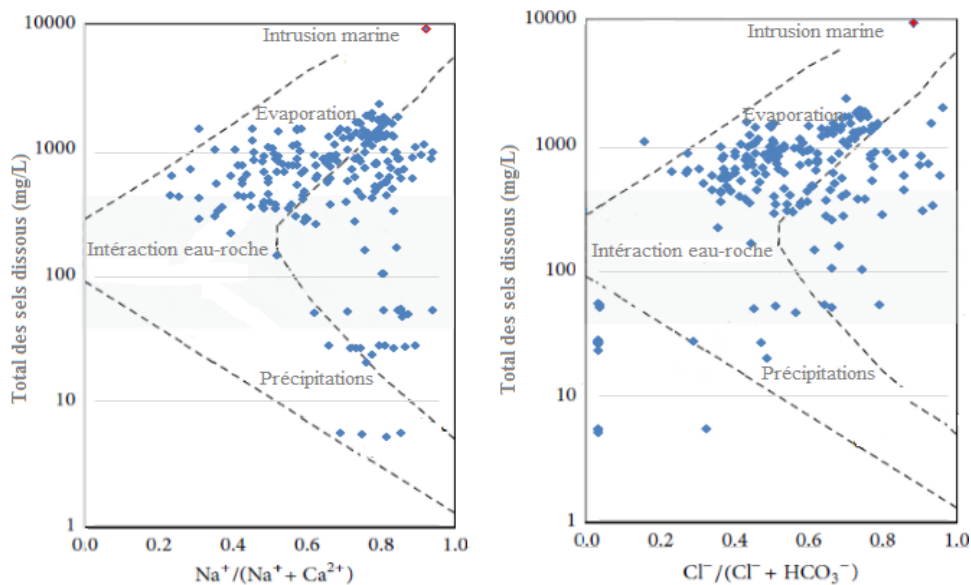


Fig.50 : Diagramme de Gibbs global représentant le rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ Vs TDS dans l'aquifère entourant le lac Fetzara et les oueds alimentant le lac.

Par ailleurs l'interaction eau-roche, se produit surtout pendant la saison pluvieuse (présence d'eau dans le lac) induisant un échange entre l'eau et la roche. Le domaine des précipitations chimiques des minéraux contient quelques échantillons.

8.1. Diagramme de Gibbs l'aquifère entourant le lac Fetzara (fig.51)

On a une répartition analogue à la précédente. Cette analogie est due aux échanges nappe-lac, mise en évidence par la piézométrie.

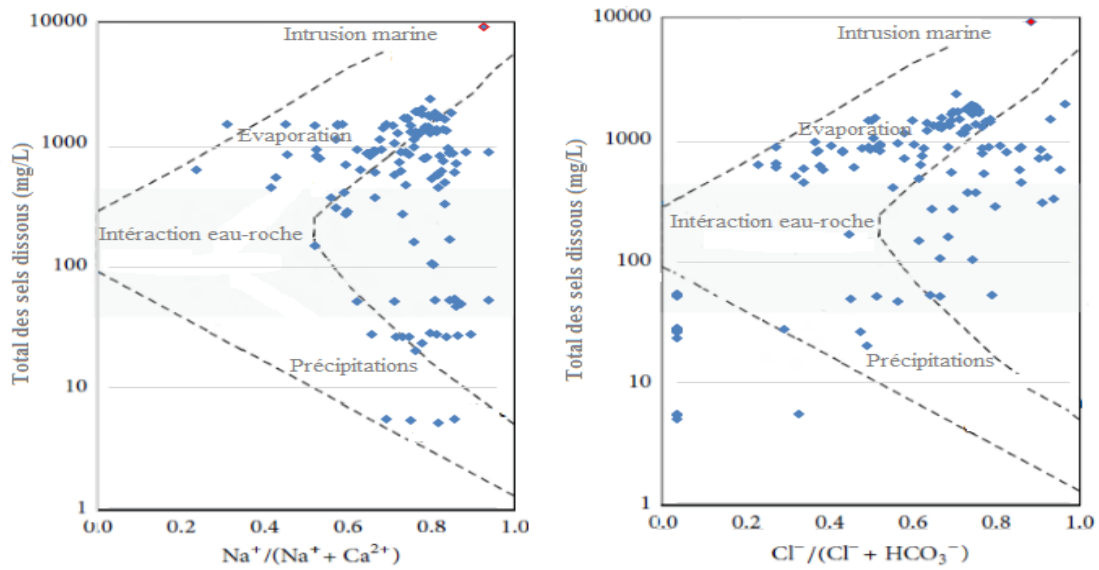


Fig.51 : Diagramme de Gibbs représentant le rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ Vs TDS dans l'aquifère entourant le lac Fetzara.

8.2. Diagramme de Gibbs des oueds alimentant le lac Fetzara (Fig. 52)

Dans ce cas, les eaux sont influencées par l'évaporation. Cette répartition est due au fait que les écoulements sont saisonniers ce qui ne permet pas une durabilité des échanges eau-roche pouvant modifier la composition chimique des eaux.

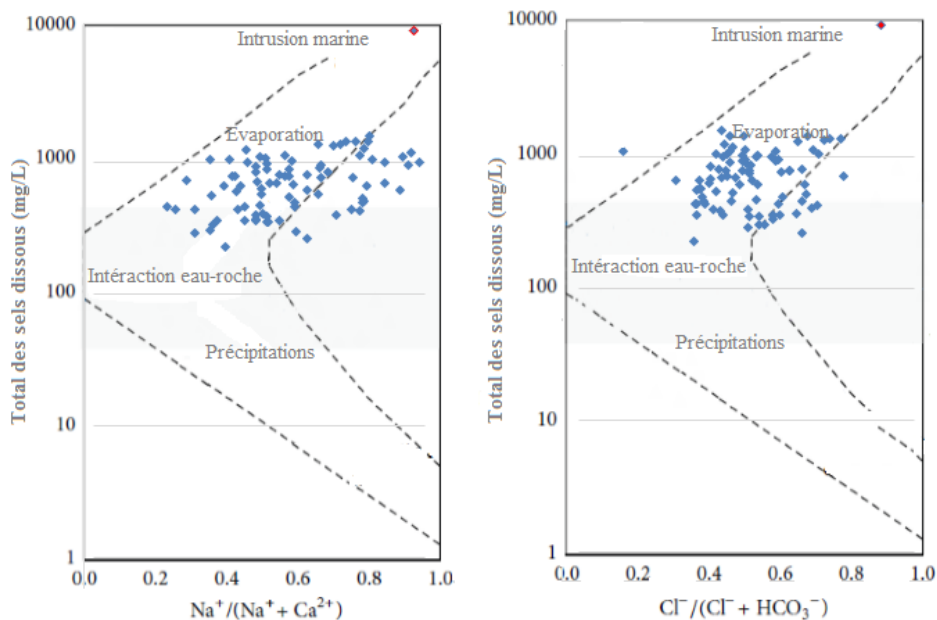


Fig. 52 : Diagramme de Gibbs représentant le rapport $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ Vs TDS dans les oueds alimentant le lac Fetzara.

Les diagrammes de Gibbs, réalisée indiquent une minéralisation des eaux est soit provoquée par l'évaporation et à la précipitation (altération des minéraux), mais elle peut être due à l'évaporation. Pour lever cette ambiguïté, nous avons calculé les indices de saturation (logiciel Diagramme) et déterminer les minéraux à l'origine de la minéralisation observée.

9. Vérification à l'aide de la thermodynamique

9.1. Interprétation des résultats obtenus

Le dépouillement des résultats a montré que les minéraux suivants présentent un indice de saturation compris dans l'intervalle (-4 à +4), que nous avons considéré comme représentatif, il s'agit de l'anhydrite ($\text{CaSO}_4+\text{H}_2\text{O}$), de l'aragonite (CaCO_3), de la calcédoine (SiO_2) de la dolomite $\text{Mg Ca}(\text{SO}_3)_2$ et de la sépiolite (MgSiO_2).

9.1.1. Cas des eaux des Oueds

L'observation des diagrammes se rapportant aux eaux des Oueds (fig. 53), montrent une sous saturation vis-à-vis des minéraux. Ce qui laisse supposer un accroissement de la minéralisation cas des eaux de l'Oued Mellah (entrée) et l'Oued Meboudja (sortie)

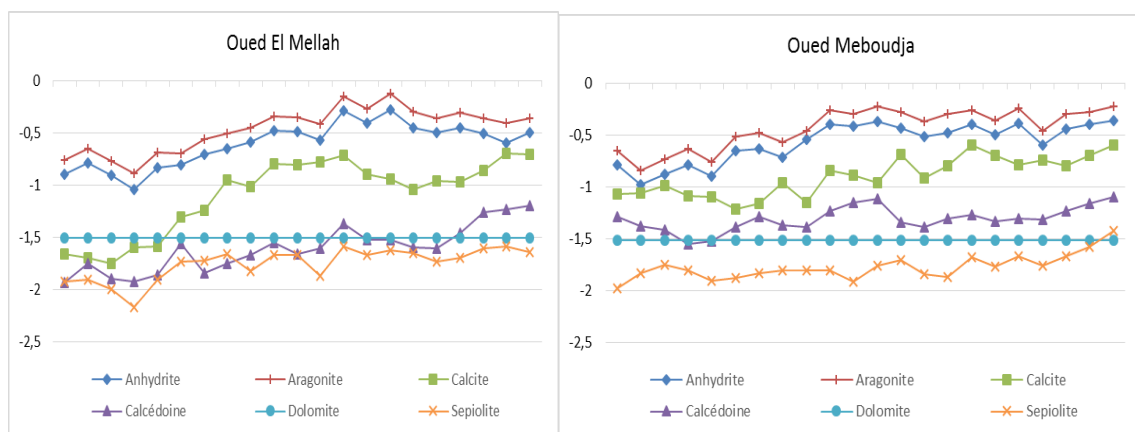


Fig.53 : Variations des indices de saturation (eau de surface)

9.1.2. Cas des eaux souterraines (fig.54)

On retrouve une situation analogue à celle des eaux de surface. C'est-à-dire une sous saturation vis-à-vis des minéraux déterminés, l'anhydrite ($\text{CaSO}_4+\text{H}_2\text{O}$), de l'aragonite (CaCO_3), de la calcédoine (SiO_2) de la dolomite $\text{MgCa}(\text{SO}_3)_2$ et de la sépiolite (MgSiO_2).

Cette évolution confirme la relation entre les deux catégories des eaux (eau de surface et eau souterraine) comme indiqué au niveau des cartes piézométriques réalisées.

9.2. Les origines des minéraux déterminés et leurs associations

9.2.1. Caractéristiques chimiques et origines des minéraux

L'anhydrite ($\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) : roches sédimentaires d'origine saline « évaporites ». L'anhydrite est un minéral de sulfate de calcium non hydraté. L'hydratation peut se produire et conduire à la formation de gypse à partir d'anhydrite.

-l'aragonite (CaCO_3) : c'est un minéral primaire dans les roches métamorphiques, apparaît sous forme de minéraux de remplacement dans les roches sédimentaires, volcaniques et métamorphiques et de gisements, formés à basse température et pression de solutions aqueuses. Souvent associée aux :

-gypse, soufre (dans les dépôts évaporitiques),

-quartz (dans les schistes bleus),

-calcite, dolomite,....

-la calcédoine (SiO_2) : Il s'agit d'une phase de la silice.

- la dolomite $\text{MgCa}(\text{SO}_3)_2$

- la sépiolite MgSiO_2 : argile

L'aperçu réalisé montre, que les eaux du lac présentent une minéralogie très influencée par l'interaction eau-roche, ce qui explique la présence de divers minéraux.

10. Conclusion

L'analyse des données hydrochimiques montre que la zone du lac Fetzara, reste très influencée par la géologie locale et les précipitations affectant la zone de notre étude. Nous avons pu remarquer qu'au cours de la période pluvieuse la dilution et l'hydrolyse jouent un rôle important dans l'acquisition du chimisme des eaux souterraines (nappe entourant le lac Fetzara) et des eaux superficielles (Oued Meboudja, Zied, Hout et Mellah), ceci nous permet de dégager les facteurs à l'origine de cette minéralisation et l'évolution de leurs concentrations dans l'espace et dans le temps.

L'utilisation de la statistique par le biais de l'analyse en composantes principales (ACP) a montré que les chlorures et le sodium sont en grande partie à l'origine de la minéralisation excessive des eaux particulièrement en période de sécheresse où l'évaporation devient très

importante. . Le diagramme de Piper a montré l'existence de plusieurs familles d'eaux, ces dernières sont très influencées par la géologie (formations métamorphiques et sédimentaires), par le climat, une répartition des précipitations spatio-temporelle très variable et très aléatoires. Ces deux facteurs agissent sur la qualité des eaux de manière contradictoires. Ainsi au cours de la période pluvieuse les précipitations entraînent une baisse des concentrations par la dilution, on peut dans ce cas parler d'une symbiose entre le chimisme des eaux et le climat. Par contre lors de la saison sèche l'évaporation agit sur les eaux en augmentant la minéralisation par le biais de l'évaporation, confirmée par les diagrammes de Gibbs qui montrent des eaux en grande partie se répartissent dans la classe d'évaporation. L'utilisation de l'outil thermodynamique montre que plusieurs minéraux interviennent dans la minéralisation et présentent tous un indice de saturation à l'unité de ce fait les eaux sont sous saturées par rapport à ces minéraux.

II. Modélisation par la méthode des neurones de connexion

1. Analyses des données

1.1. Description des données

Dans le cadre de notre étude, il s'agit d'estimer le taux de la salinité des eaux à l'entrée et à la sortie du lac Fetzara. Notre connaissance du procédé est limitée à des données enregistrées en temps réel sur deux cycles hydrologiques et aux différents paramètres influençant le bon fonctionnement de ce procédé.

L'ensemble des données est divisés en deux ensembles : (tab.31)

- Le premier ensemble est utilisé pour le processus de l'apprentissage pour construire le modèle (72% des données)
- Le deuxième ensemble est utilisé pour la validation du modèle (28% des données)

Tab.31 : les données attribuées aux différents scénarios d'entrées du modèle RNA

Phase	Puits	Longitude	Latitude	Phase	Puits	Longitude	Latitude	Phase	Puits	Longitude	Latitude
Apprentissage	2	7°23'09"	36°48'30"	Apprentissage	23	7°35'11"	36°47'08"	Validation	1	7°22'37"	36°47'54"
	3	7°23'52"	36°46'19"		24	7°35'38"	36°46'12"		5	7°25'12"	36°49'01"
	4	7°24'53"	36°49'18"		26	7°36'05"	36°47'32"		7	7°25'46"	36°44'32"
	6	7°25'30"	36°48'23"		27	7°36'23"	36°49'07"		11	7°28'35"	36°49'10"
	8	7°26'43"	36°49'06"		28	7°36'38"	36°48'42"		12	7°29'57"	36°44'06"
	9	7°27'50"	36°43'39"		29	7°37'10"	36°46'25"		15	7°31'50"	36°49'34"
	10	7°28'27"	36°44'10"		30	7°38'39"	36°45'55"		18	7°33'35"	36°43'02"
	13	7°30'16"	36°49'17"		32	7°39'30"	36°46'03"		22	7°35'06"	36°45'44"
	14	7°30'32"	36°43'42"		33	7°39'34"	36°44'25"		25	7°35'56"	36°48'12"
	16	7°32'19"	36°49'35"		34	7°40'08"	36°46'32"		31	7°38'58"	36°45'38"
	17	7°33'02"	36°42'47"		35	7°41'08"	36°45'20"		38	7°44'12"	36°48'40"
19	7°34'24"	36°45'17"	36	7°41'34"	36°46'53"						
20	7°34'27"	36°43'49"	37	7°42'32"	36°46'11"						
21	7°34'55"	36°49'19"	39	7°45'41"	36°50'14"						

Les données disponibles proviennent des résultats des mesures des paramètres physiques mesurés hebdomadairement et l'analyse des paramètres chimiques faites au laboratoire. Nous disposons en continu de 7 paramètres descripteurs : conductivité, chlorure, sulfates, bicarbonates, calcium, magnésium, sodium. Les données sont composées des valeurs de la période qui s'étend du 08/11/2016 au 15/05 2019. Des statistiques descriptives simples des données brutes sont présentées dans le Tableau 32.

Tab.32 : description statistique des paramètres

Variables	Ensemble des données d'apprentissage					Ensemble des données de validation				
	Min	Max	Mean	SD	CV	Min	Max	Mean	SD	CV
EC [µs/cm]	281	6800	1789.75	1225.67	0.68	276	2440	1093.43	621.71	0.57
Cl⁻ [mg/l]	85.2	2996.2	675.02	523.60	0.78	35.5	1065	402.02	268.04	0.67
SO₄²⁻ [mg/l]	19.2	725.3	231.11	133.25	0.58	19.2	528	171.29	106.88	0.62
HCO₃⁻ [mg/l]	23.18	1284.53	357.88	209.51	0.59	34.77	614.88	301.55	140.96	0.47
Ca²⁺ [mg/l]	33.6	672	167.33	106.71	0.64	43.2	348.8	139.36	77.89	0.56
Mg²⁺ [mg/l]	1.92	886.4	63.87	89.85	1.41	4.8	176.64	32.38	30.24	0.93
Na⁺ [mg/l]	46	2622	382.33	390.66	1.02	23	575	196.02	126.12	0.64

1.2. Sélection de la combinaison d'entrée

Tab.33 : Matrice de corrélation (Pearson) entre les variables

Variables	EC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
EC	1						
Cl⁻	0.941	1					
SO₄²⁻	0.474	0.409	1				
HCO₃⁻	0.500	0.407	0.216	1			
Ca²⁺	0.748	0.746	0.359	0.274	1		
Mg²⁺	0.465	0.464	0.296	0.331	0.250	1	
Na⁺	0.789	0.776	0.425	0.504	0.492	0.419	1

- Différentes combinaisons d'entrées utilisées dans la modélisation :

No.	Combinaison
01	Cl ⁻
02	Cl ⁻ & Na ⁺
03	Cl ⁻ , Na ⁺ & Ca ²⁺
04	Cl ⁻ , Na ⁺ , Ca ²⁺ & HCO ₃ ⁻
05	Cl ⁻ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ & SO ₄ ²⁻
06	Cl ⁻ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ & Mg ²⁺

1.3. Normalisation des données

Une normalisation des données est réalisée dans le but d'approuver le bon choix des variables qui expliquent le phénomène la salinité et d'obtenir un petit nombre de combinaison linéaire entre les paramètres prenant en compte la plus grande fraction de la variabilité des données.

Du 0 à 1 (after Liu et al. 2015 ; Zhu et al. 2019)

$$x_{norm} = \frac{(x_i - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}$$

Où :

x_{norm} : Valeur de la variable normalisée.

x_i : Variable brute.

x_{min} et x_{max} : sont respectivement les valeurs minimale et maximale de l'ensemble de données d'origine.

2. Critères de performance du model

Dans cette recherche, nous avons créé un modèle pour prédire les variables totales de la salinité des eaux souterraines en fonction des différents saisons et des différents états de la qualité des eaux du lac Fetzara et de la nappe sous-jacente. Le réseau de neurones artificiels est utilisé pour estimer la relation entre les différentes variables. Les résultats de la prédiction montrent que l'approche du réseau neuronal a une bonne et large applicabilité pour la modélisation de la salinité des eaux de la région.

Les paramètres sont calculés par les équations suivantes :

2.1. Coefficient de determination (R^2):

$$R^2 = \frac{\sum(EC_{i_{obs}} - \overline{EC}_{obs}) * (EC_{i_{pred}} - \overline{EC}_{pred})}{\left(\sqrt{\sum(EC_{i_{obs}} - \overline{EC}_{obs})^2 * \sum(EC_{i_{pred}} - \overline{EC}_{pred})^2}\right)^2}$$

2.2. Efficacité de Nash-Sutcliffe (NS):

$$NS = 1 - \frac{\sum(EC_{i_{pred}} - EC_{i_{obs}})^2}{\sum(EC_{i_{obs}} - \overline{EC}_{obs})^2}$$

2.3. L'erreur quadratique moyenne (RMSE): Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (EC_{i_{pred}} - EC_{i_{obs}})^2}{N}}$$

2.4. L'erreur absolue moyenne (MAE): Mean Absolute Error

$$MAE = \frac{\sum |EC_{i_{obs}} - EC_{i_{pred}}|}{N}$$

Où :

$EC_{i_{obs}}$ et $EC_{i_{pred}}$: sont la conductivité électrique observée et simulée ;

\overline{EC}_{obs} et \overline{EC}_{pred} : sont la moyenne de la conductivité électrique observée et simulée ;

N : est le nombre total d'observations.

Algorithmes d'apprentissage

La performance du réseau artificiel a été évaluée afin de déterminer quel algorithme serait le plus efficace pour prédire la salinité des eaux souterraine de la région parmi les algorithmes suivants :

- BFGS: quasi-Newton backpropagation (Broyden 1970; Fletcher 1970; Goldfarb 1970; Shanno 1970).
- SCG: Scaled Conjugate Gradient backpropagation.
- OSS : One Step Secant backpropagation.

3. Résultats et discussion

La figure 55 présente le calage de conductivité simulée par les algorithmes BFGS, SCG et OSS avec la conductivité observée par ANN05, tandis que la figure 56 présente le calage des valeurs de conductivité simulée par les algorithmes BFGS, SCG et OSS et celles de la conductivité observée par ANN06 pour chaque point d'eau dans la phase de validation. Le graphique d'erreur indique le constate de la valeur CE observée avec la valeur CE simulée dans la phase de l'apprentissage (figure 57). Rappelons que R^2 : est une mesure du taux d'explication de la réalité phénoménale par le modèle adopté.

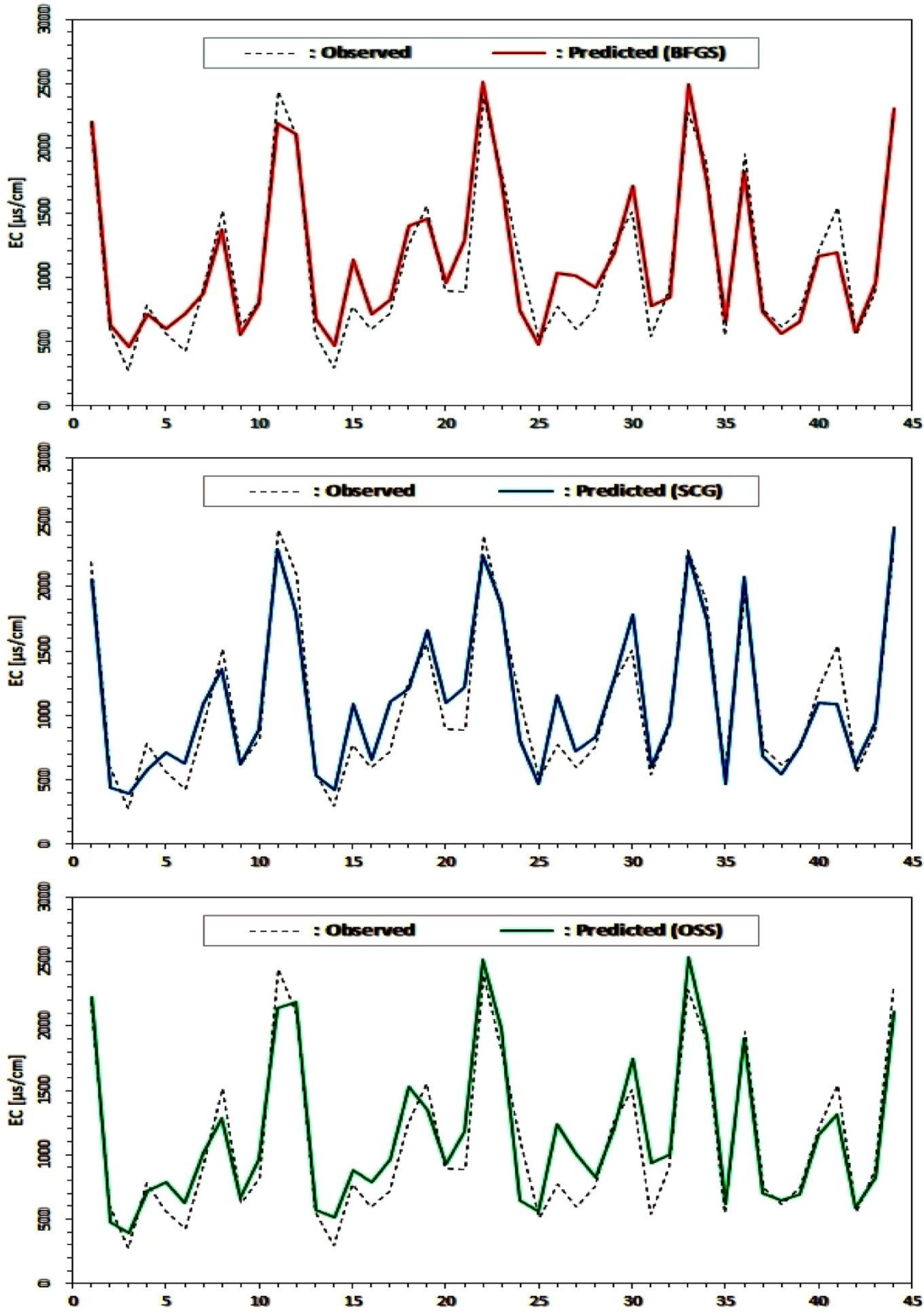


Fig.55 : évolution de la salinité observée et prédite " EC " selon les algorithmes BFGS, SCG et OSS utilisant ANN05 dans la phase de validation.

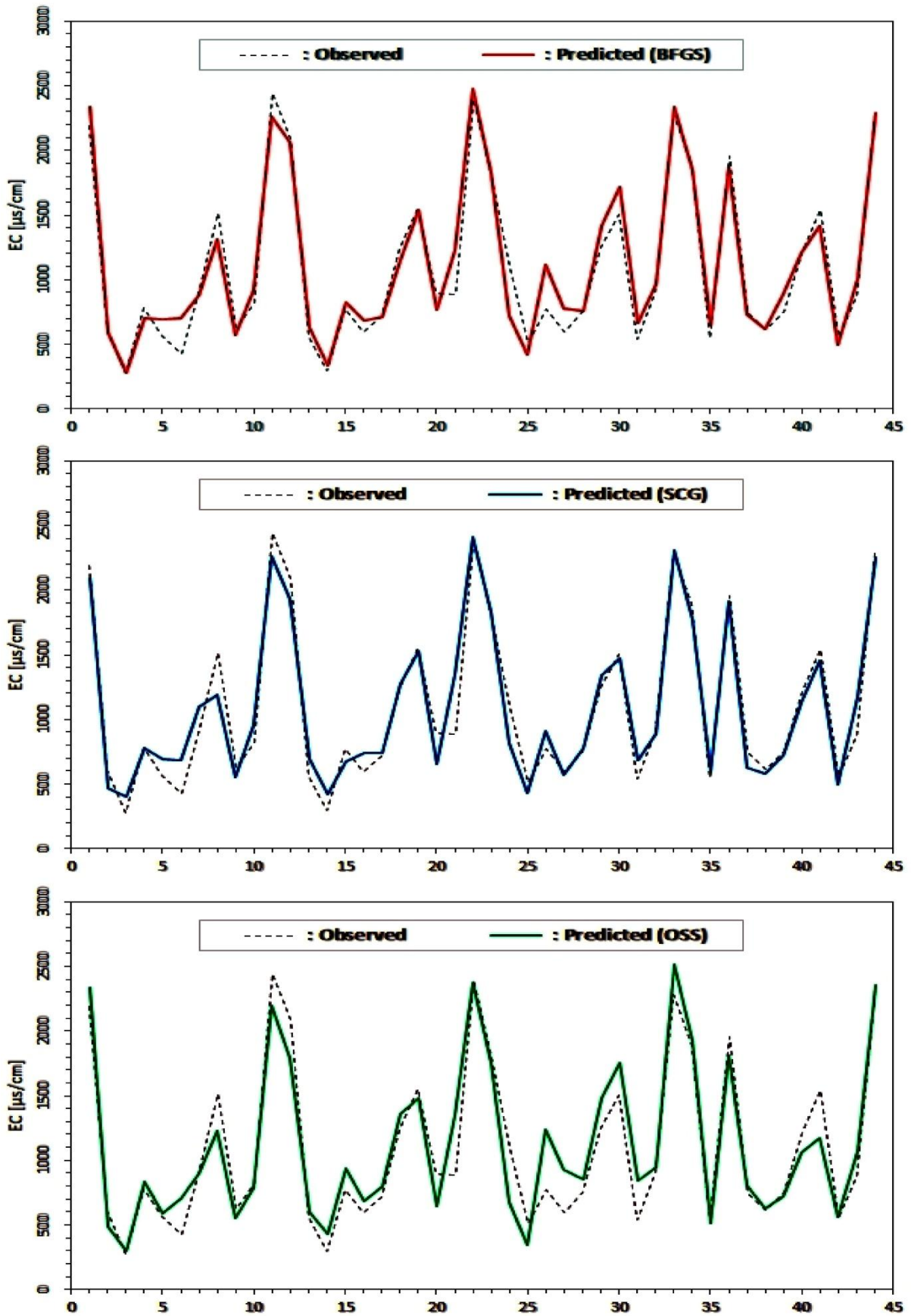


Fig.56 Salinité observée et prédite " EC " selon les algorithmes BFGS, SCG et OSS utilisant ANN06 (la phase de validation).

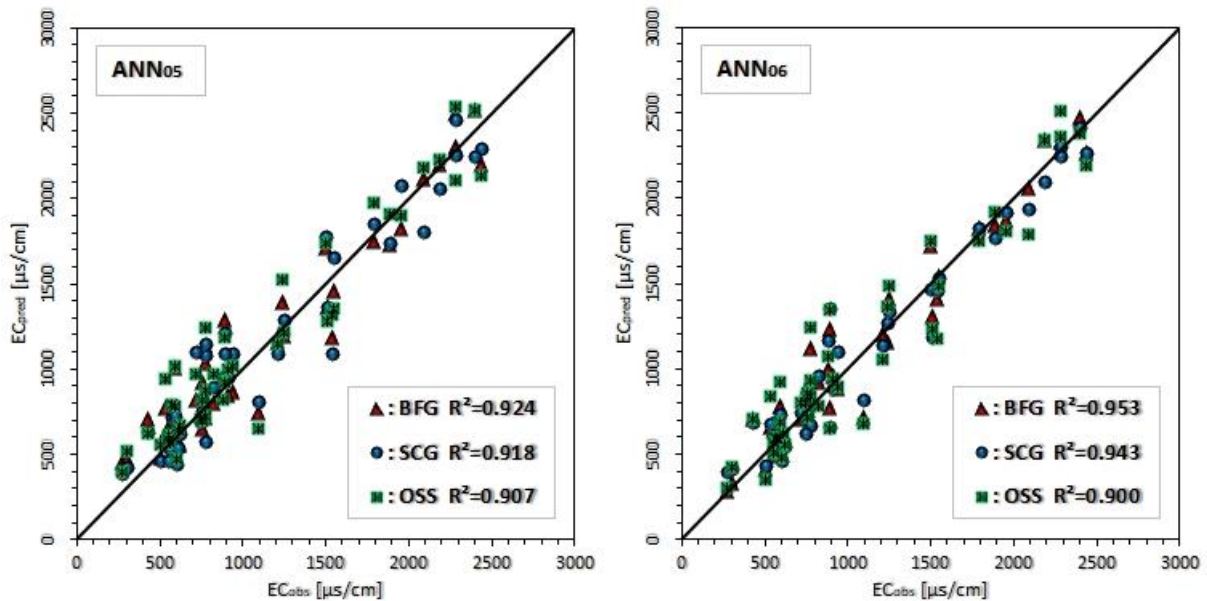


Fig.57 Salinité observée et prédite par les algorithmes BFGS, SCG et OSS utilisant les modèles ANN05 et ANN06 (la phase d'apprentissage).

La salinité simulée par rapport la salinité observée avec la meilleure amélioration des eaux de la région est présentée en ANN06. La performance du modèle est déterminée par l'alignement des nuages de point autour de la courbe (x=y)

Notons que R^2 (qui représente la variation de la valeur de la salinité calculée ou estimée par le modèle de la régression linéaire) est d'environ 0.9 pour le calage et la validation ce qui prouve que le modèle conserve les caractéristiques statistiques liées aux valeurs observées avec des coefficients de variation presque inchangés.

La comparaison entre les valeurs du modèle par ANN avec les données expérimentales révèle que le modèle MLP (BFGS) (fournit des valeurs : $R^2=0.99$, RMSE= 114.98 pour la partie test et $R^2=0.95$, RMSE=138.41 pour la validation) est le meilleur modèle.

4. Conclusion

La partie consacrée à l'étude de la qualité des eaux a été abordé avec le souci de mettre en évidence les paramètres à l'origine de la composition chimique des eaux. Nous avons constaté une variation importante de la conductivité, ce changement concerne les eaux de surface (lac et oueds) et les eaux souterraines particulièrement les puits domestiques

Les résultats révèlent que le modèle qui convient mieux pour modéliser la salinité des eaux souterraines dans une future étude est le MLP (BFGS), où le RMSE=114.98 et le coefficient de détermination $R^2=0,99$ pour la phase d'apprentissage, RMSE=138.41, $R^2=0,95$ pour la validation.

Conclusion Générale

En Algérie comme partout ailleurs la pérennité des zones humides se trouve aujourd'hui très menacée par les méfaits des changements climatiques. De ce fait de nombreux écosystèmes sont aujourd'hui menacés de disparitions. Généralement les lacs sont alimentés à partir des précipitations mais aussi par les Oueds ou les rivières et restent exposés à un manque d'eau. En plus, le manque de précipitations impacte directement la quantité et la qualité des eaux alimentant ces systèmes allant jusqu'à entraîner des pollutions pouvant entraîner une disparition de la faune et de la flore aquatiques connues dans ces zones lacustres. Notre travail a été réalisé sur le lac Fetzara, classé sur la liste RAMSAR, des zones humides d'importance internationale depuis 2003.

Depuis 2003, chaque année on dénombre autour de 17 000 oiseaux migrateurs représentant plus de 15 espèces différentes au cours de l'opération de dénombrement hivernal. Sur 15 000 oiseaux recensés sur le lac Fetzara, plus de la moitié, soit près de 8 000, sont des canards siffleurs et autour 2 000 oiseaux ont été comptés et 800 ont été considérés comme « Erismatures » à tête blanche, une espèce de petit canard à large bec plat et bleu protégée. Le Fetzara est alimenté par les précipitations et par les Oueds El Hout et El Mellah dont les eaux charriées se déversent dans le plan d'eau. A leur arrivée au lac les eaux changent de composition chimique à cause des interactions se produisant au contact des argiles (fond du lac). La sortie des eaux se fait par l'oued Meboudja, celui-ci constitue un canal de vidange du lac, au cours de la période pluvieuse les apports sont importants, le lac se trouve d'eau mais durant la période estivale les apports sont quasiment nuls de ce fait le lac se trouve presque à sec. Ce déséquilibre est dû au fait que les sorties se font durant toute l'année. En été le prolongement des sorties des eaux et l'évaporation intense, accélèrent la vidange du lac et l'accroissement de la minéralisation des eaux. Parmi les répercussions générées par cette situation on note le risque du manque d'eau au niveau du lac et surtout la pollution qui risque de faire disparaître toute forme de vie aquatique. Pour assurer la pérennité de l'écosystème, on doit garantir un minimum d'eau au niveau du lac et ceci pour toute l'année. La première décision à prendre est de limiter les sorties d'eau lac et ceci à partir du mois de février et n'augmenter le débit qu'occasionnellement en cas de fortes pluies. Le travail réalisé est une contribution à l'explication des origines de la salinité des eaux du lac Fetzara, ce qui conditionne l'utilisation des eaux transitant par le lac.

Conclusion générale

La première partie de ce travail, explique de manière détaillée les caractéristiques physiques de la zone d'étude et du lac. Nous avons constaté que les règles de la convention, sont souvent sous estimées voir oubliées par les populations riveraines du lac et les autorités locales qui n'accordent pas une attention particulière à la protection de cet écosystème. Souvent le lac devient un dépotoir d'ordures de tous genres, accentuant le risque de pollution anthropique qui est associé à la minéralisation induite par les facteurs géologiques et climatiques. En effet les eaux transitant par le lac, acquièrent une minéralisation excessive, cette dernière est due aux échanges qui se produisent entre l'eau et les roches traversées et aussi à l'impact de la matrice argileuse du lac.

Pour mettre en évidence l'impact des facteurs endogènes et exogènes sur les eaux du lac et des nappes avoisinantes, nous avons traité des chapitres suivants :

Le premier chapitre s'est focalisé sur l'identification et la description des formations géomorphologiques et géologiques qui se trouvent dans cette région de la wilaya d'Annaba. Il a été observé que dans la zone d'étude, on observe des formations métamorphiques abondantes en gneiss, mica et feldspath... Ces formations sont mêlées aux formations sédimentaires caractérisées par les argiles, des calcaires,... Les formations métamorphiques occupent le massif de l'Edough et son contre bas par contre les formations sédimentaires sont présentes dans le reste de la zone d'étude et surtout occupent le centre de la zone allant de Hadjar Diss jusqu'à la plaine d'Annaba. L'écoulement superficiel des eaux favorise le contact entre les formations géologiques et entraîne un échange entre l'eau et la roche conférant aux eaux une composition chimique hétéroclite, se traduisant parfois par des changements de faciès.

Le chapitre consacré à l'Hydroclimatologie, a été subdivisé en deux grandes parties, la première consacrée au climat et la seconde à l'hydrologie. Le climat par ses changements périodiques influence directement la qualité des eaux superficielles car les échanges se font rapidement. Notons que la zone d'étude jouie d'un climat dit méditerranéen, avec une pluviométrie avoisinant les 600 mm/an. Ce climat se caractérise par l'alternance de deux saisons, la première humide et dure environ sept à huit mois, se seconde d'une saison dite sèche et dure le reste de l'année. Au cours de cette dernière le taux d'évapotranspiration est très élevé, de ce qui accentue le manque d'eau au niveau du lac et au cours de cette période les Oueds sont à secs.

Conclusion générale

Les bilans hydrologiques calculés, indiquent un déficit, caractérisé par une faiblesse de l'infiltration et un accroissement relatif du ruissellement.

L'alimentation du lac reste tributaire des apports qui se font par les oueds El Hout, El Mellah et Zied, les jaugeages réalisés montrent que les débits charriés peuvent atteindre plus de 1 m³/s, particulièrement au cours des mois pluvieux (décembre, janvier, février, mars, avril et mai). Notons, qu'au niveau de la sortie des eaux le débit est de plus 3 m³/s, conduisant souvent à l'assèchement du lac. Ceci se traduit par des apports considérables au lac et aux nappes environnantes causants des changements de la qualité de leurs eaux.

L'aperçu hydrogéologique réalisé a montré la présence d'une succession de nappes, ces dernières peuvent être superficielles ou profondes avec une relation de cause à effet avec le lac. La cartographie piézométrique réalisée en parfaite symbiose avec les précédentes cartes réalisées par d'autres chercheurs et à différents niveaux (Nouar et Rouabhia en 1994, r Zenati (1999, 2010), MT Debieche (2002), S Habes (2005, 2011) et F Zahi (2007)). Les cartes mettent en évidence une relation mixte entre la nappe superficielle et le lac. L'alimentation du lac se fait de deux manières :

-l'alimentation par les monts de l'Edough, cette alimentation se fait par ruissellement des eaux se déversant directement dans le lac,

-l'alimentation souterraine se fait par la nappe de Berrahal, confirmée par les travaux réalisés sur la région par H.Khelfaoui (2008). Notons que ces relations s'accroissent en période pluvieuse, expliquant ainsi l'accroissement ou la baisse de la minéralisation.

Le chapitre traitant de la qualité des eaux a été consacré à l'étude de la variation de la qualité des eaux et ses origines. Après avoir donné un aperçu sur la variation de la conductivité électrique des eaux superficielles au niveau des quatre Oued (Meboudja, El Hout, El Mellah et Zied) et des eaux souterraines (puits domestiques). Pour avoir une idée sur la qualité des eaux une analyse en composantes principales (ACP), a été réalisée et a démontré une compétition entre les eaux fortement minéralisées et les eaux faiblement minéralisées. Cette compétition se fait au rythme des saisons. Il est à noter que le potassium se détache des autres éléments démontrant une origine différente des autres éléments dosés. Ainsi cet élément est lié aux apports issus de l'Edough alimentant la zone au cours de la période pluvieuse, ce qui enrichit les eaux en potassium cependant au court la période sèche les eaux changent de

composition chimique par le biais d'échange de base. Pour confirmer les résultats obtenus à partir de l'analyse en composantes principales (ACP), on a réalisé un diagramme de Piper, ce dernier a fait ressortir plusieurs familles d'eau démontrant une hétérogénéité dans la composition chimique des eaux et par conséquent l'interférence de plusieurs éléments dans l'acquisition du chimisme observé. Cette répartition est également mise en évidence lors de l'élaboration des classes de qualité, ces dernières sont au nombre de six (6 familles), allant des eaux douces vers les eaux sévèrement salées avec un maximum d'échantillons indiquant un accroissement de la salinité des eaux. La minéralisation observée reste influencée par des facteurs endogènes ou et exogènes. Les facteurs exogènes sont les facteurs climatiques, leurs variations conduisent à l'accroissement ou à la baisse de la minéralisation. L'utilisation et l'observation du diagramme de Gibbs montre l'influence de l'évaporation sur la minéralisation des eaux. Le facteur endogène est la géologie locale, cette dernière agit sur la composition de l'eau. Les indices de saturation déterminés (l'anhydrite ($\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$), de l'aragonite (CaCO_3), de la calcédoine (SiO_2) de la dolomite $\text{MgCa}(\text{SO}_3)_2$ et de la sépiolite (MgSiO_2)), sont tous inférieurs à l'unité démontrant la contribution de la géologie dans l'acquisition de la minéralisation. Ces variations sont entraînées par l'hydrolyse qui se produit lors du ruissellement des eaux. Le modèle neuronal réalisé confirme le lien existant entre la composition chimique et la minéralisation, cette dernière est induite par le sodium Na^{2+} potassium k^+ , les chlorures Cl^- et le calcium Ca^{2+} , ce sont les éléments les plus importants à l'origine de la conductivité électrique.

Annexes

Annexe 01 : Précipitations annuelles (mm) et coefficients pluviométriques (C.P) des stations d'Ain Berda (1981-2013) et Pont Bouchet (1980-2021).

Année	Station d'Ain Berda (1981-2013)			Station de Pont Bouchet (1980-2021)		
	P (mm)	C.P		P (mm)	C.P	
80/81	/	/	/	46,39	0,846	Déficitaire
81/82	48,71	0,89	Déficitaire	55,45	1,01	Excédentaire
82/83	47,25	0,86	Déficitaire	50,52	0,92	Déficitaire
83/84	60,7	1,11	Excédentaire	63,15	1,15	Excédentaire
84/85	61,9	1,13	Excédentaire	72,55	1,32	Excédentaire
85/86	37,88	0,69	Déficitaire	36,09	0,65	Déficitaire
86/87	66,3	1,21	Excédentaire	61,45	1,12	Excédentaire
87/88	31,84	0,58	Déficitaire	29,67	0,54	Déficitaire
88/89	40,5	0,74	Déficitaire	40,65	0,74	Déficitaire
89/90	44,24	0,81	Déficitaire	41,29	0,75	Déficitaire
90/91	57,1	1,04	Excédentaire	55,53	1,01	Excédentaire
91/92	51,85	0,95	Déficitaire	60,67	1,1	Excédentaire
92/93	58,65	1,07	Excédentaire	53,2	0,97	Déficitaire
93/94	42	0,77	Déficitaire	40,69	0,74	Déficitaire
94/95	48,77	0,89	Déficitaire	50,46	0,92	Déficitaire
95/96	60,16	1,1	Excédentaire	60,62	1,1	Excédentaire
96/97	32,9	0,6	Déficitaire	31,89	0,58	Déficitaire
97/98	71,83	1,31	Excédentaire	70,59	1,28	Excédentaire
98/99	61,87	1,13	Excédentaire	55,86	1,01	Excédentaire
99/00	46,84	0,86	Déficitaire	39,26	0,71	Déficitaire
00/2001	49,96	0,91	Déficitaire	43,41	0,791	Déficitaire
2001/2002	40,65	0,74	Déficitaire	34,2	0,62	Déficitaire
2002/2003	81,08	1,48	Excédentaire	77,8	1,41	Excédentaire
2003/2004	71,57	1,31	Excédentaire	54	0,98	Déficitaire
2004/2005	70,24	1,29	Excédentaire	78,32	1,42	Excédentaire
2005/2006	48,18	0,88	Déficitaire	44,7	0,81	Déficitaire
2006/2007	49,34	0,9	Déficitaire	54,31	0,99	Déficitaire
2007/2008	44,033	0,8	Déficitaire	48,91	0,89	Déficitaire
2008/2009	74,04	1,36	Excédentaire	72,5	1,32	Excédentaire
2009/2010	56,7	1,04	Excédentaire	58,14	1,06	Excédentaire
2010/2011	64,63	1,18	Excédentaire	64,24	1,17	Excédentaire
2011/2012	61,89	1,13	Excédentaire	63,31	1,15	Excédentaire
2012/2013	58,29	1,07	Excédentaire	79,64	1,45	Excédentaire
2013/2014	/	/	/	53,41	0,97	Déficitaire
2014/2015	/	/	/	68,46	1,24	Excédentaire
2015/2016	/	/	/	48,68	0,88	Déficitaire
2016/2017	/	/	/	39,95	0,72	Déficitaire
2017/2018	/	/	/	55,96	1,07	Excédentaire
2018/2019	/	/	/	78,23	1,42	Excédentaire
2019/2020	/	/	/	51,45	0,93	Déficitaire
2020/2021	/	/	/	62,6	1,14	Excédentaire

Annexe 02 : Précipitations annuelles (mm) et coefficients pluviométriques (C.P) des stations de Station de Berrahal et station des Salines (1987-2017).

Année	Station de Berrahal (1987-2017)			Station des Salines (1987-2017)		
	P (mm)	C.P		P (mm)	C.P	
87/88	734	0,86	Déficitaire	615,2	0,94	Déficitaire
88/89	627	0,74	Déficitaire	536,8	0,82	Déficitaire
89/90	918	1,08	Excédentaire	654,8	1	Excédentaire
90/91	818	0,96	Déficitaire	666,4	1,01	Excédentaire
91/92	1033	1,22	Excédentaire	743,5	1,13	Excédentaire
92/93	672	0,79	Déficitaire	619,8	0,94	Déficitaire
93/94	738	0,87	Déficitaire	527,8	0,8	Déficitaire
94/95	774	0,91	Déficitaire	584,4	0,89	Déficitaire
95/96	975	1,15	Excédentaire	648,8	0,99	Déficitaire
96/97	961	1,13	Excédentaire	866,8	1,32	Excédentaire
97/98	863	1,02	Excédentaire	787,8	1,2	Excédentaire
98/99	899	1,06	Excédentaire	710,2	1,08	Excédentaire
99/00	574	0,67	Déficitaire	533,6	0,81	Déficitaire
00/2001	703	0,83	Déficitaire	470	0,71	Déficitaire
2001/2002	862	1,01	Excédentaire	700	1,07	Excédentaire
2002/2003	1256	1,48	Excédentaire	707,2	1,08	Excédentaire
2003/2004	1075	1,27	Excédentaire	877,7	1,34	Excédentaire
2004/2005	926	1,09	Excédentaire	804,5	1,23	Excédentaire
2005/2006	855	1,01	Excédentaire	647	0,98	Déficitaire
2006/2007	819	0,96	Déficitaire	450,9	0,68	Déficitaire
2007/2008	570	0,67	Déficitaire	853,2	1,3	Excédentaire
2008/2009	1091	1,29	Excédentaire	627	0,95	Déficitaire
2009/2010	836	0,98	Déficitaire	672	1,02	Excédentaire
2010/2011	946	1,11	Excédentaire	609,4	0,93	Déficitaire
2011/2012	748	0,88	Déficitaire	604,1	0,92	Déficitaire
2012/2013	933	1,1	Excédentaire	609,5	0,93	Déficitaire
2013/2014	827	0,97	Déficitaire	811,1	1,24	Excédentaire
2014/2015	860	1,01	Excédentaire	558,6	0,85	Déficitaire
2015/2016	716	0,84	Déficitaire	459,3	0,7	Déficitaire
2016/2017	749	0,88	Déficitaire	653,79	1	Excédentaire

Bibliographie

Références bibliographiques

Aissa, D.E. 1985 ; Etude géologique et métallogénique du massif de l'Edough. Thèse Doctorat troisième cycle, USTHB, Alger.

Aissa, D.E., Cheilletz, A., Marignac, C., Feraud, G., Gasquet, D., Ruffet, G. 1994 ; Confirmation par datation $40\text{ Ar} / 39\text{ Ar}$ de l'âge burdigallien de la distension dans le massif d'Edough, NE Algérie. Conséquences métallogénique. 15ème RST, Abstr., Nancy, Soc. Géol. Fr. Ed.

Aissa, D.E., Marignac, CH., Cheilletz, A., Gasquet, D. 1995 ; Les minéralisations S-W du massif de l'Edough. Datations et implications pour l'âge de l'extension crustale burdigallienne. 10ème Sém. Nat. Sciences de la Terre, Alger.

AJCI, 1985 ; Etude de la faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara. Agence Japonaise de Coopération Internationale (AJCI), Vol. 3.

A.N.R.H ; Agence Nationale des Ressources Hydriques d'Annaba.

Aoun-Sebaiti B., 2010 ; Gestion optimisée des ressources en eau d'une nappe côtière. Application à la plaine d'Annaba (Nord-Est Algérien). Thèse de doctorat. Université de Lille Sciences et Technologie.

Belhamra A., 2001 ; Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire de Magister, option : Biologie et physiologie des organismes Marins. Université d'Annaba.

Benchaiib A., 2021 ; Utilisation d'une approche multicritère pour l'analyse de l'eau dans le golf d'Annaba. Thèse de doctorat, département de géologie, université d'Annaba.

(B.N.E.D.E.R), 1980 ; Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural Etude d'inventaire des terres et forêts de l'Algérie du Nord, Wilaya d'Annaba. Rapport par wilaya.

Bouhlassa S, et al., 2008 ; Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin versant de Rheris (Errachidia, Maroc). Sécheresse, n° 1, vol19, 67-75.

Bouillin J.P., 1979 ; La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie) : une région clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Mémoire de la Société Géologique de France.

Brunel M., Hammor D., Misseri M., Gleizes G & Bouloton J., 1988 ; Cisaillements synmétamorphes avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallin de l'Edough (Wilaya de Annaba, Algérie) : Une faille normale ductile hercynienne, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 306, série II.

Cohen C.R., 1980; Plate tectonic model for the Oligo-Miocene evolution of the western Mediterranean. Tectonophysics.

Debieche T.H., 2002 ; Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat, Université Franche-Comté, France,

Derradji F., Kherici H & Caruba R., 2005. Etude de la drainance dans un système de nappes superposées. Exemple de la nappe d'Annaba (Nord-Est d'Algérie). La Houille Blanche, N°1.

DGF., 2003 ; Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Lac de Fetzara, Wilaya d'Annaba, Direction Générale des Forêts (DGF).

Djabri L (1996) : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Th Doct. ès.Sciences, Univ. Annaba, 261p.

Djabri L., Hani A., Mania J., Mudry J., (2000) ; Conséquences des pratiques agricoles sur la qualité des eaux du bassin de la Seybouse (Est algérien). Colloque international ESRA'2000, Poitiers, France S4.

Durand Delga, M 1969 ; Mise au point sur la structure Nord-Est de la Berbèrie. Bull. serv. Carte géologique Algérie, n° 39

FEKRACHE Fadila, 2014 ; Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba (Algérie), thèse de doctorat, université d'Annaba.

G. Millot, G. Bocquier, R. Boulet, A. Chauvel, J.C. Leprun, D. Nahon, H. Paquet, G. Pedro, P. Rognon, A. Ruellan, Y. Tardy, Géochimie de la surface, pédogenèse, aplanissements et formes du relief dans les pays méditerranéens et tropicaux, In «Phénomènes de transport de matière dans l'écorce terrestre», ATPCNRS, Sciences géologiques,

Gaud B., 1976. Etude hydrogéologique du système aquifère d'Annaba – Bouteldja (Synthèse des connaissances et Recherches des conditions de modélisation) Rapport de l'ANRH. Algérie.

Gleizes G., Bouloton J., Bossiere G & Collomb P., 1988 ; Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris.

Habes S. ; 2006. Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara « Est algérien ». Mémoire de Magister, Département de Géologie, Université d'Annaba.

Habes S. et Djabri L, 2010 ; Impact des oueds sur la qualité des eaux d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; Cas du Lac Fetzara N.E. Algérien. Revue des Régions Arides, Numéro Spécial- 24(2/2010). Institut des Régions Arides. Médenine, Djerba, Tunisie.

Habes S., 2013 ; Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; Cas : Lac Fetzara Nord - Est Algérien. Thèse de doctorat, département de géologie, université d'Annaba.

Hammor D & Lancelot J., 1998 ; Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-est de l'Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 327.

Hani A., 2003. Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen, Thèse de Doctorat d'état en Géologie appliquée, spécialité : Hydrogéologie, université d'Annaba, Algérie.

Hilly J ; 1962. Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de fer, Publ. Du Serv. De la carte Géologique. Algérie, Bull. n°19, 408 p. Alger.

Idder A et al. ; 2007 ; Compartimentation et accumulation estivale des sels neutres dans les aridisols sableux nus de la cuvette d'Ouargla (Sahara algérien) ; Lebanese Science Journal, Vol. 15, No. 1, 2014

Ifagraria., 1967. Etude générale de la mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba. Société Ifagraria, Rome, Partie I.

Ilavsky J & Snopkova P., 1987 ; Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 305(série II).

J. Lange, C. Leibundgut, et al., 1999 ; A noncalibrated rainfall-runoff model for large, arid catchments; water resources research, Volume35, Issue7, July 1999, Pages 2161-2172

Jeleaud L., 1936 ; Etude géologique de Bône (Annaba)- la calle (El Kala). Bulletin du Service Géologique de l'Algérie (2), N°12, Algérie.

Kadi A. 1997 ; La gestion de l'eau en Algérie. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, April 1997

Khalfaoui H. 2007 ; Impact des rejets industriels sur les eaux souterraines : Cas de la région de Berrahal (Algérie). Mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie.

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 de doctorat en sciences. Université d'Annaba, Algérie.

Kherici N., 1985. Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (Nord Est algérien). Thèse de doctorat. USTL, Montpellier, France.

Kherici N., (1993) ; Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba la Mafragh (Nord-Est algérien)). Thèse de doctorat Es-sciences, université d'Annaba.

Laouar R., Boyce A.J., Ahmed-said Y., Ouabadi A., Fallick A.E & Toubal A., 2002 ; Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, North-East Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 35 (2).

Laouar R., Boyce A.J., Arafa M., Ouadabi A et Fallick A.E., 2005 ; Petrological, geochemical, and stable isotope constraints on the genesis of the Miocene igneous rocks of Chetaibianf Cap de Fer (N-E Algeria). *Journal of African Earth Sciences* Vol. 41.

Larouche, L., Bossiere, G., Conquere, F. 1978 ; Le socle et les roches ultrabasique du massif de l'Edough. Comparaison avec une série charno-ckitique éburnéenne de l'Ahaggar central, Algérie. 6° RAST, Orsay.

Marignac, C. Et Zimmermann, J.L. 1983 ; Ages K-Ar de l'évènement hydrothermal et des instructions associés dans le district minéralisé miocène d'Ain Barbar, Est Constantinois. *Mineral. Deposita*.

Marignac C., 1985 ; Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord. Thèse de Doctorat d'Etat (2 tomes), I.N.P. Lorraine, Nancy, France.

Maury R.C., Fourcade S., Coulon C., El Azzaoui M., Bellon H., Coutelle A., Ouabadi A., Semroud B., Megastri M., Cotton M., Belanteur O., Louni-Hacini A., Piqué A., Capdevila R., Hernandez J et Réhault J.P., (2000) ; Post-collisional neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin a consequence of slabbreakoff. *Comptes rendus de l'académie des sciences*, Paris.

Mitch, W.J. and Gosselink, J.G. (1986); *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold Co., New York. Thickness, Distribution and Quality Assessment of Gopalganj-Madaripur Peat Deposits: A Case Study of Potential Economic Opportunities in Mid-Eastern Low-Lying Bangladesh; *International Journal of Geosciences*, Vol.5 No.9, August 21, 2014

Mitsch, W.J. and Gosselink J.G. (2007); Persistence of herpetofauna in the urbanized rouge river ecosystem ; *Wetlands*. 4th Edition, *Open Journal of Ecology*, Vol.3 No.3, July 18, 2013

Monie P., Montigny R & Maluski H., 1992. Age Burdigallien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylie, Algérie). Données radiométriques ³⁹As-⁴⁰Ar. *Bulletin de la Société Géologique de France*, N°5.

Nafâa K., 1985 ; Nappes superposées en région côtière, hydrodynamique et hydrochimie (aquifère d'Annaba) Nord-Est algérien. Thèse de docteur ingénieur. USTL, Montpellier, France.

Rouabhia AK. Et al. 2010. Evolution de la salinité de l'aquifère alluviale de la plaine entourant le lac Fetzara Annaba Algérie. *Journal Arabian journal geosciences*.

SAIFOUNI A. (2021) ; Les zones humides en Algérie : Proposition d'une nouvelle classification, inventaire national et typologie. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), El-Harrach, Alger.

Schoeller H., 1955. Hydrogéologie. Institut français du pétrole. Ecole Nationale Supérieure.

Sonarem, 1974 ; Travaux d'exploitation sur les minéralisations ferrières du Sud du massif de l'Edough. Rapport interne, inédit.

Strojexport, 1975 ; Prospection géophysique de la plaine d'Annaba. Réinterprétation. Rapport A.N.R.H., inédit, Annaba, Algérie.

Travers L., 1958 ; La mise en valeur du lac Fetzara. Annales de Géographie, tome 67, N°361.

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

Zahi F., Djamai R., Drouiche A. & Medjani F., 2011; Contribution to study of soil salinity in the region of Fetzara Lake (Northeast of Algeria). Journal of Materials and Environmental Science. Vol. 2 (S1).

Zahi F., Djamai R., Chaab S., Djabri L., Drouiche A & Medjani F., 2012 ; Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Revue des Sciences et de la Technologie. Synthèse N°26, pp 86-95.

Zahi F., 2014 ; contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (Nord-Est Algérien). Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse de doctorat, département de géologie, université d'Annaba.

Zenati N., 2010. Pollution de l'environnement aquatique : diagnostic et proposition « Région de Annaba ». Thèse de Doctorat en géologie appliquée, Université d'Annaba, Algérie.

Zenati N. & Messadi D., 2010. Utilisation de la géostatistique dans l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque d'une nappe superficielle à un polluant par infiltration verticale. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, Annaba, Algérie. Communication Science & technologie N° 8.