

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلقايد- تلمسان
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM
كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de l'Univers
Département Sciences de la Terre et de l'Univers.



MÉMOIRE

Présenté par
BELGUERNA Abd El Hakim et BENZAIM Smail

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie.

Thème

Contribution à l'identification de l'origine de la minéralisation
des eaux de la source d'Ain El Fouara
(Tlemcen, Ouest algérien).

Soutenu le **03 juillet 2022**, devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------|----------------------------------|-------|-----------------------|
| Président | Mr CHIKH. Mourad | M.A.A | Université de Tlemcen |
| Encadrant | M ^{me} GUETTAIA Sabrine | M.C.A | Université de Tlemcen |
| Co-Encadrant | Mr BOUDJEMA Abderrezak | M.C.A | Université de Tlemcen |
| Examinatrice | M ^{me} KERZABI Somia | M.C.B | Université de Tlemcen |

Année universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

L'élaboration de ce mémoire est le fruit des années d'études. Ce travail n'aurait pu voir le jour, sans la collaboration de nombreuses personnes qu'il nous est agréable de les remercier.

Nous remercions « Allah » le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'études.

Nous exprimons notre sincère gratitude à Mme. GUETTAIA.S et à Mr. BOUDJEMA.A de nous avoir fait confiance, ainsi que pour leur disponibilité, leur patience et leurs généreux conseils, tant scientifiques qu'humains qui ont été d'une grande valeur. Merci pour votre aide inestimable, vos précieux conseils avisés ont été très utiles pour améliorer et développer notre esprit critique et scientifique.

C'est un honneur pour nous de voir dans notre jury : Monsieur CHIKH.M et Madame KERZABI YOUSFI .S qu'ils soient vivement remerciés.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de Tlemcen.

Et enfin, nous tenons à remercier tous nos amis (es) qui nous ont aidé et encouragé pour réaliser ce mémoire.

DEDICACES

-À mes parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les Sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

-À mes chers et adorables frères,

-À ma chère femme

-À mes bijoux Assia et Moad (Lilya, Mohammed Fatah, Djana)

-À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses, à mes chers cousins et cousines.

L'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

-À mon Binôme : BenzaimSmail (Belguerna Abdelhakim).

--À tous mes amis et mes camarades d'hydrogéologie.

-À toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail, à tous ceux que j'ai omis de citer.

ملخص

المساهمة في تحديد أصل تعدين مياه منبع عين الفوارة (TLEMEN ، غرب الجزائر)

للتعرف على عملية التمدن وأصلها ، تمت دراسة منبع عين الفوارة العليا الواقعة على هضبة لالة ستي و ذلك بتحليل العناصر الفيزيائية والكيميائية لمياهها.

التحليل الفيزيائية والكيميائية أظهرت أن مياه منبع عين الفوارة العليا تتوافق مع المعايير الجزائرية للشرب باستثناء النترات والبوتاسيوم التي تجاوزت المعايير المحددة في بعض التواريخ. كما أظهر التحليل البكتريولوجي ، الذي أجري في 8 ديسمبر 2021 ، أن مياه النبع لا تحتوي على أي جراثيم.

سمح لنا تقرير العناصر الكيميائية في مخطط PIPER بتصنيف هذه المياه إلى وجهتين : بيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم (الأكثر انتشاراً) والكلوريد وكبريتات الكالسيوم و المغنيسيوم لفترات معينة.

أظهر تقدير المياه لأغراض الري ، باستخدام المؤشرات ، مثل النسبة المئوية لـ Na^+ و KR أنها جيدة جداً إلى جيدة وللري ، باستثناء فترات معينة كانت فيها مؤهلة نسبياً. (Na^+ %).

أظهر الرسم البياني RIVERSIDE أن مياه عين الفوارة صنفت إلى فئتين : C2-S1: بالنسبة لمعظم المياه (جيدة للري) ، C3-S1 لتواريخ معينة (مسموح بها للري). قسمت المياه إلى فئتين: ممتازة لغالبية النقاط وجيدة.

أظهر لنا تقرير العناصر الكيميائية على الرسم التخطيطي لـ PHREEQ C أن مؤشرات التشبع لجميع المعادن بشكل عام مفرطة التشبع في الأراجونيت والكالسيت والدولوميت ، مما يشير إلى قوة انحلال هذه المياه بتكوينات الكلسية. كما سمحت لنا الدراسة الإحصائية بفهم أصل تمدن مياه عين الفوارة العليا بسبب انحلال تكوينات البيكربونات في العصر الجوراسي الأعلى وتسرب مياه الري ومياه الصرف.

الكلمات المفتاحية: المنبع - عين الفوارة العليا - تلمسان - التحليلات الفيزيائية والكيميائية - المواصفات الجزائرية لمياه الشرب - الري - الرسوم البيانية - التمدن - PHREEQ C.

CONTRIBUTION A L'IDENTIFICATION DE L'ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX DE LA SOURCE D'AIN FOUARA SUPERIEURE (TLEMCCEN, OUEST ALGERIEN).

RESUME

Pour identifier le processus de minéralisation et son origine, la source d'Ain Fouara supérieure, située au plateau de Lalla Setti a été étudiée pour analyser les paramètres physico-chimiques de ses eaux.

Les analyses physico-chimiques que nous disposons ont montré que les eaux de la source d'Ain El Fouara supérieure étaient conformes aux normes algériennes de potabilité à l'exception des nitrates et du potassium qui ont dépassé les normes prescrites dans quelques dates. L'analyse bactériologique, faite le 8 décembre 2021, a montré que les eaux de la source ne renferment aucun germe pathogène.

Le report des éléments chimiques sur le diagramme de PIPER nous a permis de classer ces eaux en deux faciès : bicarbonaté calcique et magnésien (le plus dominant) , chloruré sulfaté calcique et magnésien, pour certaines périodes.

L'estimation des eaux à des fins d'irrigation, en utilisant des indices, comme le pourcentage en Na^+ et le KR a fait révéler qu'elles sont très bonnes à bonnes et pour l'irrigation, mis à part quelques périodes où elles étaient admissibles ($\% \text{Na}^+$).

Le diagramme de RIVERSIDE a montré que les eaux de la source d'Ain Fouara étaient classées dans deux classes : C2-S1 : pour la plupart des eaux (Bonnes pour l'irrigation), C3-S1 : pour certaines dates (admissibles pour l'irrigation). Selon WILCOX, les eaux de la source étaient réparties en deux classes : Excellente pour la majorité des points et bonne.

Le report des éléments chimiques sur le diagramme de PHREEQ C, nous a montré que les indices de saturation pour les tous les minéraux sont généralement sur- saturés en aragonite, calcite et en dolomie, indiquant le pouvoir de dissolution de ces eaux aux formations carbonatées. L'étude statistique nous a permis de comprendre l'origine de la minéralisation des eaux d'Ain El Fouara supérieure qui est due à la dissolution des formations bicarbonatées du Jurassique supérieur, des infiltrations des eaux d'irrigation et celles des eaux usées.

Mots Clés : Source- Ain El Fouara supérieure- Tlemccen- Analyses physico-chimiques- normes algériennes de potabilité- Irrigation- Diagrammes- Minéralisation- PHREEQ C.

CONTRIBUTION TO THE IDENTIFICATION OF THE ORIGIN OF MINERALIZATION OF THE WATERS OF THE SUPERIOR SOURCE OF AIN EL FOUARA (TLEMCEN- WEST ALGERIA).

ABSTRACT

In order to identify the mineralization process and its origin, the Superior source of Ain El Fouara, located at the Lalla Setti plate, was studied to analyze the physico-chemical parameters of its waters.

The physico-chemical analyses that we have available, have shown that the waters of the Superior source of Ain Fouara were in compliance with the Algerian standards of potability, except for nitrates and potassium, which exceeded the prescribed standards in some dates. The bacteriological analysis, carried out on December 8th 2021, showed that the source water does not contain any pathogenic germs.

The chemical elements report on the PIPER diagram allowed us to classify these waters in two faces: calcic bicarbonate and magnesium (the most dominant), chloride calcic sulphate and magnesium, for some periods.

The estimation of water for irrigation purposes, using indices such as the percentage of Na^+ and KR revealed that they are very suitable to suitable and for the irrigation, except for some periods where they were admissible ($\% \text{Na}^+$).

The RIVERSIDE diagram showed that the waters of Ain El Fouara source were classified in two classes: C2-S1: for most of the waters (good for irrigation), C3-S1: for some dates (admissible for irrigation). According to WILCOX, the source waters were divided into two classes: Excellent for the majority of the points and good.

The chemical elements report on the PHREEQ C diagram, showed us that the indices of saturation for all the minerals are generally over-saturated in the aragonite, calcite and dolomite, indicating the dissolution power of these waters to carbonate formations. The statistical study allowed us to understand the origin of the waters mineralization of Ain El Fouara superior, which is due to the bicarbonate formations dissolution of superior Jurassic, the water seepage of irrigation and wastewater.

Keywords: Source - Superior Ain El Fouara - Tlemcen – Physicochemical analysis - Algerian standards of potability - Irrigation - Diagrams - Mineralization - PHREEQ C.

ISTE DES ABREVIATIONS

P : Précipitations.
T : Température.
AEP : Alimentation en eau potable.
IRR: irrigation.
BI : Balance Ionique.
Meq/l : Milliéquivalent par litre.
r : quantité en réaction.
pH : potentiel Hydrogène.
CE: Conductivité électrique.
TH: dureté totale.
RS : Résidu Sec.
Ca⁺² : Ion Calcium.
Mg⁺² : Ion Magnésium.
Na⁺ : Ion Sodium.
K⁺: Ion potassium.
HCO₃⁻: Ion Bicarbonate.
Cl⁻ : Ion Chlorure.
SO₄: Ion sulfate.
NO₃⁻: Ion Nitrate.
C.M.A : Concentration Maximale Admissible.
Kr : Indice de Kelly's Ratio.
Na% : Pourcentage en sodium.
SAR : Sodium Adsorption Ratio.
A.C.P. : Analyse en Composante Principale.
CAH: Classification Ascendante Hiérarchique
F1 : Facteur 1.
F2 : Facteur 2.
F3 : Facteur 3.
A.D.E. : Algérienne Des Eaux.
A.N.R.H. : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Liste Des Figures

| | |
|---|-----|
| Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Tlemcen..... | 03 |
| Figure I.2: Localisation de la source d'Ain El FOUARA supérieure..... | 04 |
| Figure I.3: Variations des précipitations moyennes annuelles à la station de Tlemcen(1995-2020)..... | 06 |
| Figure I.4: Histogramme des variations des précipitations moyennes mensuelles ST de Tlemcen (1995-2020)..... | 07 |
| Figure I.5: Histogramme des précipitations saisonnières de la station de Tlemcen..... | 08 |
| Figure I.6: Variations des températures moyennes, minimales et maximales à la station de Tlemcen..... | 09 |
| Figure I.7: Histogramme des Températures moyennes mensuelles..... | 09 |
| Figure I.8: Diagramme pluvio-thermique de la station de Tlemcen..... | 10 |
| Figure I.9: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne..... | 11 |
| Figure II. 1: Log litho-stratigraphique synthétique de la région étudiée (Benest et al.1999) (Benest.M, 1985) | 17 |
| Figure II. 2 : Extrait de la carte géologique de Tlemcen au 1/50000 (Doumergue, 1922) | 18. |
| Figure II. 3 : Schéma structural de l'avant pays tellien, entre Saida et la frontière Igéromarocaine | 20 |
| Figure III.1 : Histogramme du pH..... | 27 |
| Figure III.2 : Histogramme de la conductivité..... | 28 |
| Figure III.3 : Histogramme des résidus secs..... | 28 |
| Figure III.4 : Histogramme du Calcium..... | 29 |
| Figure III.5 : Histogramme de Magnésium..... | 29 |
| Figure III.6 : Histogramme de Sodium..... | 30 |
| Figure III.7 : Histogramme de potassium..... | 30 |
| Figure III.8 : Histogramme des Bicarbonates..... | 31 |
| Figure III.9 : Histogrammes des Chlorures..... | 31 |
| Figure III.10 : Histogramme des Sulfates..... | 32 |
| Figure III.11 : Histogramme des nitrates..... | 33 |
| Fig. III 12.1 : Diagramme de Piper AIN FOUARA de 01 à 40..... | 35 |
| Fig. III 12.1 : Diagramme de Piper AIN FOUARA de 01 à 40..... | 36 |
| Fig. III 12.2 : Diagramme de Piper AIN FOUARA de 40 à 80..... | 37 |
| Figure III.13.1 : Diagramme de Stabler. | 38 |
| Figure III.13.2 : Diagramme de Stabler..... | 39 |
| Figure III.13.3 : Diagramme de Stabler..... | 40 |
| Figure III.13.4 : Diagramme de Stabler..... | 41 |
| Figure III.14 : Diagramme de Wilcox..... | 43 |
| Figure III.15 : Diagramme de Riverside..... | 44 |
| Fig.III.16. Classification hiérarchique des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées.... | 47 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1: Caractéristiques de la station climatologique de Tlemcen/ANRH..... | 05 |
| Tableau. I.2 : Précipitations moyennes annuelles/ station de Tlemcen (1995- 2020)..... | 05 |
| Tableau I. 3 : Précipitations moyennes mensuelles / station de Tlemcen (1995-2020)..... | 06 |
| Tableau I.4 : Précipitations saisonnières..... | 07 |
| Tableau I.5: Températures moyennes, maximales et minimales..... | 08 |
| Tableau. I.6: Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station deTlemcen (1995-2020)..... | 10 |
| Tableau I.7 : Résultats des indices d’aridité mensuels de DE Martonne..... | 12 |
| Tableau III.1 : Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier J., 2009)..... | 27 |
| Tableau III.2 : Classification des eaux de la source d’Ain Fouara «SUP», selon les normes algériennes..... | 33 |
| Tableau III. 3 : Analyse microbiologique des échantillons d’eau (08/12/2021) par l’ADE..... | 34 |
| Tableau III.4 : Classification des eaux de la source d’Ain Fouara «SUP», selon le Diagramme de STABLER..... | 22 |
| Tableau III.5 : Classification des eaux selon l’indice de Kelly’s Ratio..... | 22 |
| Tableau III.6 : Classification des eaux d’irrigation, selon le pourcentage en sodium..... | 22 |
| Tableau III.7: Classification des eaux destinées à l’irrigation (Servant 1975)..... | 22 |
| Tableau III.8. Matrice de corrélation des différents paramètres de la qualité des eaux de la nappe. Valeurs en gras indiquant les forts coefficients de corrélations..... | 46 |
| Tableau.III.9. Analyse en composantes principales des variables..... | 46 |
| Tableau.III.10. Corrélations entre les variables et les facteurs..... | 47 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| Remerciements..... | I |
| Dédicace | ..II |
| ملخص..... | III |
| Résumé..... | IV |
| Abstract..... | V |
| Liste des Abréviations..... | VI |
| Liste des figures..... | VII |
| Liste des tableaux..... | VIII |
| Introduction générale | 01 |
| CHAPITRE I : SITUATION GEOGRAPHIQUE ET SYNTHESE CLIMATIQUE | |
| I.1.Situation géographique générale..... | 03 |
| I.1.1. Localisation de la zone d'étude | 04 |
| I.2 Cadre climatologique..... | 05 |
| I.2.2 L'étude des paramètres climatologiques..... | 05 |
| I.2.2.1 Précipitations et températures..... | 05 |
| A.Les précipitations | 05 |
| A.1 Précipitations moyennes annuelles..... | 05 |
| A.2 Précipitations moyennes mensuelles | 06 |
| A.3 Les précipitations saisonnières :..... | 07 |
| B. Températures | 08 |
| B.1 Les températures moyennes mensuelles..... | 08 |
| I.2.3 L'étude du climat..... | 09 |
| A.Méthodes graphiques (méthodes de visualisation) | 10 |
| A.1 Les courbes pluvio-thermiques | 10 |
| B.Indices climatiques | 12 |
| -B.1 Indice d'Aridité de DE Martonne | 11 |
| • Indice d'aridité annuel de De. Martonn..... | 11 |
| • Indice d'aridité mensuel de De. Martonne | 12 |
| I.3 Conclusion :..... | 12 |
| CHAPITRE II : CADRE GEOLOGIQUE ET SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE | |
| II.1.Introduction..... | 15 |
| II.2. SYNTHÈSE GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ÉTUDE..... | 14 |

| | |
|---|----|
| A. Cadre général..... | 14 |
| B.Lithostratigraphie | 14 |
| B.1. Le Trias..... | 14 |
| B.2. Le Lias et le Dogger..... | 14 |
| B.3. Les argiles de Saida..... | 14 |
| B.4. Les grès de Boumédiène..... | 15 |
| B.5. Les calcaires de Zarifet | 15 |
| B.6. Les dolomies de Tlemcen..... | 15 |
| B.7. Les calcaires de Stah | 15 |
| B.8. Les marno- calcaires de Raourai..... | 15 |
| B.9. Les calcaires de Lato..... | 16 |
| B.10. Les Dolomies de Terni..... | 16 |
| B.11. Les marno-calcaires d'Hariga..... | 16 |
| B.12. Marno-calcairesd'OueldMimoune | 16 |
| ❖ Le Crétacé | 16 |
| B.13 Le Tertiaire :..... | 16 |
| ❖ L'Eocène | 16 |
| ❖ Le Miocène | 17 |
| ○Inférieur | 17 |
| ○Moyen (Serravallien) | 17 |
| ○Supérieur (tortonien) | 17 |
| B.14. Le plio-quaternaire | 17 |
| C. Contexte structural..... | 18 |
| C.1 Généralités..... | 18 |
| C.2. Les phases tectoniques | 18 |
| C.1. Phases distensiveéocrétacé | 19 |
| C.2. Phases atlasique | 19 |
| C.2.3 Une phase à dominance distensive | 19 |
| C.2.4 Une phase récente Plio-Quaternaire..... | 19 |
| C.2.5 Déformations actuelles..... | 20 |
| II.3.Synthèse hydrogéologique..... | 20 |
| A. Les formations du Jurassique supérieur | 21 |
| B. Les formations du Crétacé | 21 |
| C. Les formations du Mio-Plio-Quaternaire | 21 |

| | |
|--|----|
| II.3.1. Propriétés hydrogéologiques des formations | 21 |
| II.3-1.1. Les formations à forte capacité de rétention souterraine | 21 |
| II.3-1.2. Les formations calcaires du Jurassique | 21 |
| II.3-1.3. Les dolomies de Tlemcen..... | 22 |
| II.3-1.4. Les dolomies de Terni | 22 |
| II.3-2. Les formations à capacité de rétention souterraine faible à très faible..... | 22 |
| A. Les conglomérats du Miocène inférieur | 22 |
| B. Les grès de Boumediène..... | 22 |
| C• Marno-calcaires de Raouraï, d'Hariga et de Lamoricière | 22 |
| D• Grès de Merchiche..... | 22 |
| Conclusion | 23 |

CHAPITRE III : CADRE HYDROGEOCHIMIQUE

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 26 |
| 2. Balance ionique | 26 |
| 3. Etudes des paramètres physico-chimiques | 26 |
| 3.1. Les paramètres physiques..... | 26 |
| a. Potentiel d'hydrogène (pH) | 27 |
| b. La conductivité | 27 |
| c. Résidu sec | 28 |
| 3.2. Paramètres chimiques | 29 |
| A. Les cations..... | 29 |
| A.1 L'ion calcium | 29 |
| A.2 L'ion magnésium | 29 |
| A.3 L'ion sodium | 30 |
| A.4 L'ion potassium | 30 |
| B. Les anions | 31 |
| B.1 L'ion bicarbonate..... | 31 |
| B.2 L'ion chlorure..... | 31 |
| B.3 L'ion sulfate..... | 49 |
| B.4 L'ion nitrate | 32 |
| 4. Récapitulation des interprétations des analyses physico-chimiques..... | 33 |
| 5- Classification des eaux selon les analyses microbiologiques..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Faciès Hydrochimiques | 34 |
| A. Représentation graphique selon PIPER..... | 35 -37 |
| B. Diagramme de Stabler..... | 38 - 41 |
| 7 Aptitude des eaux destinées à l'irrigation | 42 |
| a. Indice de Kelly's Ration (Kr) | 42 |
| b.- Classification des eaux d'irrigation, selon le pourcentage en sodium | 42 |
| c. Diagramme de WILCOS..... | 43 |
| d. Sodium Alcalinity Ratio "SAR" | 44 |
| 8. Analyse statistique | 45 |
| 8.1 Matrice de corrélation | 45 |
| 8.2 Analyse en composantes principales des variables | 46 |
| 8.3 Classification ascendante hiérarchique (CAH)..... | 47 |
| 9. CONCLUSION | 48 |
| CONCLUSION GENERALE | 49 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 51 |
| Liste Des Figures | |
| ANNEXES. | |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les pays méditerranéens sont confrontés à de graves problèmes d'eau en termes de quantité et de qualité (Benoit et Comeau, 2005). En Algérie, la disponibilité de l'eau est devenue une préoccupation majeure, en raison de la pénurie de cette substance utile.

La région de Tlemcen a connu une croissance économique majeure avec un grand développement des activités agricoles et industrielles, associés à une forte augmentation de la population. Par conséquent, la demande en eau a fortement augmenté en ces quatre décennies.

Tlemcen est caractérisée par sa richesse en eaux souterraines et de surfaces, par sa géologie complexe et diversifiée qui a donné la faveur au jaillissement de plusieurs sources.

La présente étude, basée essentiellement sur l'hydrogéochimie des eaux de la source d'Ain El Fouara supérieure est menée dans le but de déterminer et de comprendre les processus de minéralisation de ses eaux.

Elle s'étale en trois parties:

✓ **Cadre Géographique et synthèse climatologique:**

- Situation géographique et présentation de la zone étudiée.
- Détermination du type du climat qui caractérise la zone d'étude ainsi que les variations des paramètres climatologiques.

✓ **Cadre Géologique et synthèse Hydrogéologique:**

- Description des différentes formations géologiques et analyse structurale.
- Identification des formations géologiques qui peuvent être aquifères.

✓ **Cadre Hydrogéochimique:**

Détermination de la qualité physico-chimique des eaux de la source, leurs faciès, leurs potabilité selon les normes algériennes dans la période d'étude, leurs aptitudes pour l'irrigation ainsi que l'origine de leur minéralisation.

✓ **Conclusion Générale.**

Chapitre I : Situation géographique et synthèse climatologique

I.1. la situation géographique générale

La wilaya de Tlemcen, limitrophe au Maroc, occupe la zone occidentale de l'Oranie. Elle correspond au vaste bassin de l'Oued Tafna. La diversité du relief explique la vocation de cette région, zone de passage entre le Maroc et l'Oranie, entre la Méditerranée et le Sahara. Elle est située sur le littoral nord-ouest du pays et dispose d'une façade maritime de 120 km (Wikipédia).

La wilaya de Tlemcen s'étend sur une superficie de 9017.69 Km² avec une population de l'ordre de 101 habitants/Km² (Recensement Général de la Population et de l'Habitat /RGPH 2013).

Elle est limitée géographiquement(Fig01) :

- Au Nord, par la mer Méditerranée.
- Au Nord-Est, par la wilaya d'AïnTémouchent.
- A l'Est, par la wilaya de Sidi Bel -Abbès.
- A l'Ouest, par la frontière algéro-marocaine.
- Au Sud, par la wilaya de Naâma.

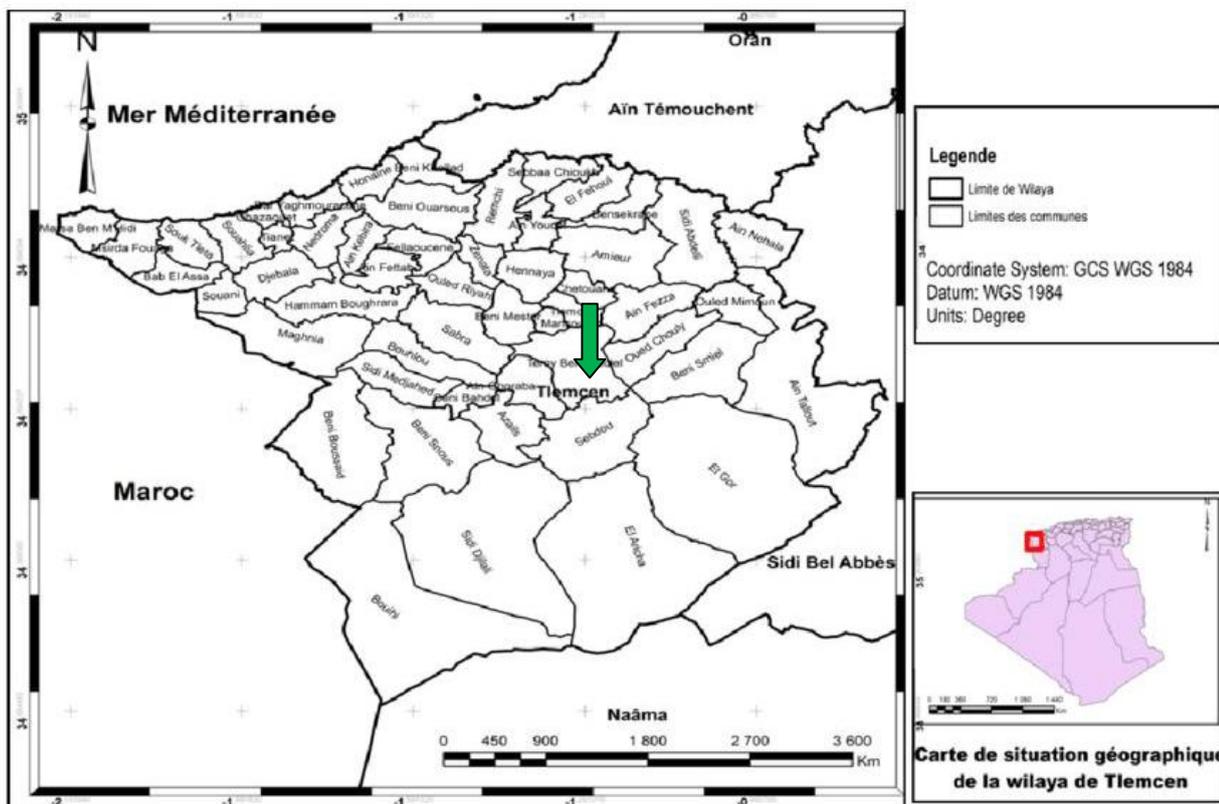


Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Tlemcen.

I.1.1. Localisation de la zone d'étude :

La Source d'Ain El Fouara supérieure est située au Nord du plateau de Lalla Setti (Figure 2), anciennement captée, elle est une source d'alimentation en eau potable de la ville de Tlemcen .Aujourd'hui, elle est exploitée et distribuée par l'ADE, avec une productivité de 6400 m³/jour (ADE, avril 2022).

Elle a pour coordonnées:

$$X = 34^{\circ} 51' 56''$$

$$Y = 1^{\circ} 18' 32''$$

$$Z = 1000 \text{ m.}$$

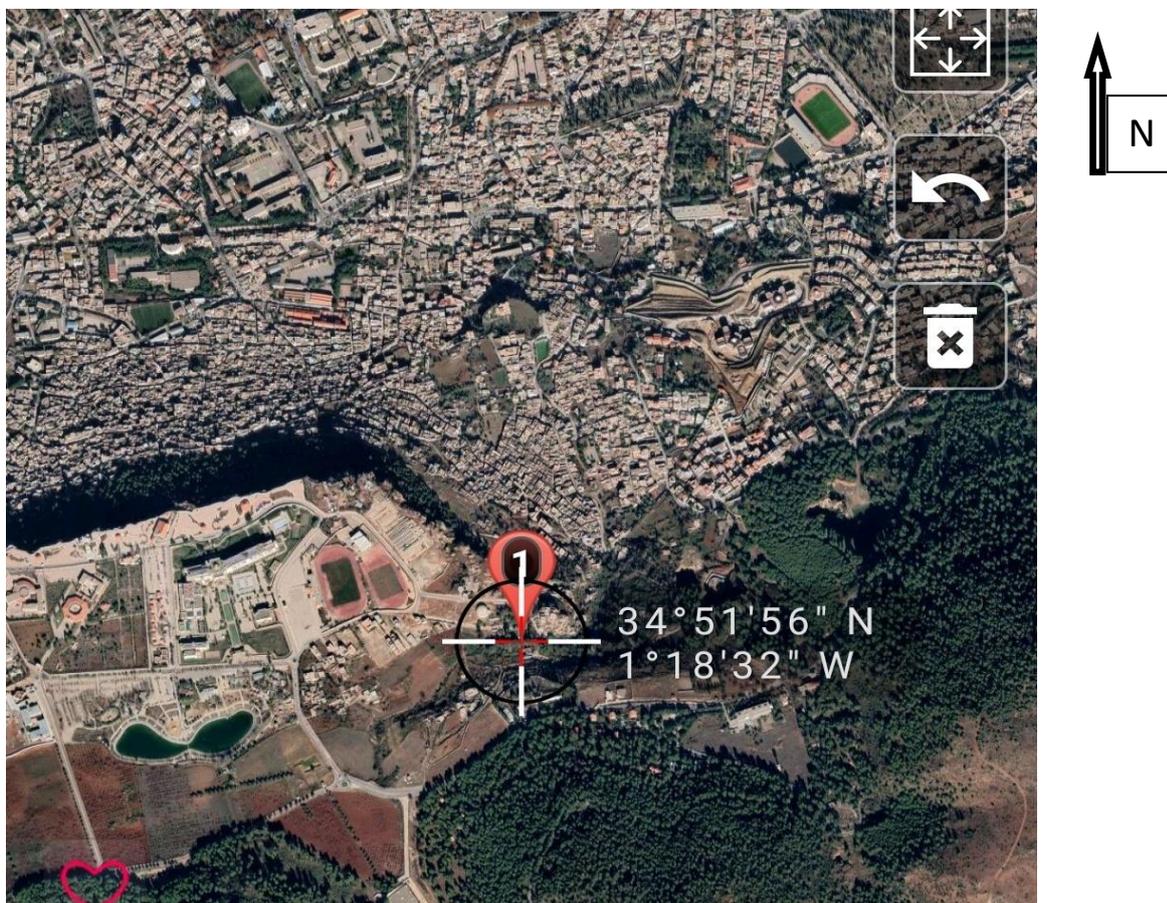


Fig02 : Localisation de la source d'Ain El Fouara supérieure. (Photos satellite)

I.2 Cadre climatologique

La région de Tlemcen se trouve entre deux domaines géographiques contrastés :

Les Monts de Tlemcen au Sud et la zone des plaines qui s'étendent vers le Nord.

L'objectif de cette partie est la détermination du type du climat régnant dans la région d'étude. Nous avons utilisé les données climatiques enregistrées à la station de Tlemcen sur la période qui s'étend de 1995 à 2020.

Tableau I.1:Caractéristiques de la station climatologique de Tlemcen/ANRH.

| Station | Altitude (m) | Latitude | longitude |
|------------------|--------------|----------|-----------|
| Tlemcen /A.N.R.H | 832 | 34°52' N | 01°19' W |

I.2.2 L'étude des paramètres climatologiques :

I.2.2.1 Précipitations et températures.

A. Les précipitations :

Le mot précipitations désigne tout ce qui provient de l'atmosphère sous forme d'eau liquide ou solide ; on parle de toutes les particules d'eau (gouttelette, gouttes, neige, grêle, etc.) qu'on trouve dans l'atmosphère.

A.1 Précipitations moyennes annuelles :

Tableau. I.2 : Précipitations moyennes annuelles/ station de Tlemcen (1995-2020).

| Années | P (mm) | Années | P (mm) |
|-----------|--------|-----------|--------|
| 1995-1996 | 660.2 | 2008-2009 | 817.3 |
| 1996-1997 | 409.7 | 2009-2010 | 605.9 |
| 1997-1998 | 528.2 | 2010-2011 | 584.7 |
| 1998-1999 | 474.5 | 2011-2012 | 492 |
| 1999-2000 | 338.5 | 2012-2013 | 902.4 |
| 2000-2001 | 465.1 | 2013-2014 | 658.6 |
| 2001-2002 | 577.6 | 2014-2015 | 565.6 |
| 2002-2003 | 546.3 | 2015-2016 | 561.4 |
| 2003-2004 | 642.3 | 2016-2017 | 545.1 |
| 2004-2005 | 376 | 2017-2018 | 310.4 |
| 2005-2006 | 485.8 | 2018-2019 | 283 |
| 2006-2007 | 403.8 | 2019-2020 | 314.2 |
| 2007-2008 | 376.3 | | |

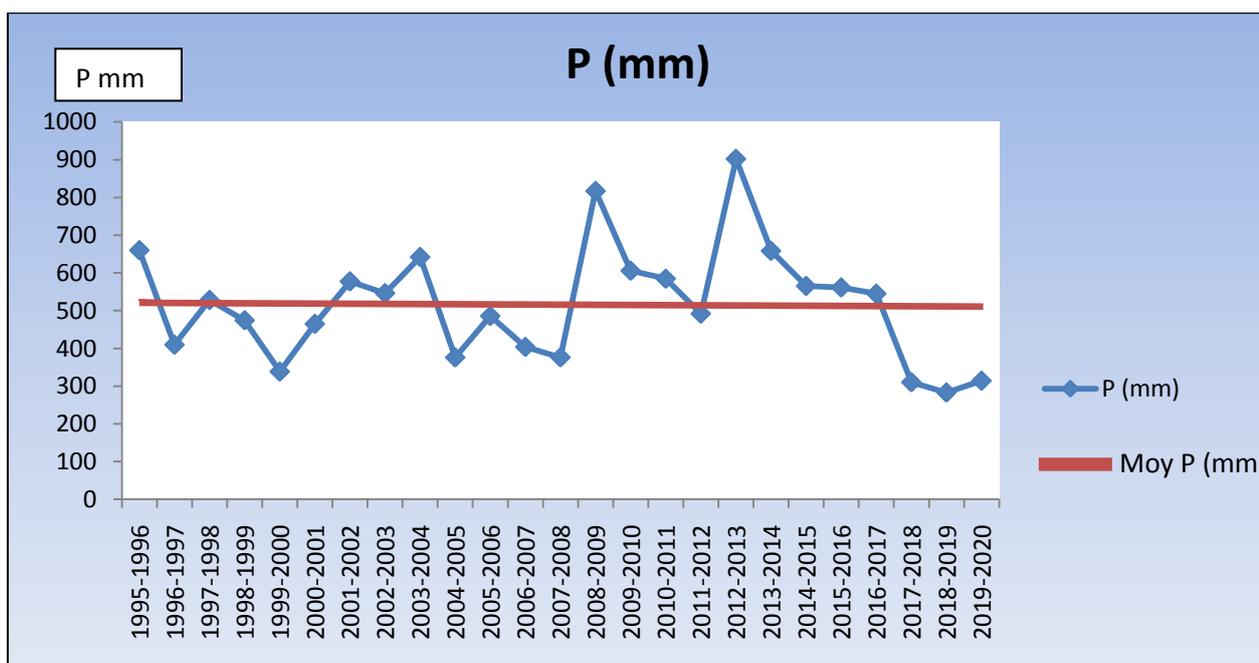


Figure I.3: Variations des précipitations moyennes annuelles à la station de Tlemcen (1995-2020).

Les variations inter- annuelles des précipitations montrent que :

- Les précipitations maximales sont enregistrées en **2012-2013** avec **902,4** mm.
- Les précipitations minimales sont enregistrées en **2018-2019** avec **283** mm.
- La moyenne annuelle des précipitations est égale à **517**mm.

A.2 Précipitations moyennes mensuelles :

Tableau I. 3 : Précipitations moyennes mensuelles / station de Tlemcen (1995-2020).

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | Jt | A | Total |
|--------|----|----|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-------|
| P (mm) | 27 | 49 | 72,4 | 66,4 | 74,3 | 61,1 | 53,2 | 55,9 | 42,1 | 7,1 | 2,6 | 5,8 | 517 |

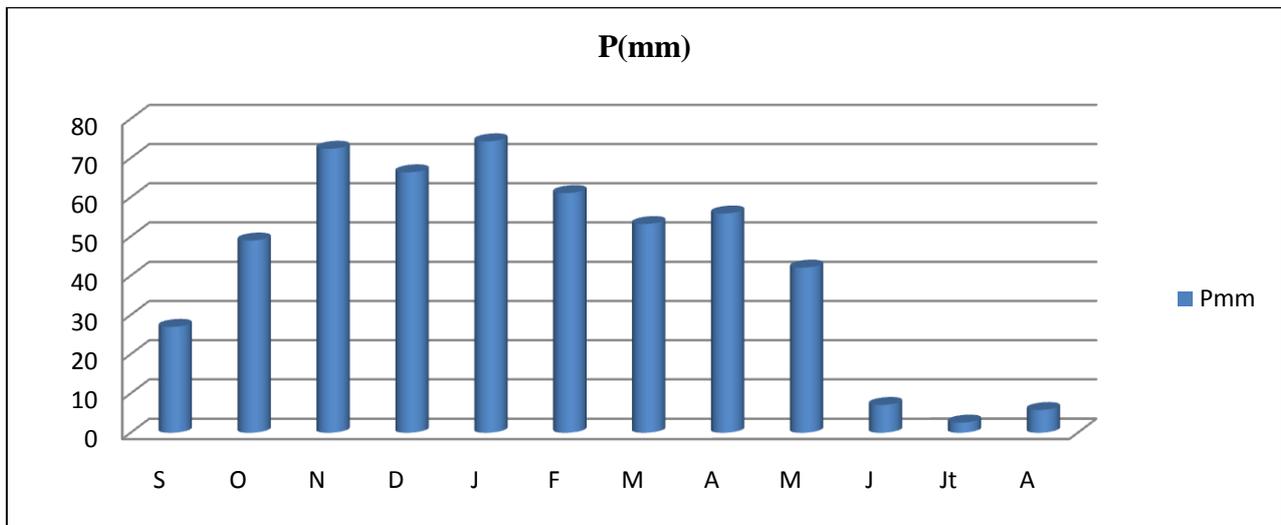


Figure I.4: Histogramme des variations des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (1995-2020).

D’après la figure N°02, nous remarquons que le mois de janvier est le plus humide avec 74,3mm et le mois de juillet est le plus sec, avec de 2,6mm.

A.3 Les précipitations saisonnières :

Correspondent aux quatre saisons de l’année :

- ✓ Automne : Septembre, Octobre, Novembre ;
- ✓ Hiver : Décembre, Janvier, Février ;
- ✓ Printemps : Mars, Avril, Mai ;
- ✓ Été : Juin, Juillet, Août.

Tableau I.4 : Précipitations saisonnières.

| Saisons | Automne | Hiver | Printemps | Été |
|---------------------|---------|-------|-----------|------|
| Précipitations (mm) | 148,4 | 201,8 | 151,3 | 15,5 |

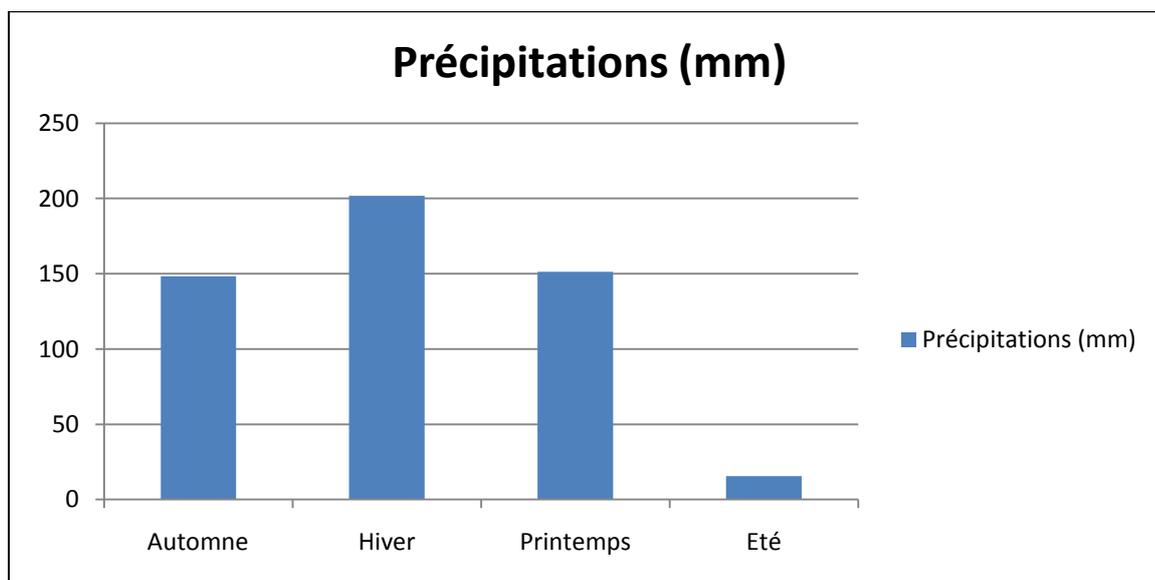


Figure I.5: Histogramme des précipitations saisonnières de la station de Tlemcen.

- L'histogramme des précipitations saisonnières nous indique que l'hiver est la saison la plus humide tandis que l'été est la saison la plus sèche.

B. Températures :

B.1 Les températures moyennes mensuelles :

Les valeurs des températures moyennes maximales et minimales de la station de Tlemcen sont données dans le tableau suivant :

Tableau I.5: Températures moyennes, maximales et minimales.

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | JT | A |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T max | 29,4 | 25,7 | 19,3 | 16,3 | 15,5 | 16,3 | 18,9 | 21,2 | 24,3 | 29,7 | 33,2 | 33,5 |
| T min | 16,8 | 14 | 9,5 | 6,9 | 5,8 | 6,1 | 7,8 | 9,6 | 12,7 | 15,9 | 19,1 | 19,7 |
| T moy | 22,9 | 19,5 | 14,2 | 11,2 | 10,5 | 11,2 | 13,4 | 15,5 | 18,8 | 23,1 | 26,2 | 26,5 |

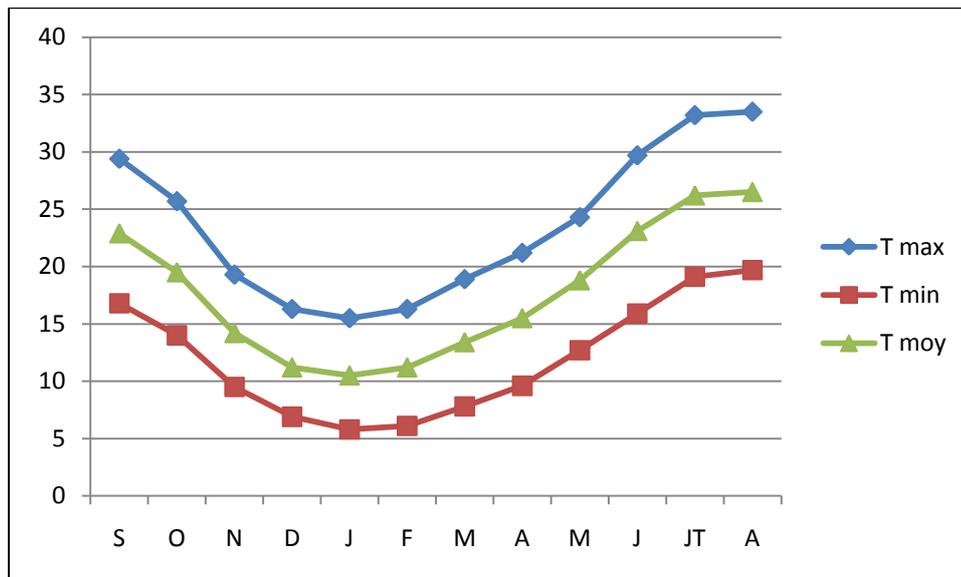


Figure I.6: Variations des températures moyennes, minimales et maximales à la station de Tlemcen.

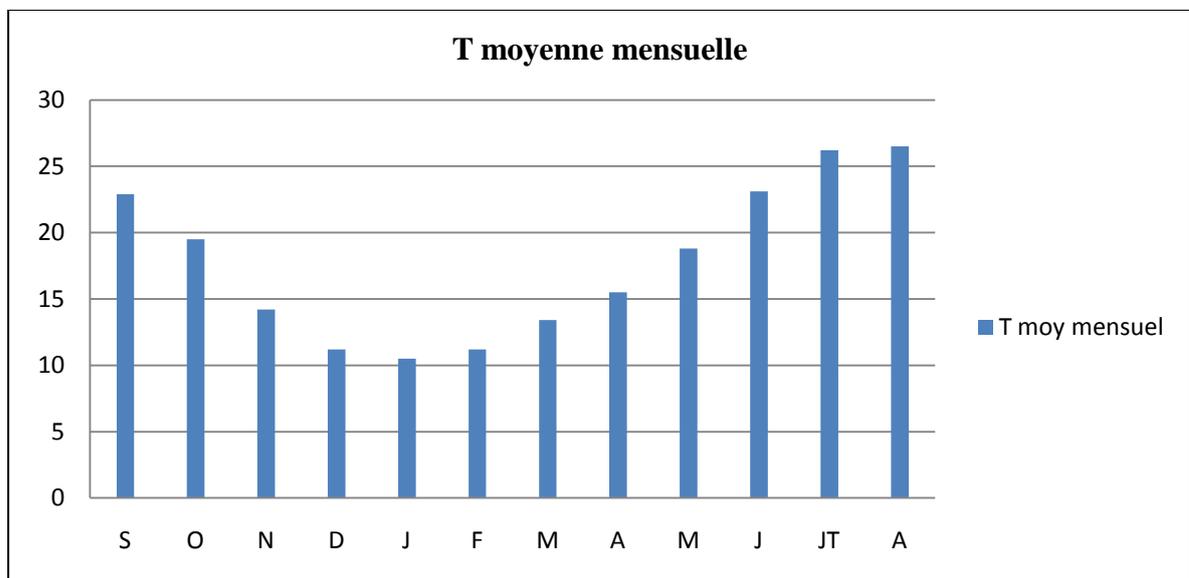


Figure I.7: Histogramme des Températures moyennes mensuelles.

Nous avons remarqué que la température moyenne mensuelle atteint son maximum aux mois de Juillet-Août (26.2 et 26.5°C) où la température moyenne maximale est de 33.2 °C à 33.5°C. Son minimum est enregistré au mois de Janvier avec 10.5°C, correspondant à un minimum de 5.8°C.

I.2.3 L'étude du climat :

Cette étude est basée sur plusieurs indices et méthodes à partir des données météorologiques afin de déterminer le type du climat de notre région d'étude.

L'étude du climat peut être réalisée à partir :

- ❖ Des méthodes de visualisation, des périodes sèches et des périodes humides ;
- ❖ Calcul des indices climatiques annuels et mensuels, à partir des données climatiques.

A- Méthodes graphiques (méthodes de visualisation) :

A.1 Les courbes pluvio-thermiques :

Pour Gaussen et Bagnouls, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations exprimé en mm est égal au double de la température moyenne, exprimée en °C ($P = 2T$).

- La courbe des températures passe au dessus de celles des précipitations pendant les mois secs, alors que pour les mois humides, la courbe des précipitations passe au dessus de la courbe des températures.

Tableau. I.6: Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (1995-2020).

| Mois | S | O | N | D | J | F | Ms | A | M | J | Jt | At |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T moy | 22,9 | 19,5 | 14,2 | 11,2 | 10,5 | 11,2 | 13,4 | 15,5 | 18,8 | 23,1 | 26,2 | 26,5 |
| P (mm) | 27 | 49 | 72,4 | 66,4 | 74,3 | 61,1 | 53,2 | 55,9 | 42,1 | 7,1 | 2,6 | 5,8 |

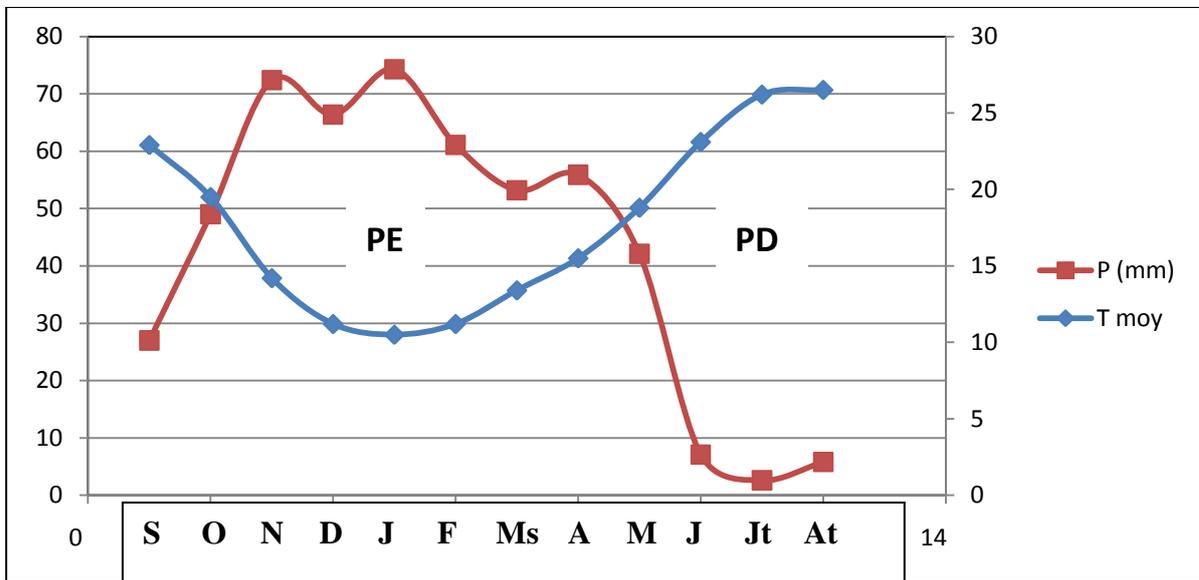


Figure I.8: Diagramme pluvio-thermique de la station de Tlemcen

La courbe Ombro-thermique de la station de Tlemcen montre que la région est caractérisée par deux périodes climatiques :

- Une période excédentaire : s'étend du début du mois de septembre jusqu'à la fin du mois de mai.
- Une période déficitaire : occupant les autres mois de l'année.

B- Les indices climatiques :

Nous avons utilisé les indices d'aridité de DE Martonne annuel et mensuels et l'indice de Moral.

-B.1 Indice d'aridité de DE Martonne :

En se basant sur la distribution des précipitations et des températures DE Martonne a proposé de classer les stations d'observation selon un indice d'aridité (I):

➤ **Indice d'aridité annuel :**

D'après DE Martonne, l'indice d'aridité annuel est défini comme suit :

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

Avec :

P : La moyenne des précipitations annuelles (mm).

T : La température moyenne annuelle (C°).

DE Martonne propose la classification suivante :

- 20 < I < 30climat tempéré.
- 10 < I < 20climat Semi-aride.
- 7.5 < I < 10 Climat steppique.
- 5 < I < 7.5 climat désertique.
- I < 5climat hyper -aride.

La valeur calculée de I est comprise entre 10 et 20 et selon l'abaque de DE Martonne.

Pour la région d'étude : P=517mm, T=17.8 C° donc IA=18,59 (type du climat : *semi-aride*).

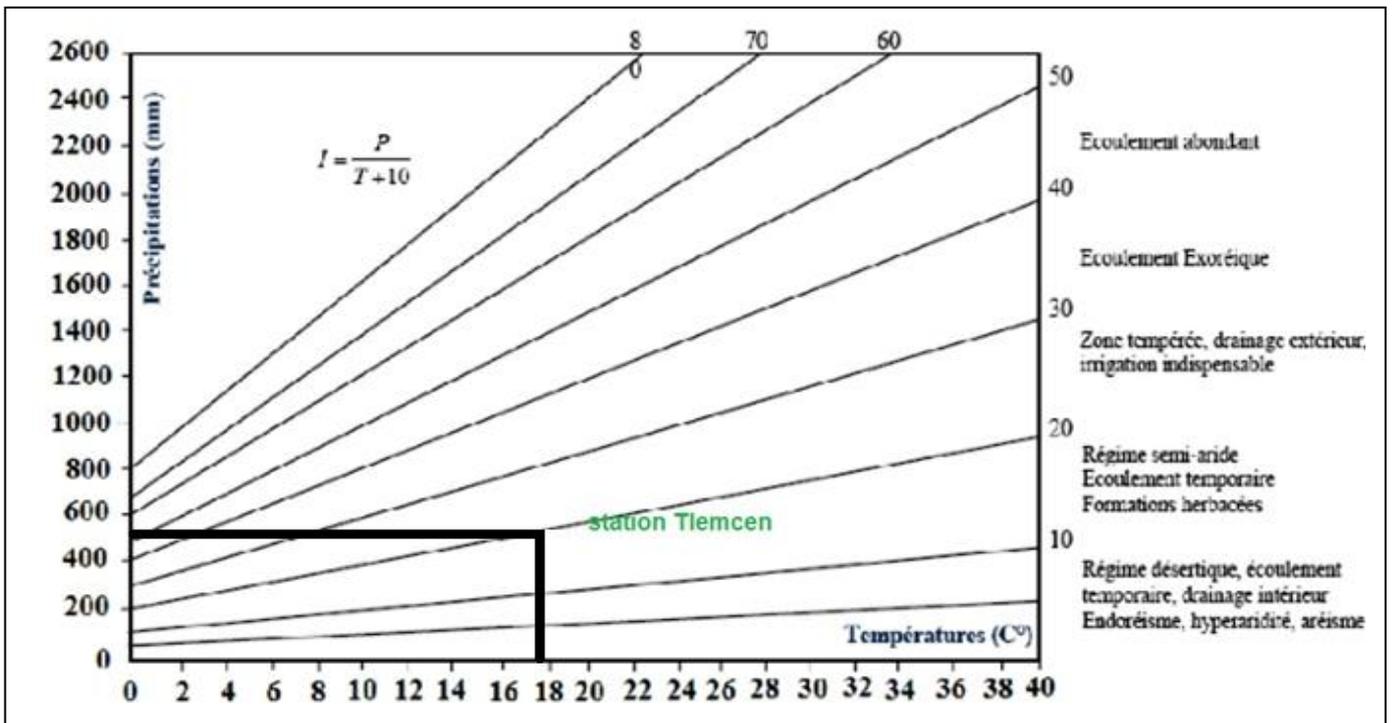


Figure I.9: Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne.

➤ **Indice d'aridité mensuel de DE Martonne :**

Cet indice est donné par la relation suivante :

$$I=12P/T+10$$

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm) ;

T : Température moyenne mensuelle (°C).

Tableau I.7 : Résultats des indices d'aridité mensuels de DE Martonne.

| Mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | JT | A |
|----------------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| I | 6.49 | 7.24 | 8.82 | 10.07 | 10.41 | 10.07 | 9.12 | 8.37 | 7.41 | 6.41 | 5.90 | 5.85 |
| Type du régime | D | D | ST | S | S | S | ST | ST | D | D | D | D |

Avec :

- S : Semi-aride
- D : Désertique.
- St : Steppique.

I.3 Conclusion :

D'après les résultats des calculs obtenus, nous constatons que la région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, avec un hiver relativement froid et pluvieux et un été chaud et sec. Les précipitations moyennes annuelles sont de 517mm .La température moyenne mensuelle est d'environ 17,8 °C. Les mois de Juillet et d'Août sont les plus chauds (26.2°C et 26.5°C), et Janvier est le mois le plus froid (10.5°C). Le diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussens, nous a permis de définir une période humide qui s'étale du début du mois de Septembre jusqu'à la fin du mois de Mai et une période sèche qui occupe le reste des mois de l'année.

**Chapitre II : Cadre géologique
Et
Synthèse hydrogéologique**

II.1 Introduction :

L'hydrogéologie est une discipline scientifique qui se base sur les connaissances de la géologie. Ces deux approches sont complémentaires:

- Une spécialisation de la géologie qui traite des propriétés des milieux portant notamment sur leur capacité à contenir et à laisser s'écouler l'eau souterraine. L'hydrogéologie est donc dans ce cas une discipline axée sur les milieux géologiques que l'on considère comme le contenant des eaux souterraines. Elle traite de l'eau souterraine en tenant compte des conditions géologiques.

II.2. SYNTHÈSE GEOLOGIQUE DU SECTEUR D'ÉTUDE

A. Cadre général

Les Monts de Tlemcen sont constitués essentiellement de formations d'âge Jurassique supérieur et Crétacé inférieur. Les calcaires et dolomies du Kimméridgien et du Tithonien forment plus de 80% des parties sommitales des plateaux. Au Sud et au Nord, ces formations sont masquées par une sédimentation tertiaire épaisse représentée par des dépôts fluviatiles éocènes sur le revers sud et par des marnes miocènes et des dépôts continentaux du Plio-Quaternaire au Nord.

B. Lithostratigraphie :

La description des formations est principalement inspirée des travaux de Benest M.(1978, 1985,1999).

B.1 Les grès de Boumédiène

Ce sont des grès blancs parfois bruns ferrugineux à la surface, durs avec des intercalations de bancs marneux multicolores. C'est une série épaisse comportant à son sommet des passages de bancs de calcaires bleus appelés calcaires de Zarifet. Cette formation a été attribuée au Lusitanien par Auclair et Biehler et a été replacée dans l'Oxfordien et le Kimméridgien par Benest (Benest, 1982 in Bensaoula.F, 2006).

B.2 Les calcaires de Zarifet

Les calcaires de Zarifet sont bien exposés dans le secteur de Tlemcen et de Terni.

Leur limite inférieure est placée au toit de la dernière assise gréseuse ou argileuse des grès de Boumédiène, c'est-à-dire à la base du premier banc carbonaté généralement dolomitisé. La limite supérieure a été fixée à l'apparition du 1er banc dolomitique des dolomies de Tlemcen. Elle ne correspond pas à une coupure synchrone à l'échelle régionale. En effet, la dolomitisation montre une extension verticale très variable selon les secteurs.

Dans la partie méridionale des Monts de Tlemcen, elle affecte la totalité des calcaires de Zarifet qui de ce fait ne peuvent être séparées des dolomies de Tlemcen. L'épaisseur des calcaires de Zarifet est sensiblement plus faible à l'Est qu'à l'Ouest de la transversale Tafna- Magoura : 90m au Djebel Eddiss et de 105 à 110m au Nif El Ogab (Bensaoula, F.2006).

B.3 Les Dolomies de Tlemcen

Les Dolomies de Tlemcen marquent les Monts de Tlemcen d'un style morphologique bien particulier. L'érosion a parfois donné naissance à des reliefs très pittoresques à aspect ruiniforme avec cheminées (Sud de Terni). La limite inférieure de la formation n'est pratiquement jamais synchronisée sur tout le territoire des Monts de Tlemcen. Il y a deux raisons à cela : La première est liée à la dolomitisation tectonique qui peut affecter partiellement ou totalement la formation sous jacente des calcaires de Zarifet. La seconde est en rapport avec des variations latérales de faciès qui ont induit préférentiellement la dolomitisation. En l'absence de données bio-stratigraphiques précises, la limite inférieure a été placée à la base des premiers niveaux dolomitiques riches en laminites stromatolitiques. Elle est rarement aussi tranchée au col de Zarifet. La limite supérieure plus nette en général correspond à la première passée marneuse peu indurée par laquelle débute les calcaires de Stah. Cette limite est imprécise, lorsque la dolomitisation affecte complètement les calcaires de Stah (Sidi Yahia Ben Sefia) (Bensaoula.F,2006).

B.4 Les calcaires de Stah

Ils ne sont différenciables des dolomies de Tlemcen que lorsqu'ils sont épargnés de la dolomitisation. Ils correspondent à des calcaires massifs à dominance micritique pratiquement dépourvus de passées marneuses. En revanche, dans d'autres secteurs cette formation admet des intercalations marneuses (Bensaoula .F,2006).

B.5 Les marno-calcaires de Raourai

*Au Nord de Tlemcen et à Ghar Roubane : dans l'ensemble, les marno-calcaires de Raourai ont une épaisseur assez constante. Dans la région du Kef, Beni Bahdel, Khémis, Sebdou, Terni et Tlemcen, les épaisseurs varient de 90 à 150 m.

* Dans la partie septentrionale des Monts de Tlemcen se manifeste un enrichissement de calcaire. Celui-ci est perceptible au Bled Gliaa à Ouled Mimoun avec une épaisseur de 115m. Le faciès devient plus calcaire à l'Ouest de Tlemcen et plus au Nord avec une diminution de l'épaisseur 75 m au Djebel Tefatisset à Tlemcen.

* Région méridionale des Monts de Tlemcen : la formation sous un faciès très marneux devient très épaisse (400m) dans le massif de Raourai et à un degré moindre au Djebel Ouargla (240 m) (Bensaoula.F, 2006).

B.6 Les calcaires du Lato

Avec une épaisseur d'environ 50 m en moyenne. Elle débute au-dessus du dernier niveau marneux des marno-calcaires de Raourai et se termine au sommet de lamines noires formant une vire dans toute la région de Sebdou. Ils sont le plus souvent micritiques.(Bensaoula.F,2006).

B.7 Les Dolomies de Terni

Correspondent à la corniche au-dessus des calcaires du Lato, leur épaisseur est d'environ 50m dans la zone de Sebdu. Dans une grande partie des Monts de Tlemcen, les Dolomies de Terni peu fossilifères montrent un faciès constant. On observe à la base un horizon riche en silex et en stromatolites recristallisées. Sur la bordure méridionale des Monts de Tlemcen et de Daïa, ainsi que les hautes plaines oranaises, cette formation dolomitique ne peut être séparée des calcaires du Lato également dolomitisés (Bensaoula.F ,2006).

B.8 Les marno-calcaires de Hariga

La limite de ces marno-calcaires est difficile à déterminer lorsque les premières assises de la formation sont calcaires et entièrement atteintes par la dolomitisation. La limite supérieure est facile à préciser. Elle correspond à la semelle du premier banc gréseux des grès du Merchiche. (Bensaoula.F ,2006).

B.9 Les marno-calcaires d'OuledMimoune

Les travaux établis par Benest, 1985 sur le flanc septentrional de l'anticlinal d'Ouled Mimoune montre des couches localement renversées dans la partie inférieure au niveau de Bled El Gliaa. La série est attribuée au Tithonien supérieur et Berriasien dans la région d'Ouled Mimoune atteint une épaisseur de 500 à 700 m. A la base, on note l'existence de bancs gréseux. La série est attribuée au Tithonien supérieur et Berriasien inférieur (Ablaoui H., 2013).

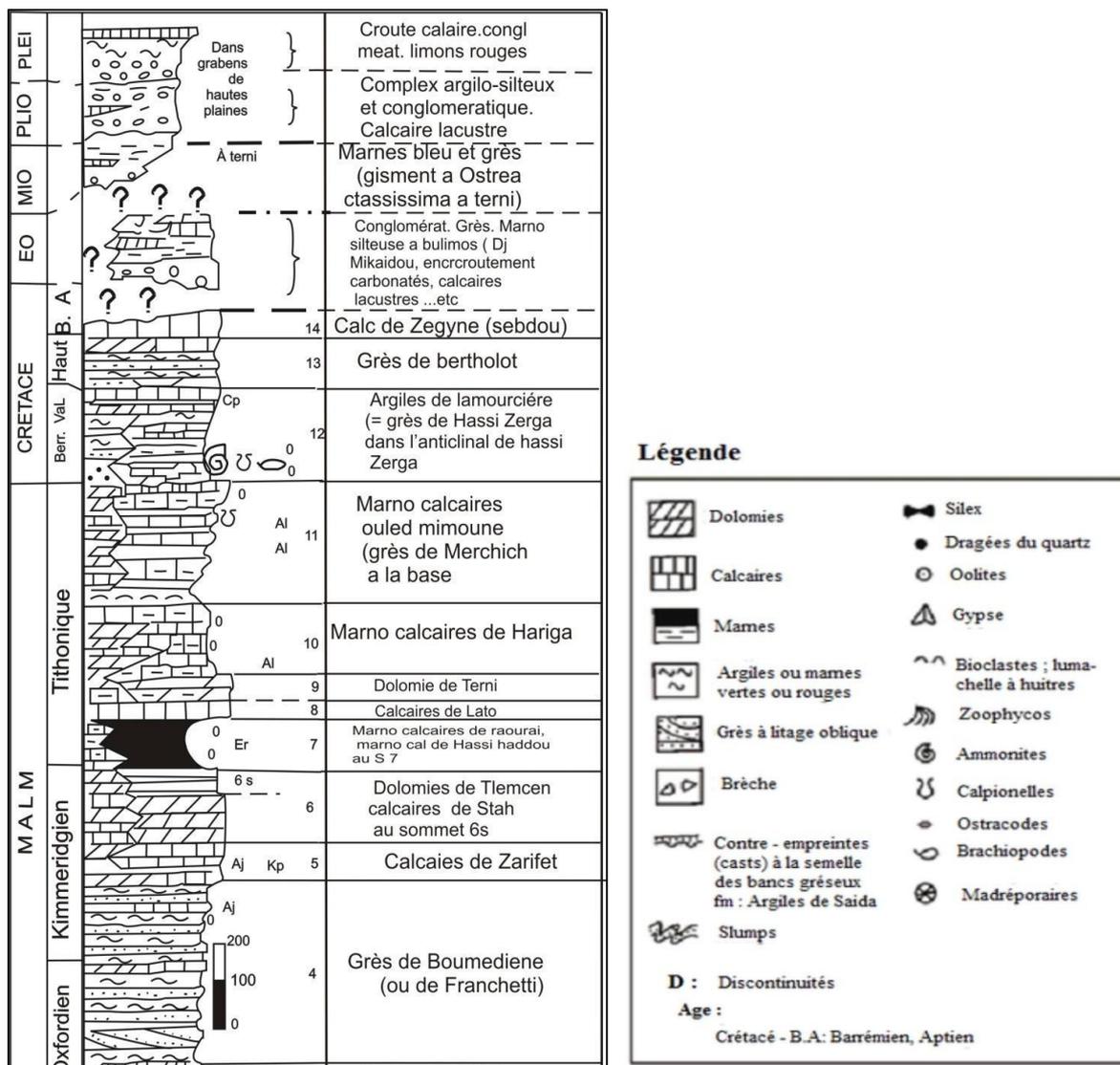


Figure II.1 : log litho-stratigraphique synthétique de la région étudiée (Benest et al 1999)



Figure II.2 : Cadre géologique régionale (extrait de carte géologique de l’Algérie au 1/500000)

La figure II.2 représente les formations géologiques qui existent dans la zone d’étude, il s’agit de dolomies, calcaires et grès du Kimméridgien, des dolomies cristallines du Tithonien, des calcaires crayeux du Miocène supérieur et des alluvions récents, sables, graviers et argiles du Quaternaire.

C. Contexte structural

C.1 Généralités

Les moles primaires résistantes de Ghar Roubane à l'Ouest et de Tiffrit à l'Est ont largement influencé l'évolution structurale de la région. Nous sommes dans un domaine où la compétence des roches génère une tectonique cassante. Cela n'empêche pas l'existence de déformations souples marquées par la présence de synclinaux et d'anticlinaux. Les Monts de Tlemcen sont surtout affectés par :

- Une tectonique distensive cassante par un système de failles longitudinales SW-NE à WSW-ENE (direction tellienne) avec formation de zones effondrées.
- Une tectonique compressive plus souple, avec la mise en place de structures plissées plus ou moins complexes.

C.2 Les phases tectoniques

C'est surtout la tectogenèse tertiaire et quaternaire qui a le plus conditionné l'évolution morpho-structurale de l'avant- pays tlemcenien (Benest, 1982 et 1985). Cinq phases principales sont envisagées :

C.2.1 Une phase distensiveéocrétacée :

Durant le Jurassique supérieur et l'Eo-Crétacé, la subsidence a été contrôlée par le jeu ou le rejeu des grands accidents SO-NE et subméridiens, hérités de l'orogénèse hercynienne (Benest, 1981). P Guardia (1975) a également signalé dans les Monts des Traras, l'existence de mouvements syn-sédimentaires qu'il a rapporté à une tectogénèse pré-atlasique.

C.2.2 Une phase atlasique :

Cette phase correspond sensiblement aux mouvements mis en évidence par P.Guardia dans les Monts de Traras et qui se seraient produits à partir du Sénonien. Etudiée dans les Monts de Tlemcen et de Daïa, cette phase englobe :

- Des mouvements compressifs donnant des plis d'orientation moyenne E-O à grand rayon de courbure, tel qu'au niveau du Djebel El Arbi dans la région de Sebdu.
- Des mouvements distensifs qui sont contrôlés par le rejeu des grands accidents du socle. La fracturation s'est traduite par un système de failles conjuguées N55°E et N140°E responsables de la mise en place des principales structures.

Une importante phase de compression N-S à NO-SE avec un paroxysme Miocène :Par comparaison avec la région des Traras, cette phase aurait débuté avec ou avant la mise en place des nappes et serait antémessinienne, (G. Lucas 1942, P Guardia 1975)selon Benest (1974), cette phase serait l'origine des grandes structures coulissantes et chevauchantes.

C.2.3 Une phase à dominance distensive :

Cette phase est en continuité avec la précédente, elle a contribué à la surrection de la plupart des reliefs actuels. Elle a également entraîné la régression pliocène, notamment dans la zone de Terni, antérieurement atteinte par la transgression du Miocène supérieur

(Doumergue ,1912) ou du Mio-Pliocène. Le rejeu des failles préexistantes a généralement accentué le découpage en Horst et Grabens.

C.2.4 Une phase récente Plio-Quaternaire

Cette phase se traduit par des mouvements syn-sédimentaires provoquant le jeu des décrochements dextres associés à des déformations (G Thomas 1985). Ces dernières n’ont pas l’ampleur des phases précédentes.

C.2.5 Déformations actuelles

Elles sont traduites par l’évolution morphométrique et le jeu des failles actives.

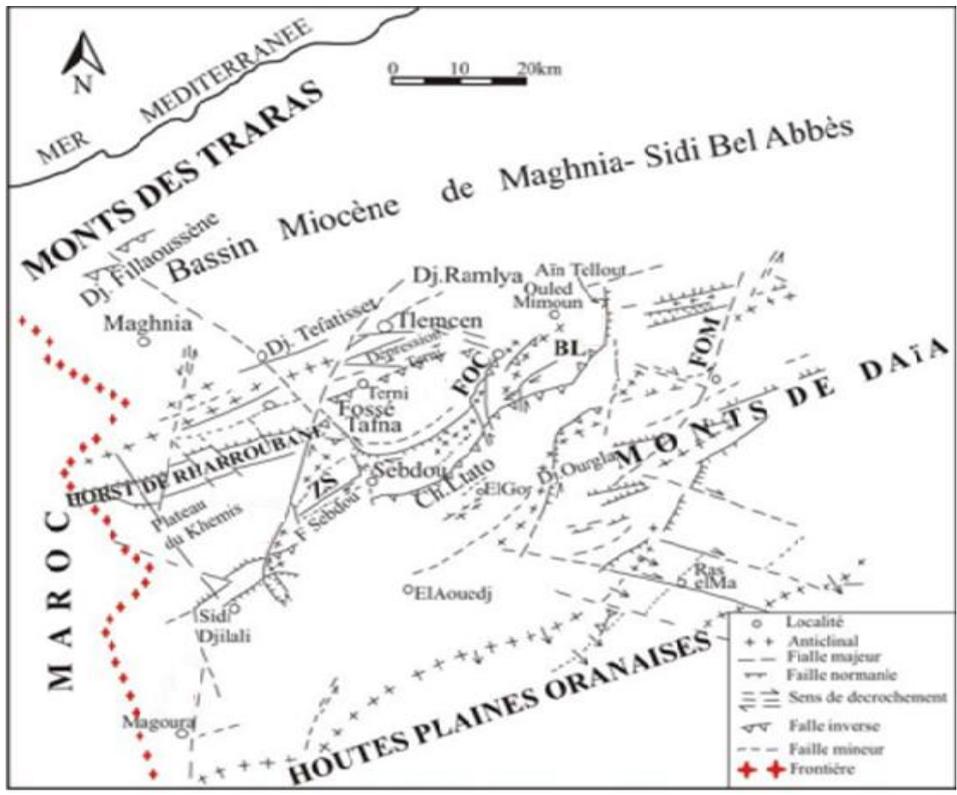


Figure II. 3: Schéma structural de l’avant pays tellien, entre Saida et la frontière algéro-marocaine (Benest.M, 1985).

II.3. Synthèse hydrogéologique :

Les Monts de Tlemcen et leurs piémonts nord sont connus par leurs aquifères à potentiel hydraulique relatif à la nature de la formation géologique. Le secteur d’étude se trouve dans une zone de limites entre les formations carbonatées du Jurassique et les formations du Plio-Quaternaire.

A. Les formations du Jurassique supérieur :

* Les formations calcaires et dolomitiques sont largement fissurées et karstifiées. D'après les travaux antérieurs, leur karstification a été étudiée par Hayane (1981), Collignon (1986) Bensaoula (1992 et 2006). A cet effet, cette karstification donne à ces formations une très bonne transmissivité (Bensaoula, 2006) et par conséquent constituent les principaux réservoirs d'eaux souterraines de la région.

* Au niveau des grès, la perméabilité sera plus ou moins importante par l'effet de la porosité des fissures et interstices.

B. Les formations du Crétacé :

- Les niveaux calcaireux sont parfois fissurés.
- Les marnes constituent un ensemble imperméable.

C. Les formations du Mio-Plio-Quaternaire :

La perméabilité des formations alluvionnaires et gréseuses dépend de la cimentation ainsi que leur teneur en particules fines.

II.3.1. Propriétés hydrogéologiques des formations :

- **II.3-1.1. Les formations à forte capacité de rétention souterraine :**

-

Ce sont les formations perméables représentées par les séries calcaires et calcaire-dolomitiques du Jurassique.

- **II.3-1.2. Les formations calcaires du Jurassique :**

Peuvent être aquifères si elles sont fissurées et karstifiées. Leur productivité dépend aussi de la nature lithologique des formations intercalées (Keddah K et Médjahdi N, 2018).

II.3-1.3. Les dolomies de Tlemcen

Les dolomies de Tlemcen avec à leur base les calcaires de Zarifet, occupent une grande partie du massif tlemcenien. Ces roches sont diaclasées et intensément karstifiées.

• II.3-1.4. Les dolomies de Terni :

Moins karstifiées que les dolomies de Tlemcen, elles sont plus micritiques et présentent de nombreuses passées stromatolithiques. Les caractéristiques hydrogéologiques de ces dolomies sont comparables à celles des dolomies de Tlemcen (Bensaoula F, 2006).

II.3-2. Les formations à capacité de rétention souterraine faible à très faible :**A. Les grès de Boumediène :**

Ces grès ne sont guère poreux et leur perméabilité d'interstices est toujours faible à l'exception de deux situations bien particulières :

- ✓ L'existence de bancs calcaires dans la partie supérieure de la formation où ils jouent le rôle de drains, permettant aux grès de constituer localement un aquifère intéressant.
- ✓ La présence de diaclases et de fissures qui donnent à ces grès une certaine perméabilité.

Les bancs marneux intercalés dans les niveaux gréseux permettent à l'ensemble de jouer un rôle d'écran étanche qui sert de mur à l'aquifère des dolomies du Jurassique.

B. Les conglomérats du Miocène inférieur :

Très fissurés, mais ils sont caractérisés par l'absence de réserves, à cause de leur faible surface d'affleurement.

C• Marno-calcaires de Raouraï, d'Hariga et de Lamoricière :

Ils sont relativement imperméables. Si les niveaux calcaires admettent une certaine perméabilité dans le sens horizontal, l'ensemble est imperméable dans le sens vertical.

D• Grès de Merchiche :

Ils couvrent de grandes étendues en bordure du fossé de Seb Dou et de la Tafna. Ils présentent une perméabilité mixte qui ne leur permettant pas de constituer un aquifère important, compte tenu de leur faible extension et de leur épaisseur réduite.

Conclusion :

L'analyse litho- stratigraphique des différentes formations nous a permis de mettre en évidence leurs diversités ; ce sont surtout des calcaires, des grès, des grès-calcaires et des dolomies. L'analyse structurale de la région montre la présence de deux systèmes de décrochements, avec cinq phases tectoniques, contrôlées par le jeu et le rejeu d'accidents distensifs SW-NE à WSW-ENE, parfois compressifs. La tectonique joue un rôle important dans la structure géologique du secteur étudié. Les failles et diaclases ont contribué dans le développement de la karstification et l'émergence de plusieurs sources.

D'autre part, la synthèse hydrogéologique nous a permis de constater que les formations calcaires et calcaire-dolomitiques du Jurassique supérieur forment les principales formations aquifères qui présentent un intérêt hydrogéologique dans le secteur d'étude.

Chapitre III : Cadre hydrogéochimique

1. Introduction :

La qualité de l'eau souterraine et ses interactions avec le sol et les roches pendant sa percolation, son mouvement et son stockage dans les aquifères représentent les facteurs clés de la chimie des eaux souterraines. Ces interactions impliquent principalement les réactions chimiques et leurs résultats à travers les processus de dissolution et de précipitation, qui sont contrôlés par les produits de solubilité des différentes phases minérales impliquées. Notre travail est basé sur 146 analyses physico-chimiques effectuées par le laboratoire de l'A.D.E/Tlemcen et de l'A.N.R.H, pour la période allant du 13/03/99 au 02/12/12.

2-La balance ionique :

La balance ionique permet de contrôler le pourcentage d'erreur par la formule suivante :

$$BI = \frac{|\sum r^+ - \sum r^-|}{|\sum r^+ + \sum r^-|} \times 100$$

Avec :

Σr^+ : Somme des quantités en réactions des cations.

Σr^- : Somme des quantités en réactions des anions.

BI : Balance ionique en %.

si :

$BI \leq 2\% \Rightarrow$ Bonne analyse

$2\% < BI < 5\% \Rightarrow$ Analyse acceptable

$BI > 5\% \Rightarrow$ Mauvaise analyse.

La balance ionique calculée pour les eaux de la source d'Ain El FOUARA supérieure sont bonnes à acceptables (Tableau n°3 en annexes).

3- Etudes des paramètres physico-chimiques :

Pour avoir une bonne eau à consommer, on doit suivre et appliquer des critères très stricts, fixés par le Ministère de la Santé et par le conseil supérieur du secteur d'Hygiène Publique. Les normes définissant une eau potable sont variables suivant la législation en vigueur. L'Algérie a des normes de potabilité, qui sont utilisées pour cette étude.

Les analyses physico-chimiques ont porté sur :

3.1. Les paramètres physiques :

- Le pH.
- La conductivité.
- Le résidu sec.

a) Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH d'une solution varie en fonction de la concentration en ions (H_3O^+) ou (H^+). Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, le 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples.

Les valeurs des pH de la source étudiée varient entre 7.14 et 8.9. Elles étaient au dessous de la norme prescrite par la réglementation algérienne ($\geq 6,5$ et ≤ 9).

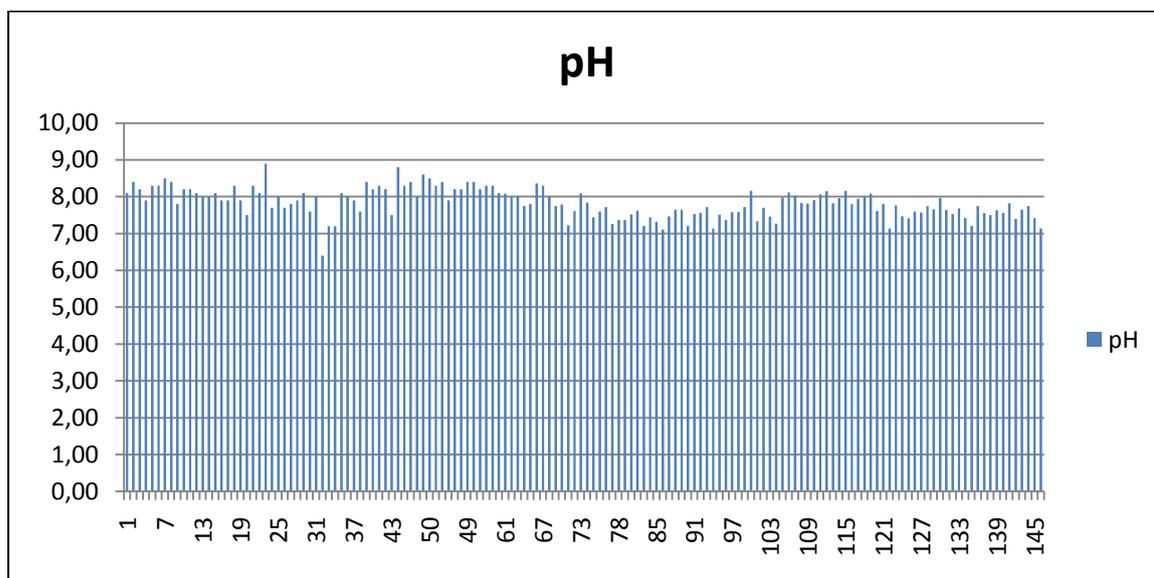


Figure III.1 : Histogramme du pH

b) La conductivité :

La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement la minéralisation globale de l'eau. Le tableau suivant donne la relation entre la conductivité et la minéralisation des eaux

Tableau III.1 : Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier J., 2009).

| Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Minéralisation (mg/L) |
|--|-----------------------|
| Conductivité < 100 | Très faible |
| 100 < Conductivité < 200 | Faible |
| 200 < Conductivité < 333 | Moyenne |
| 333 < Conductivité < 666 | Moyenne à accentuée |
| 666 < Conductivité < 1000 | Importante |
| Conductivité > 1000 | Elevée |

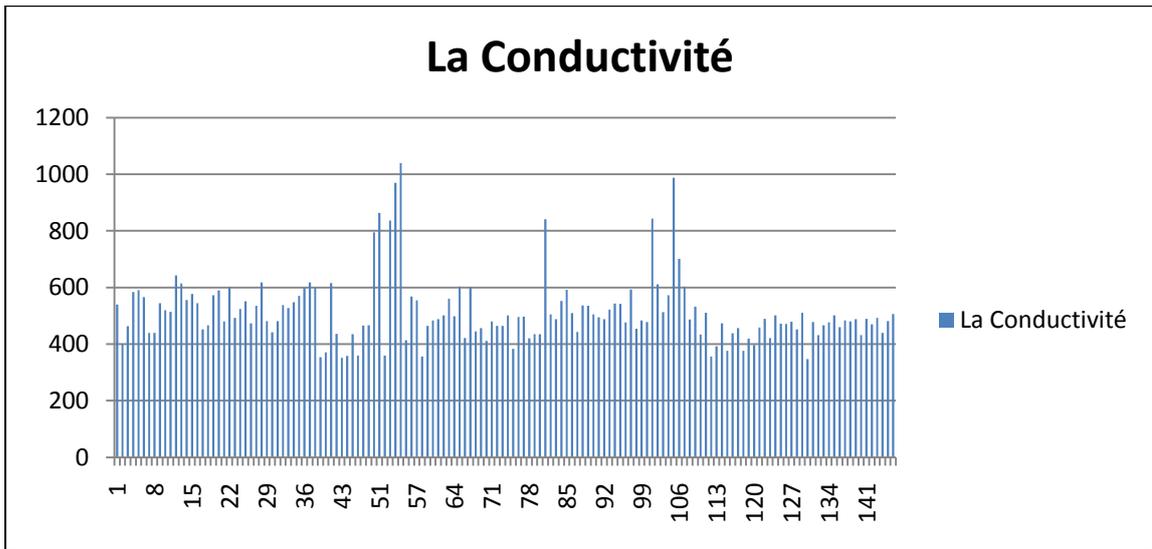


Figure III.2 : Histogramme de la conductivité

Les valeurs des conductivités des eaux de la source d’Ain FOUARA «SUP», oscillent entre 307 $\mu\text{S/cm}$ et 1040 $\mu\text{S/cm}$. Toutes les valeurs sont inférieures à la norme (2800 $\mu\text{S/cm}$).

307 $\mu\text{S/cm}$ et 1040 $\mu\text{S/cm}$. Toutes les valeurs sont inférieures à la norme (2800 $\mu\text{S/cm}$).

c) Résidu sec :

La détermination du résidu sec sur l'eau non filtrée permet d'évaluer la teneur en matières dissoutes et en suspension non volatiles, obtenues après une évaporation d'eau (Rodier J., 2005). Une eau dont la teneur en résidu sec est extrêmement faible peut être inacceptable à la consommation, en raison de son goût insipide (WHO., 1994).

Les valeurs du résidu sec de la source étaient comprises entre 200mg/L en 12/02/2006 à 880 mg/L en 03/01/07. Toutes les valeurs étaient conformes à la norme (1500mg/L).

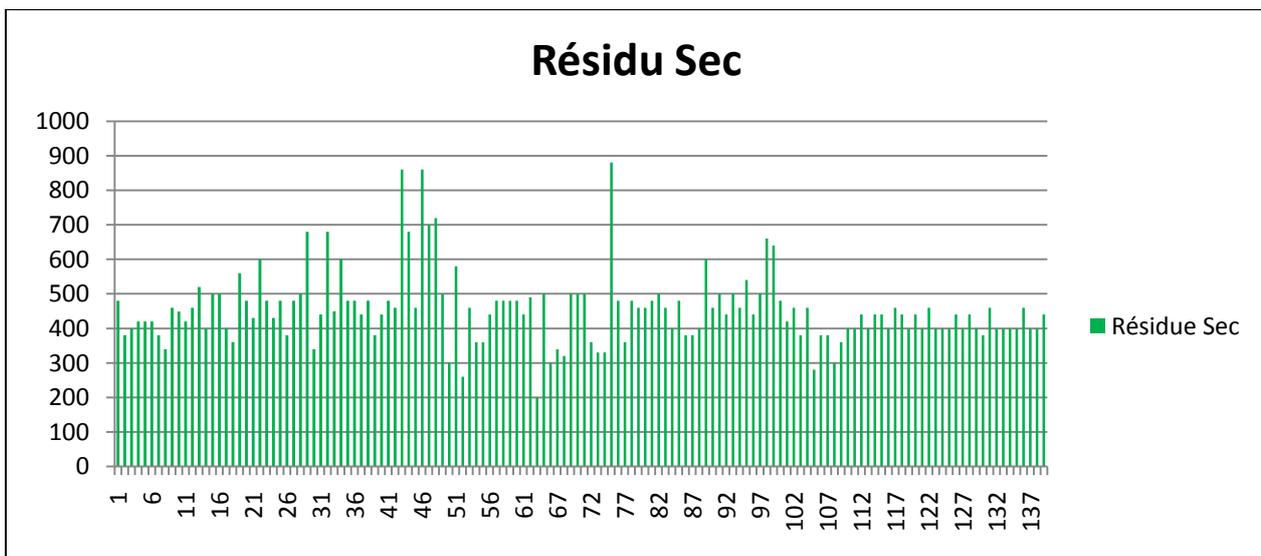


Figure III.3 : Histogramme des résidus secs.

3.2. Paramètres chimiques :

Les cations :

A.1. L'ion calcium (Ca^{2+}):

C'est un élément de la dureté totale. Les normes algériennes préconisent une concentration de 200 mg/L. Pour l'eau de la source étudiée, les valeurs du calcium varient entre 04mg/L et 113mg/L, donc toutes les valeurs enregistrées étaient conformes à la norme.

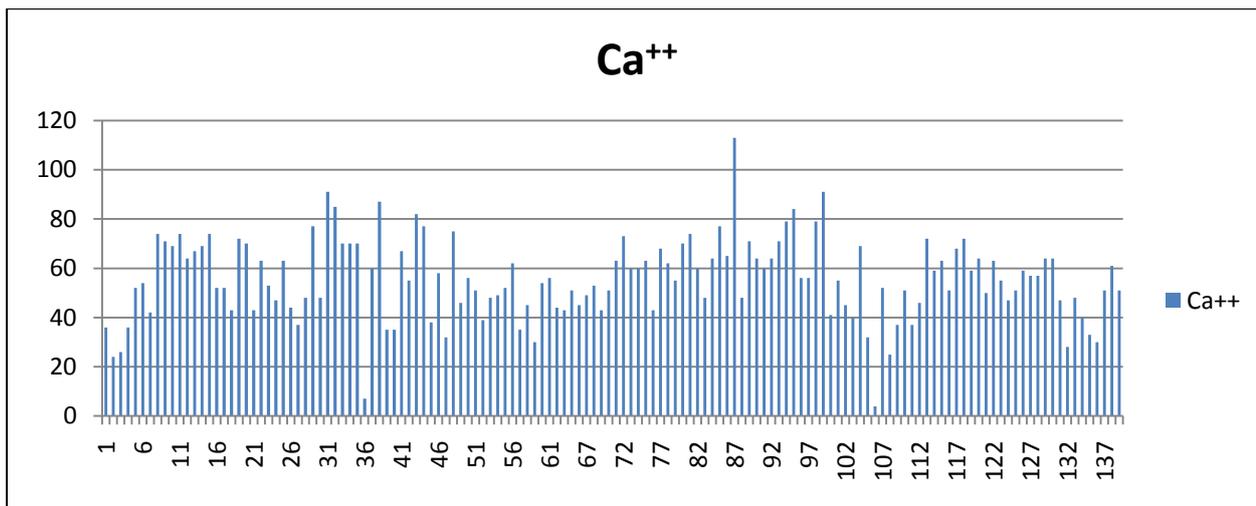


Figure III.4 : Histogramme du Calcium.

A.2 L'ion magnésium (Mg^{2+}):

C'est un élément significatif de la dureté de l'eau. Les teneurs en ion magnésium pour les eaux de la source sont comprises entre 14mg/L et 76mg/L. Les normes algériennes recommandent 150mg/L, toutes les concentrations sont au dessous de cette limite.

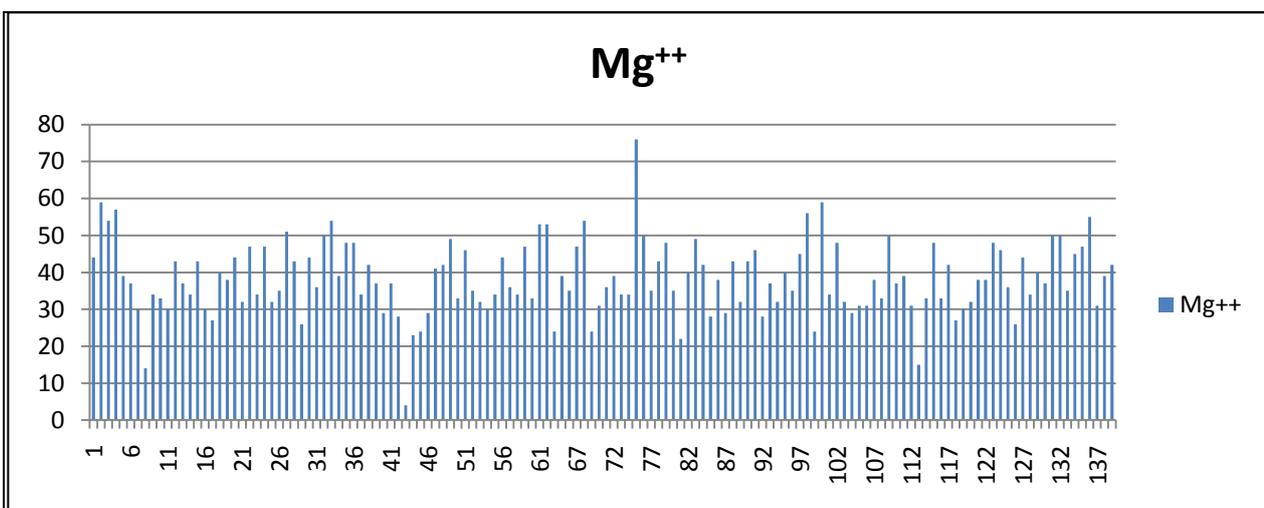


Figure III.5 : Histogramme de Magnésium.

A.3. L'ion sodium (Na^+) :

Le sodium est le plus abondant des éléments alcalins. Les normes algériennes recommandent pour le sodium une valeur limite de 200 mg/L. Les valeurs dans les eaux étudiées varient entre 05 mg/L et 69 mg/L. Elles sont au dessous de la norme prescrite.

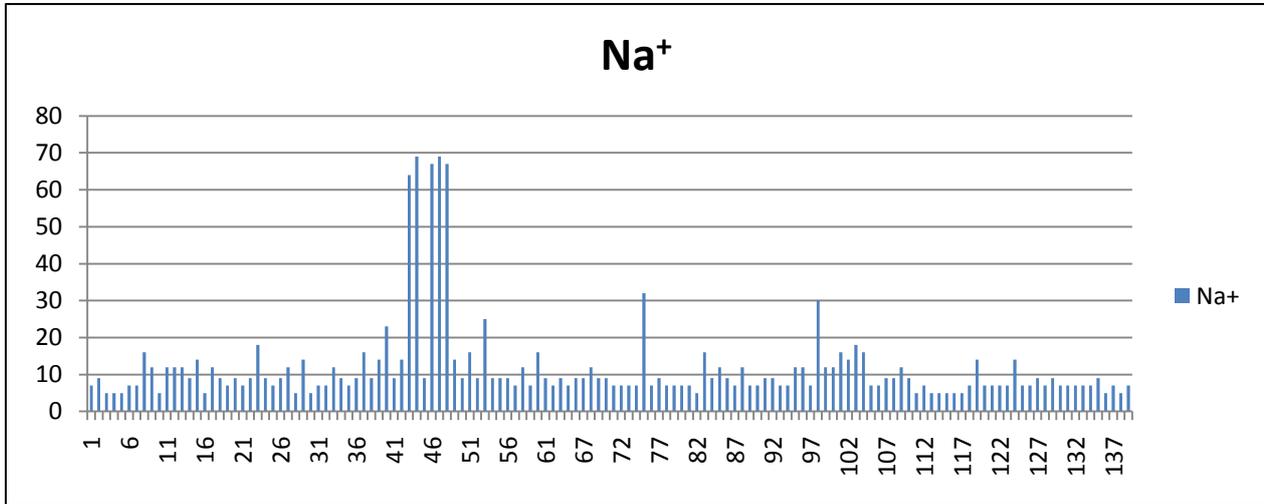


Figure III.6 : Histogramme de Sodium.

A.4 L'ion potassium (K^+) :

Un élément naturel dans les eaux, il est soit lié à la nature géologique des terrains ou à l'utilisation des engrais. Les concentrations en ion potassium répondent à la norme algérienne (12mg/L) à l'exception des échantillons suivants :

- N° 43 de la date du 03/01/2004 (31mg/L).
- N° 44 de la date du 03/02/2004(28mg/L).
- N° 46 de la date du 06/04/2004 (29mg/L).
- N° 47 de la date du 03/05/2004 (28mg/L).
- N° 48 de la date du 01/06/2004 (29mg/L).

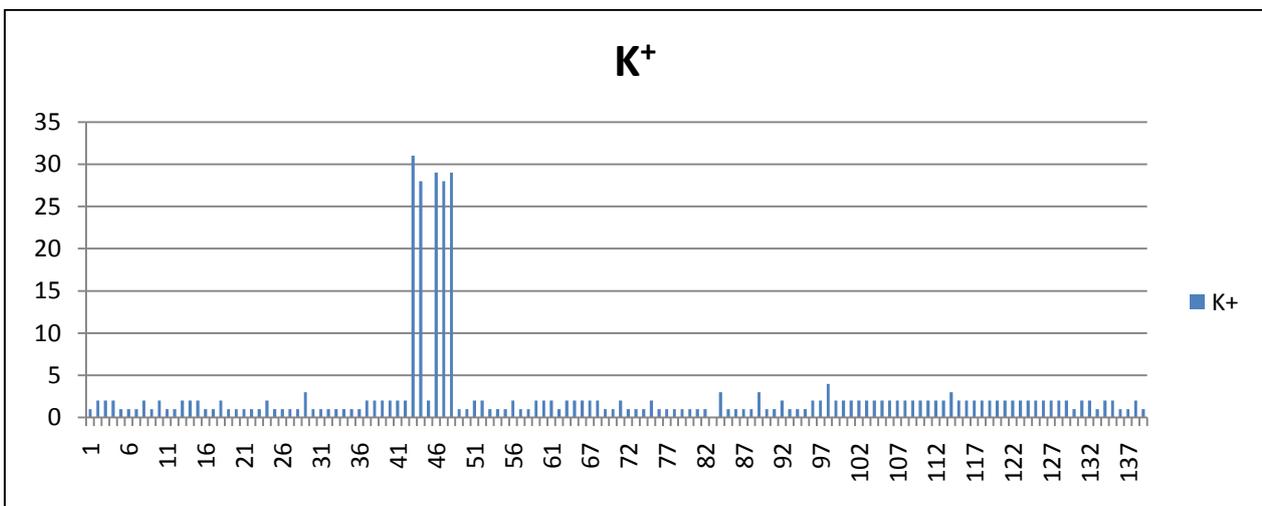


Figure III.7 : Histogramme de potassium

B. Les Anions

B.1. L'ion bicarbonate (HCO_3^-)

La teneur des bicarbonates dans l'eau dépend des terrains traversés. Les normes algériennes ne fixent aucune valeur pour ce paramètre. Les valeurs des bicarbonates des eaux analysées varient de 66mg/L à 432mg/L.

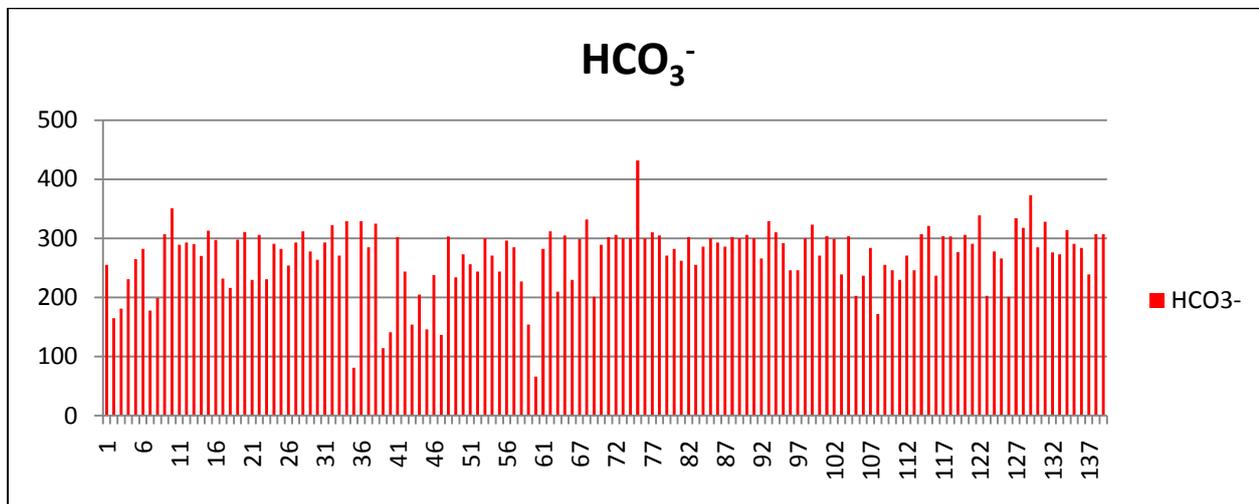


Figure III.8 : Histogramme des Bicarbonates.

B.2. L'ion chlorure (Cl⁻) :

Est un élément d'origine naturelle et en fonction de la nature des terrains traversés ou anthropique. Les teneurs en chlorures pour la source étudiée varient entre 07mg/L et 89 mg/L et la norme algérienne indique une concentration maximale admissible de 500mg/L, donc toutes les teneurs sont au dessous de cette norme.

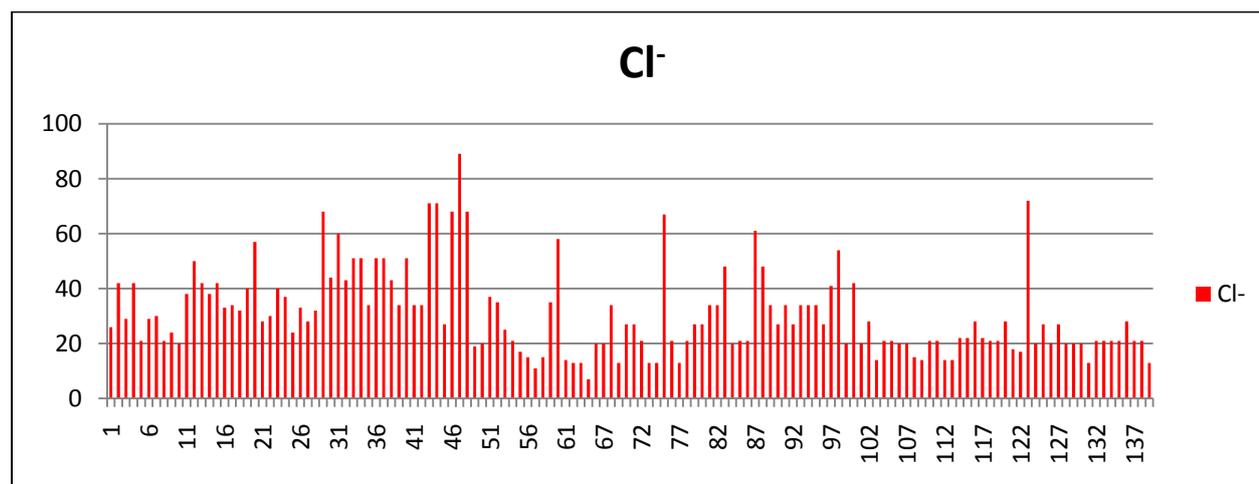


Figure III.9 : Histogrammes des Chlorures.

B.3. L'ion de sulfates (SO_4^{--})

D'origine naturelle dans l'eau en concentrations variables, ils peuvent provenir de l'utilisation des engrais chimiques ou des rejets des eaux usées. Les teneurs en ions sulfates pour la source étudiée varie de 02 mg/L, à 149 mg/L. La norme algérienne indique une concentration maximale admissible de 400 mg/L. Les teneurs restent dans l'intervalle de cette norme.

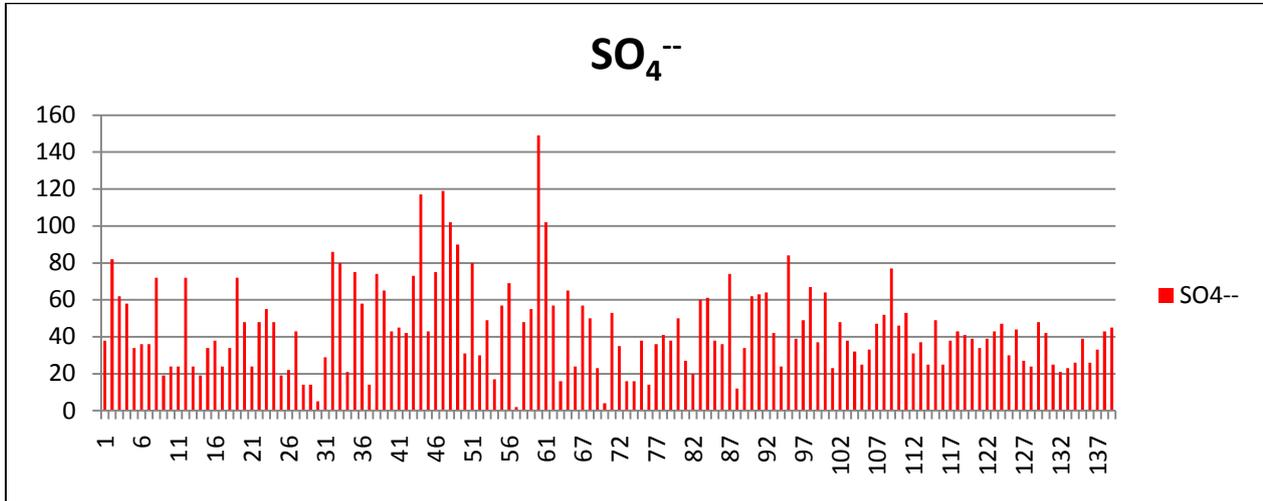


Figure III.10 : Histogramme des Sulfates.

B.4 L'ion nitrate (NO_3^-)

Les nitrates peuvent provenir des engrais chimiques qui s'infiltrent dans le sol avec les eaux d'irrigation ou les eaux pluviales. D'après Rodier 2009, la toxicité des nitrates peut avoir un effet à des doses de plus de 50mg/L; La valeur limite pour les eaux de la consommation humaine donnée par la norme algérienne est de 50 mg/L. Les teneurs en nitrates dans la source étudiée varient entre 01 à 120 mg/L.

Toutes les concentrations sont conformes à la norme algérienne, à l'exception des échantillons suivants :

- N° 35 de la date du 02/03/2002 (57 mg/L).
- N° 43 de la date du 03/01/2004 (91 mg/L).
- N° 44 de la date du 03/02/2004(93 mg/L).
- N° 46 de la date du 06/04/2004(93 mg/L).
- N° 47 de la date du 03/05/2004 (117 mg/L).
- N° 48 de la date du 01/06/2004 (120 mg/L).

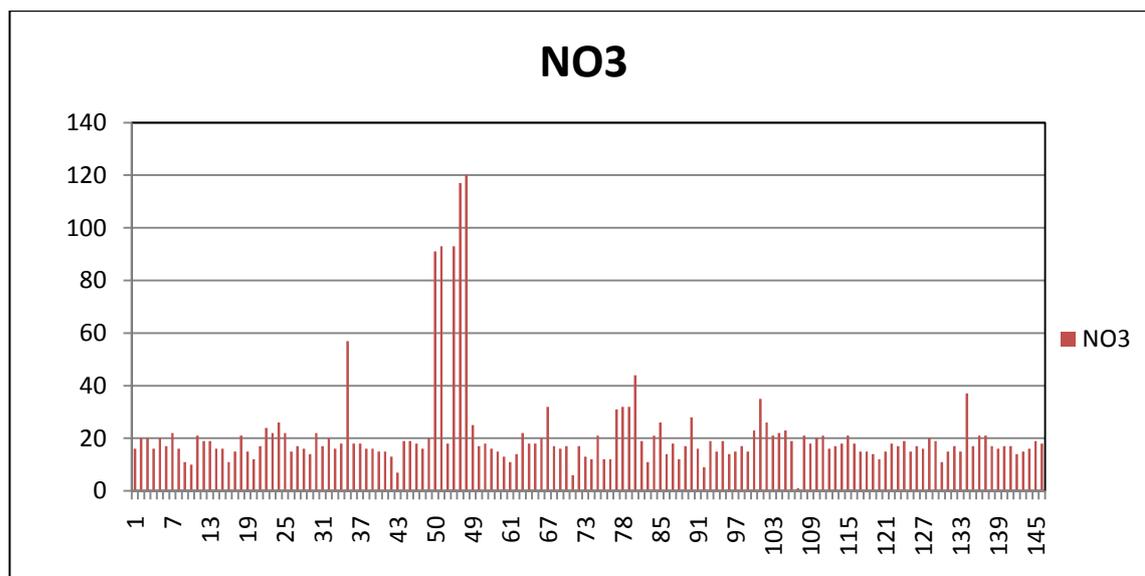


Figure III.11 : Histogramme des nitrates.

4. Récapitulation des interprétations des analyses physico-chimiques.

Tableau III.2 : Classification des eaux de la source d'Ain Fouara «SUP», selon les normes algériennes.

| Paramètres | Unités | Niveau guide | Concentrations Maximales admissibles | Résultats des analyses physico-chimiques | |
|-------------------------------|--------|--------------|--------------------------------------|---|--|
| | | | | Conformes aux normes | Non conformes aux normes |
| Ca ²⁺ | mg/L | - | 200 | Tous les échantillons. | - |
| Mg ²⁺ | mg/L | - | 150 | Tous les échantillons. | - |
| Na ⁺ | mg/L | - | 200 | Tous les échantillons. | - |
| K ⁺ | mg/L | - | 12 | Tous les échantillons à l'exception de quelques dates | 03/01/2004 03/02/2004 06/04/2004 03/05/2004 01/06/2004 |
| Cl ⁻ | mg/L | - | 500 | Tous les échantillons. | - |
| HCO ₃ ⁻ | mg/L | - | / | / | - |
| SO ₄ ²⁻ | mg/L | - | 400 | Tous les échantillons. | - |
| NO ₃ ⁻ | mg/L | - | 50 | Tous les échantillons à l'exception de quelques dates | 02/03/2002 03/01/2004 03/02/2004 06/04/2004 03/05/2004 01/06/2004 |
| pH | - | 6.5 | 9 | Tous les échantillons. | - |
| Résidu sec | mg/L | - | 1500 | Tous les échantillons. | - |
| Conductivité | μS/cm | - | 2800 | Tous les échantillons. | - |

5- Classification des eaux selon les analyses microbiologiques :

Naturellement, des microorganismes peuvent se retrouver dans l'eau, comme des bactéries, des virus, des protozoaires... dont certains sont pathogènes pour l'homme. Les problèmes liés à leur présence doit être bien maîtrisés grâce aux contrôles de la qualité microbiologique de l'eau de distribution et aux traitements de désinfection systématisés.

La qualité microbiologique de l'eau est évaluée en mesurant la présence de bactéries indicatrices de contamination fécale (entérocoques, *E. Coli*, coliformes...). Dans les eaux de surface, elles sont naturellement présentes en plus grand nombre que dans les eaux souterraines. La législation actuelle impose l'absence (0 unité formant colonies/100 ml) de ces bactéries indicatrices dans l'eau de consommation, ce qui nécessite des traitements de désinfection.

L'examen microbiologique des échantillons d'eau prélevés d'Ain Fouara par les services de l'ADE, en date du 08/12/2021, révèle l'absence des germes infectieux. En se référant aux normes, nous pouvons conclure que les eaux de la source d'Ain El Fouara étaient de bonne qualité bactériologique.

Tableau III. 3 : Analyse microbiologique des échantillons d'eau (08/12/2021) par l'ADE.

| Source | Coliformes totaux | | Coliformes fécaux | | Streptocoques fécaux | | Germes totaux à 37 °C | | Germes totaux à 22°C | |
|--------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------|-------|
| | Valeur (germe/ml) | C.M.A | Valeur (germe/ml) | C.M.A | Valeur (germe/ml) | C.M.A | Valeur (germe/ml) | C.M.A | Valeur (germe/ml) | C.M.A |
| AIN EL FOUARA SUP. | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | <10 | 00 | <100 |

6. Faciès Hydrochimiques:

Pour déterminer les faciès hydrochimiques, les données ont été traitées à l'aide des diagrammes de Piper et de Stabler, à l'aide du logiciel Diagrammes.

A. Le diagramme de Piper (Figs N° III.11.1, III.11.2, III.2.3) a montré que tous les échantillons appartiennent à la famille bicarbonatée calcique et magnésienne, à l'exception de quelques unes (échantillons N° 02, 40, 48, 50, 51, 67) qui sont classés chlorurés et sulfatés calciques et magnésiens.

B. Le diagramme de Stabler permet de connaître les différents faciès chimiques des eaux. On les classe par ordre de grandeur, d'abord les anions, suivis des cations.

Le diagramme de Stabler (Figs N° III.12.1, III.12.2, III.12.3, III.12.4) montre qu'il a deux faciès chimiques, le bicarbonaté calcique et le bicarbonaté magnésien.

Diagramme de Piper

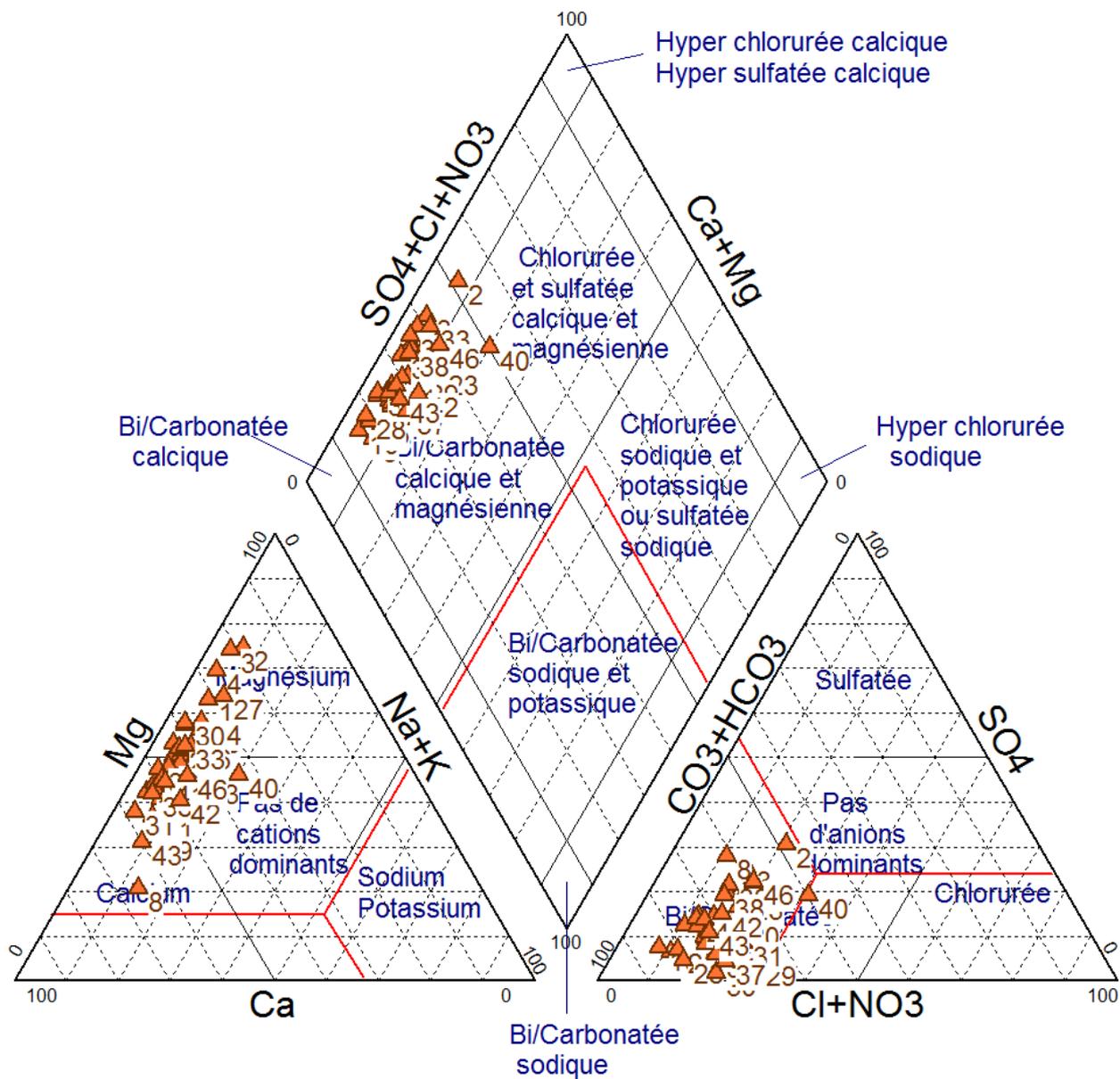


Fig. III 12.1 : Diagramme de Piper AIN FOUARA de 01 à 40.

Diagramme de Piper

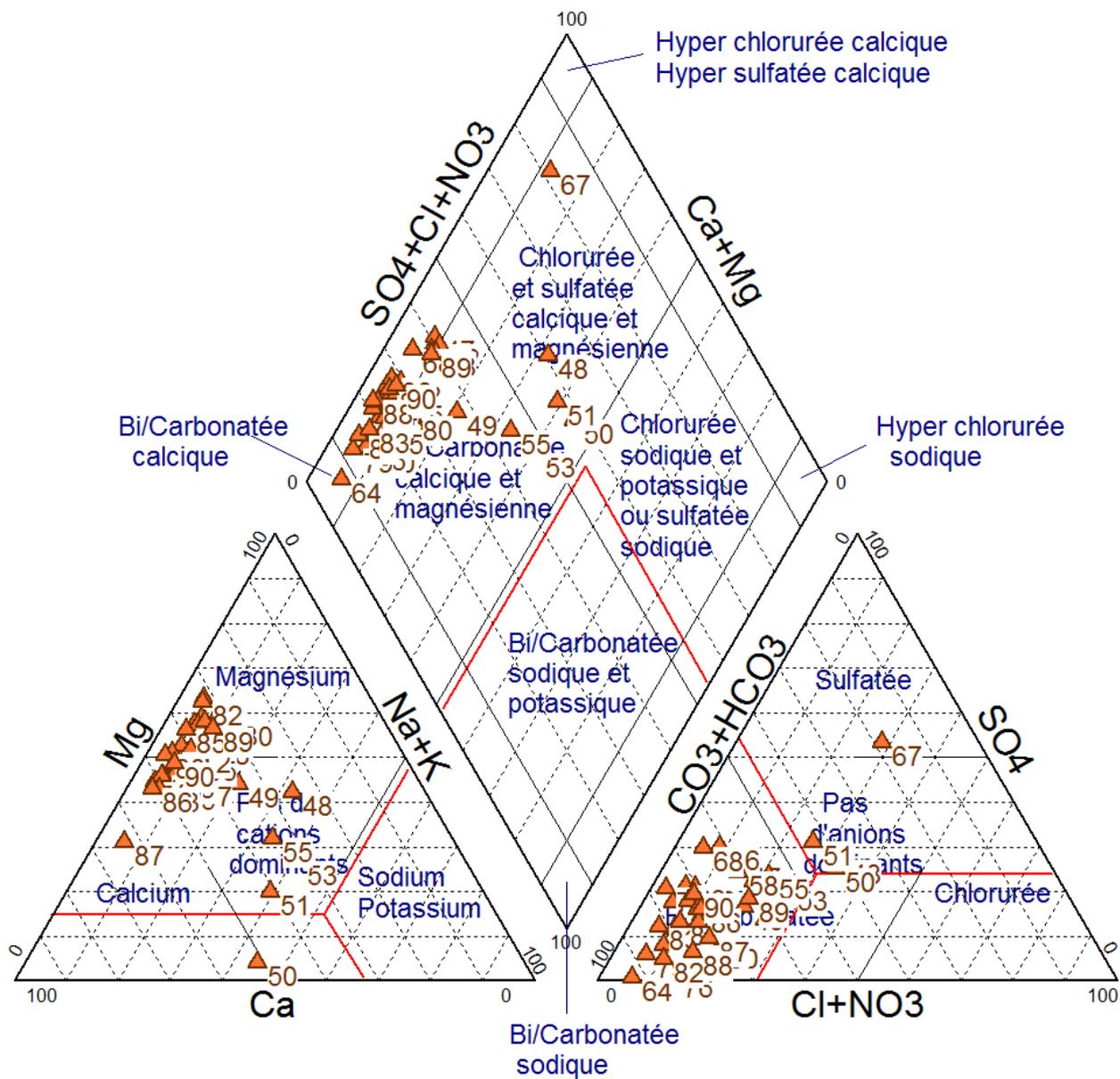


Fig. III 11.2 : Diagramme de Piper AIN FOUARA de 40 à 80.

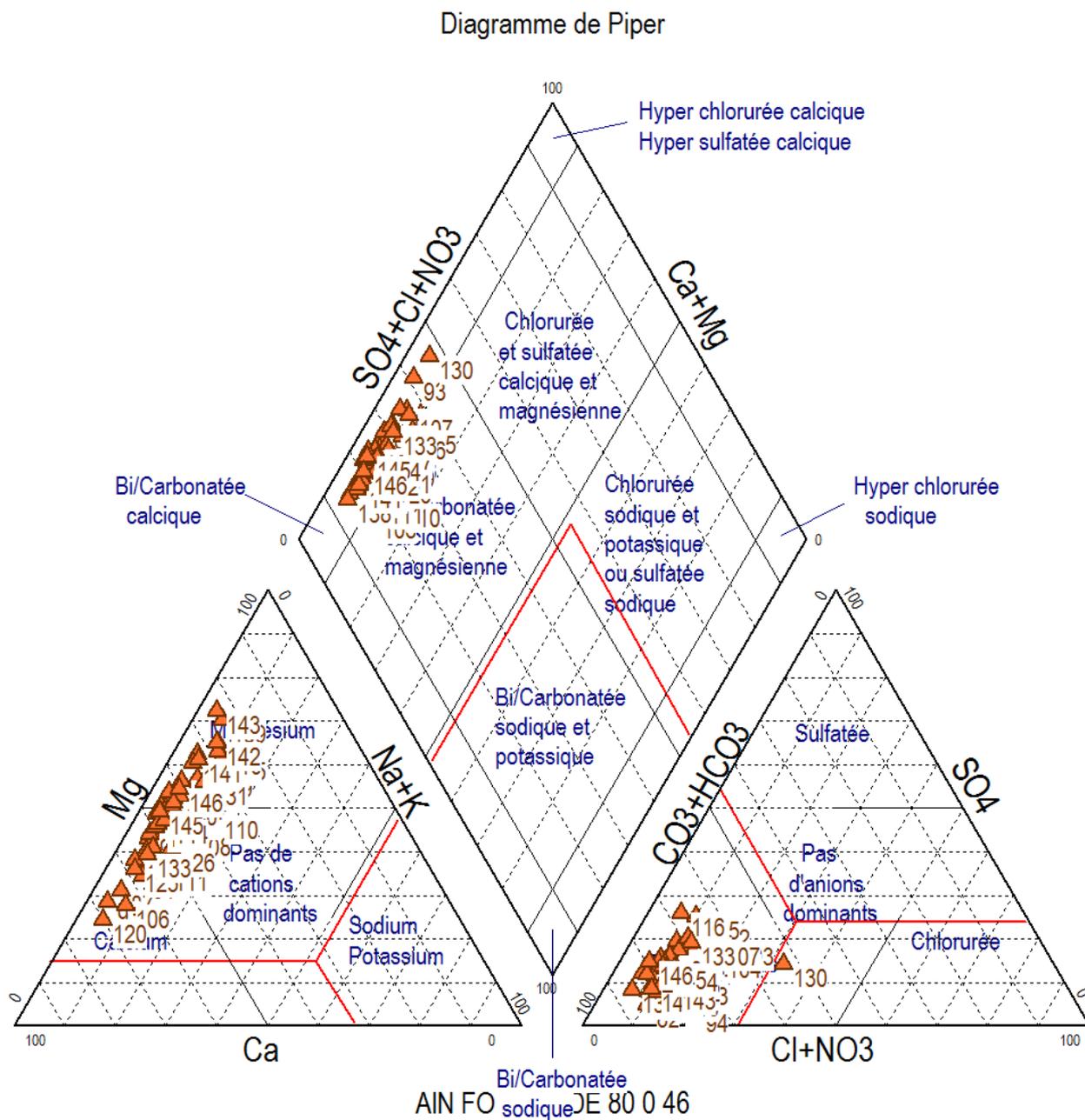


Fig. III 11.3 : Diagramme de Piper AIN FOUARA de 80 à 146.

Lieu

Stabler



Figure III.12.1: Diagramme de Stabler.

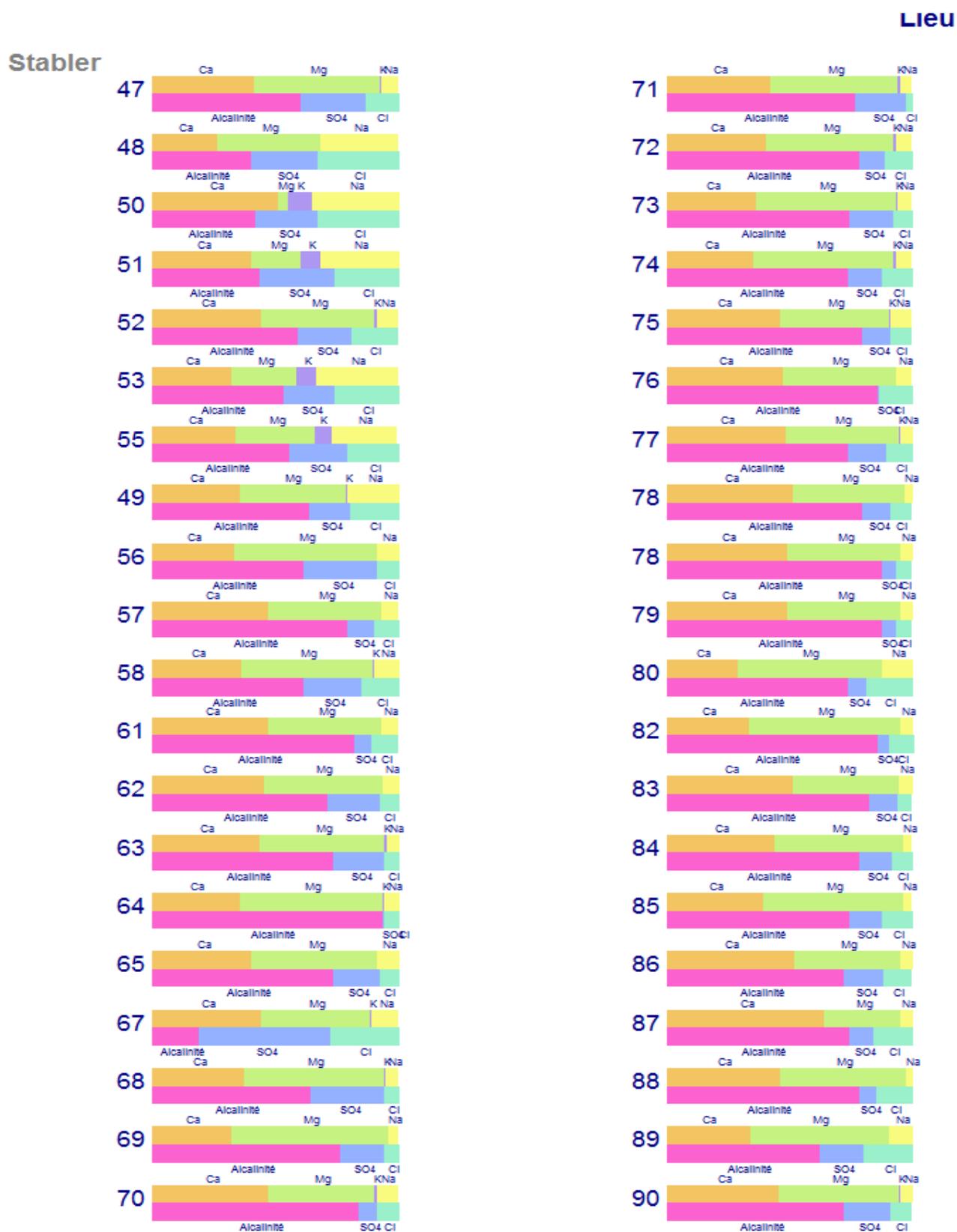


Figure III.12.2: Diagramme de Stabler (suite).

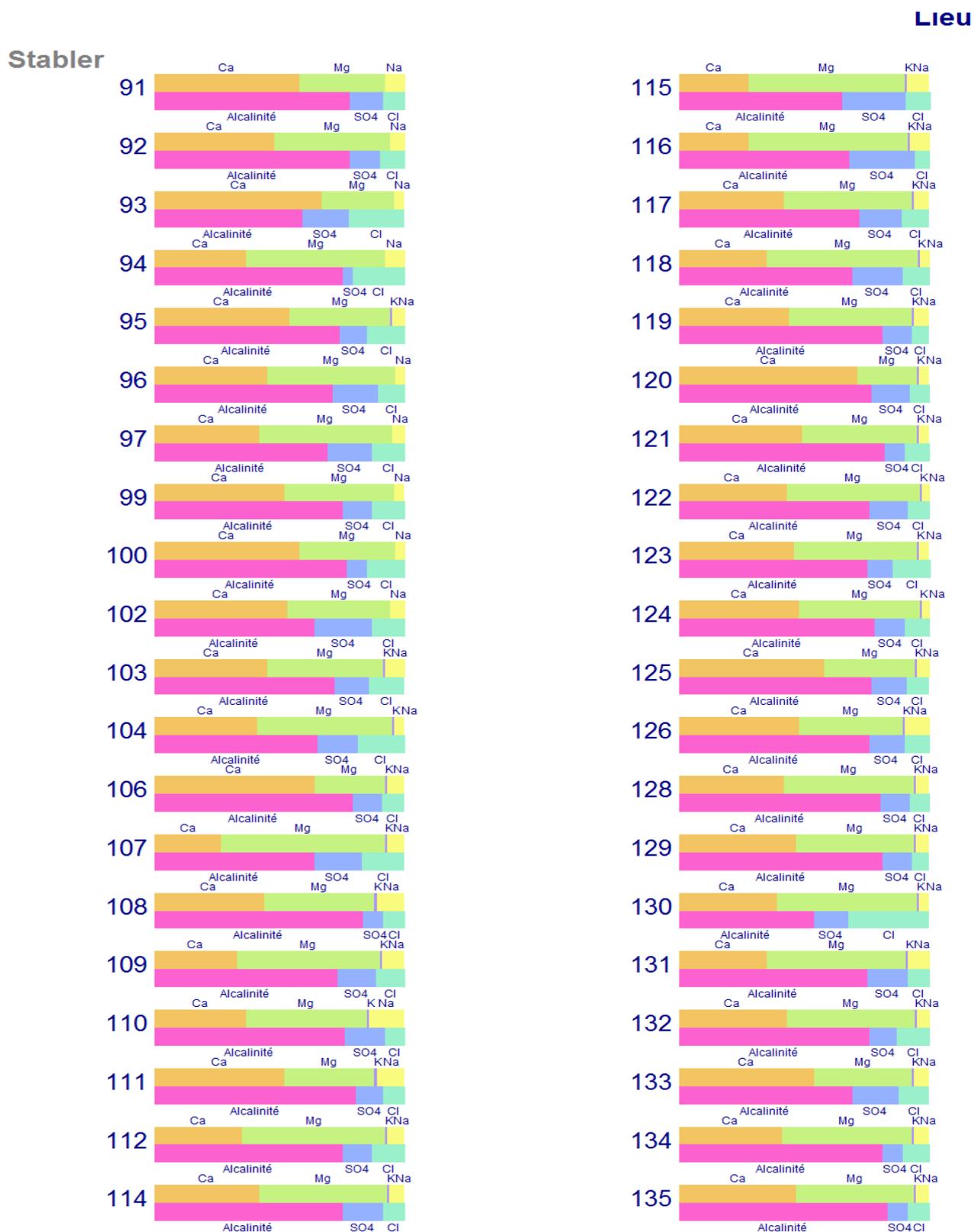


Figure III.12.3: Diagramme de Stabler (suite).

Lieu

Stabler



Figure III.12.4: Diagramme de Stabler (suite).

7 -Aptitude des eaux à l'irrigation :**a) Indice de Kelly's Ratio (KR) :**

L'indice de Kelly's Ratio (KR) est représenté par le rapport des concentrations de Na^+ et de la somme de Ca^{2+} et de Mg^{2+} . Il constitue une base pour la détermination de l'aptitude des eaux à l'irrigation (Paliwal, 1967).

Une grande concentration en Na^+ dans l'eau d'irrigation est considérée comme inappropriée pour son utilisation, cet indice est donné par la relation suivante :

$$\text{KR} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$$

Si : $\text{KR} < 1$: l'eau est considérée comme bonne pour l'irrigation.

Si : $\text{KR} > 1$: l'est est mauvaise pour l'irrigation (elle est déconseillée).

Les concentrations de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} sont en meq/L.

Les résultats des calculs sont représentés dans le tableau n° 05 en annexes.

Les valeurs du KR obtenues indiquent que les eaux étaient de bonne qualité pour l'irrigation ($\text{KR} < 1$).

b- Classification des eaux d'irrigation, selon le pourcentage en sodium :

| Classe | Eau très bonne | Eau bonne | Eau admissible | Eau médiocre | Eau mauvaise |
|-------------------|----------------|-----------|----------------|--------------|--------------|
| $\text{Na}^+(\%)$ | < 20 | 20-40 | 40-60 | 60-80 | > 80 |

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau n°06 en annexes.

Selon le % en Na, les eaux étaient de bonne à très bonne qualité pour l'irrigation.

C. Classification de Wilcox :

Le report des valeurs du pourcentage en sodium en fonction de celles de la conductivité sur le diagramme de Wilcox (fig III.14.) permet de voir une autre classification des eaux concernant leur aptitude à l'irrigation.

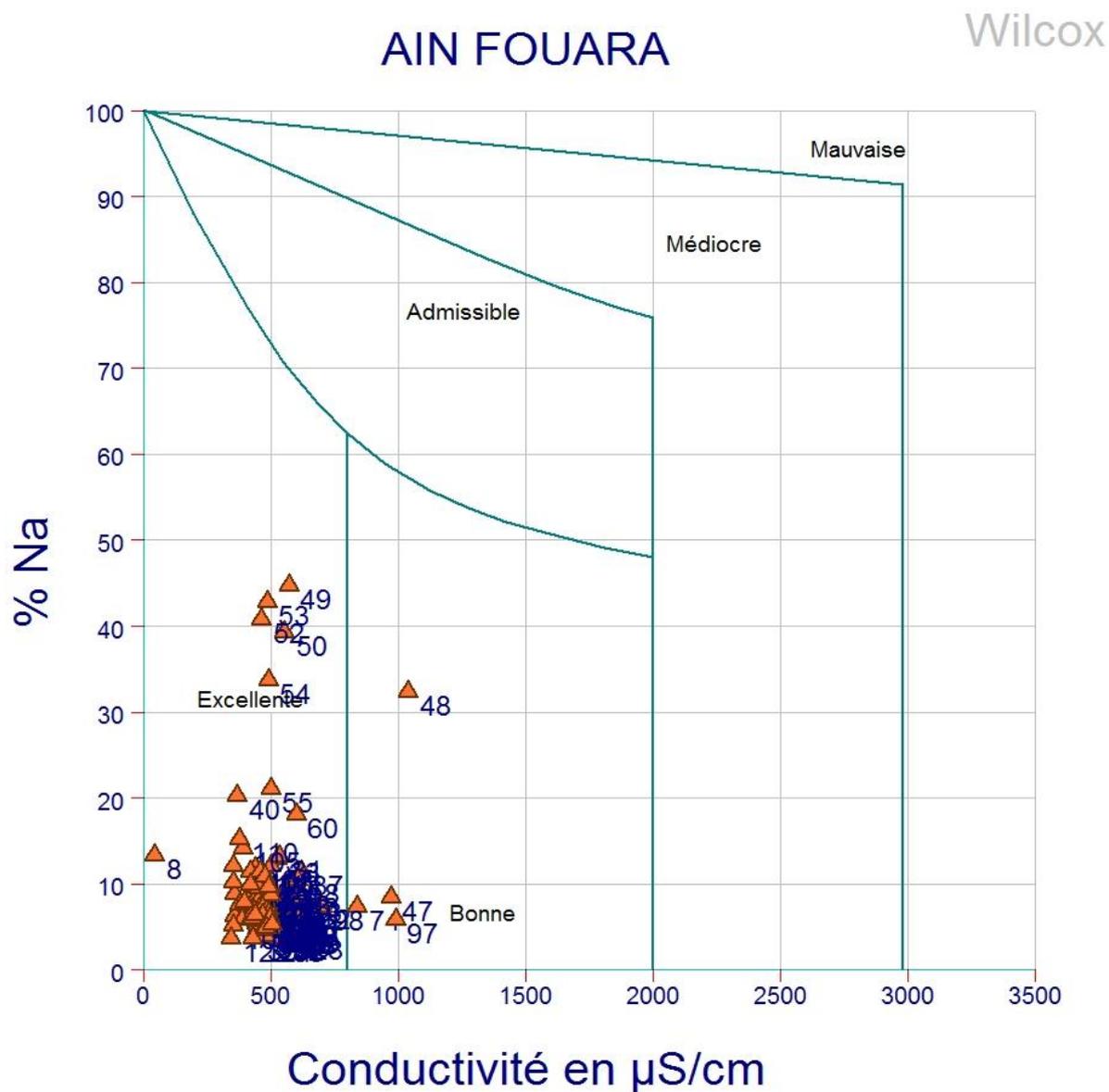


Figure III.14 : Diagramme de Wilcox.

- D'après ce diagramme, nous avons remarqué que toutes les eaux de la source étudiée appartiennent à la classe **excellente** pour l'irrigation à l'exception de quelques échantillons qui sont de qualité **bonne** (N° 47, N° 48, N° 87, N° 97).

d) Sodium Alcalinity Ratio “SAR”:

Le S.A.R s'exprime par l'équation suivante :

$$S.A.R = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Si :

- a) S.A.R. < 10 : eau excellente, à faible danger d'alcalinisation des sols.
- b) 10 < S.A.R. < 18 : eau de bonne qualité, danger d'alcalinisation assez appréciable.
- c) 18 < S.A.R. < 26 : eau convenable, danger d'alcalinisation important.
- d) S.A.R. > 26 : eau de qualité médiocre, danger de forte alcalinisation.

Nous reportons les valeurs calculées du S.A.R en fonction de celles de la conductivité sur le diagramme de classification des eaux d'irrigation qui comporte des classes de différentes qualités d'eau (fig. III.15).

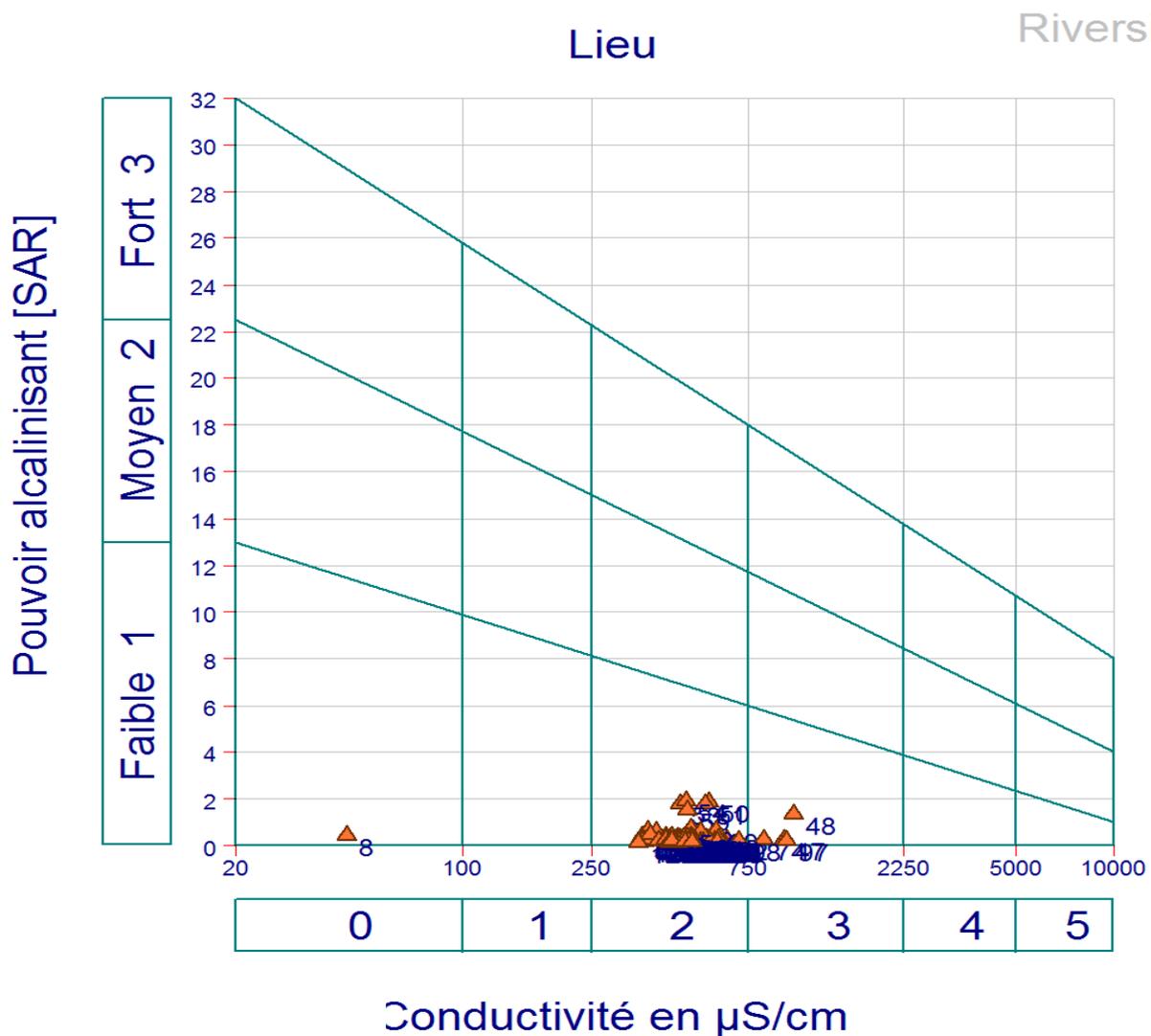


Figure III.15 : Diagramme de Riverside.

- D'après ce diagramme, nous constatons que la majorité des échantillons d'eau s'inscrivent dans la classe : **C2-S1** elles étaient de qualité bonne pour l'irrigation. Certains sont dans la classe **C3- S1**. Elles étaient admissibles pour l'irrigation (N° 47, N° 48, N° 87, N° 97).

8. Indice de saturation

La qualité de l'eau souterraine et ses interactions avec le sol et les roches pendant sa percolation, son mouvement et son stockage dans les aquifères représentent les facteurs clés de la chimie des eaux souterraines. Ces interactions impliquent principalement les réactions chimiques et leurs résultats à travers les processus de dissolution et de précipitation, qui sont contrôlés par les produits de solubilité des différentes phases minérales impliquées. Généralement, les indices de saturation sont utilisés pour exprimer la tendance de l'eau vers la précipitation ou la dissolution.

L'utilisation du programme « PHREEQ C » nous a permis de calculer les indices de saturation de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite, du gypse, de l'anhydrite, et de la halite.

Si on admet que:

- $Is < -0.5$: l'eau est sous saturée.
- $-0.5 < Is < 0.5$: l'eau est en équilibre avec la roche.
- $Is > 0.5$: l'eau est sursaturée.

Le tableau III.10 en annexes montre les résultats calculés de IS de la source d' Ain El Fouara supérieure.

Les eaux souterraines sont considérées comme saturées par rapport à la calcite, la dolomite et à l'aragonite. D'autre part, les échantillons d'eau souterraine sont en état de sous-saturation par rapport aux minéraux évaporitiques (gypse et anhydrite), ce qui confirme que l'encaissant de ces eaux est une formation carbonatée.

9. Analyse statistique

9.1 Matrice de corrélation :

L'analyse statistique portée sur les éléments chimiques a révélé que des corrélations significatives (Tab.III.8) ont été mises en évidence entre les éléments chimiques (tableau.III.8): Ca^{2+}/Cl^{-} ($r = 0.761$), Ca^{2+}/SO_4^{2-} ($r = 0.749$), Mg^{2+}/SO_4^{2-} ($r = 0.718$), Na^{+}/Cl^{-} ($r = 0.875$), cela tend à prouver que la majorité des sulfates, les chlorures proviennent des infiltrations des eaux usées. La corrélation non significative entre HCO_3^{-}/Ca^{2+} ($r = -0.230$) et HCO_3^{-}/Mg^{2+} ($r = -0.085$) est due à la fixation du calcium et du magnésium par les argiles et la libération du sodium.

Tableau III.8. Matrice de corrélation des différents paramètres. (Valeurs en gras indiquant les forts coefficients de corrélations).

| Variables | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻⁻ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ |
|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Ca ⁺⁺ | 1 | | | | | | | |
| Mg ⁺⁺ | 0.670 | 1 | | | | | | |
| Na ⁺ | 0.606 | 0.597 | 1 | | | | | |
| K ⁺ | 0.170 | 0.622 | 0.518 | 1 | | | | |
| Cl ⁻ | 0.761 | 0.693 | 0.875 | 0.431 | 1 | | | |
| SO ₄ ⁻ | 0.749 | 0.718 | 0.597 | 0.429 | 0.472 | 1 | | |
| HCO ₃ ⁻ | -0.230 | -0.085 | -0.113 | 0.002 | -0.130 | -0.278 | 1 | |
| NO ₃ ⁻ | 0.051 | 0.217 | -0.027 | -0.022 | 0.021 | 0.018 | 0.290 | 1 |

9.2 Analyse en composantes principales des variables :

Pour tenter de préciser les relations entre les éléments chimiques (variables) et de regrouper les points d'eau (individus) ayant le même chimisme, nous avons réalisé une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH).

Les résultats analytiques portés sur tous les échantillons ont généré huit variables. Seuls les trois premiers facteurs qui représentent 79.19% de la variance totale (tableau.III.9) peuvent interpréter d'une manière satisfaisante la minéralisation des eaux. F1 représente 50.67% de la variance et il est fortement corrélé avec (Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Mg²⁺, K⁺ et SO₄²⁻) et indique la pollution par les eaux d'irrigation riches en engrais. Tandis que l'axe F2 représente 16.708% de la variance et confirme la dissolution des formations carbonatées

car est fortement corrélé avec le HCO₃⁻ et NO₃⁻, ce qui témoigne aussi de la pollution par les eaux usées et la dissolution des formations carbonatées. L'axe F3 représente 11.81% et témoigne aussi de la pollution par les infiltrations des eaux d'irrigation.

Tableau.III.9. Analyse en composantes principales des variables.

| | F1 | F2 | F3 |
|-----------------|--------|--------|--------|
| Valeur propre | 4.054 | 1.337 | 0.945 |
| Variabilité (%) | 50.671 | 16.708 | 11.808 |
| % cumulé | 50.671 | 67.379 | 79.187 |

Tableau.III.10.Corrélations entre les variables et les facteurs

| | F1 | F2 | F3 |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Ca ⁺⁺ | 0.833 | -0.105 | -0.416 |
| Mg ⁺⁺ | 0.875 | 0.220 | 0.005 |
| Na ⁺ | 0.858 | -0.002 | 0.168 |
| K ⁺ | 0.608 | 0.180 | 0.663 |
| Cl ⁻ | 0.874 | 0.021 | 0.014 |
| SO ₄ ⁻⁻ | 0.819 | -0.117 | -0.170 |
| HCO ₃ ⁻ | -0.225 | 0.784 | 0.235 |
| NO ₃ ⁻ | 0.053 | 0.785 | -0.469 |

9.3 Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :

La représentation des observations dans l'arbre de classification ascendante hiérarchique (CAH) permet d'identifier une typologie des eaux à partir de leurs données chimiques (Tab.III.10). L'application de cette technique aux eaux échantillonnées montre l'existence de deux classes :

- (a) La classe 1 : comprend les eaux qui subissent des dissolutions des formations carbonatées où l'existence de l'infiltration des eaux usées.
- (b) La classe 2 : représente les eaux qui subissent des contaminations par les eaux d'irrigation.

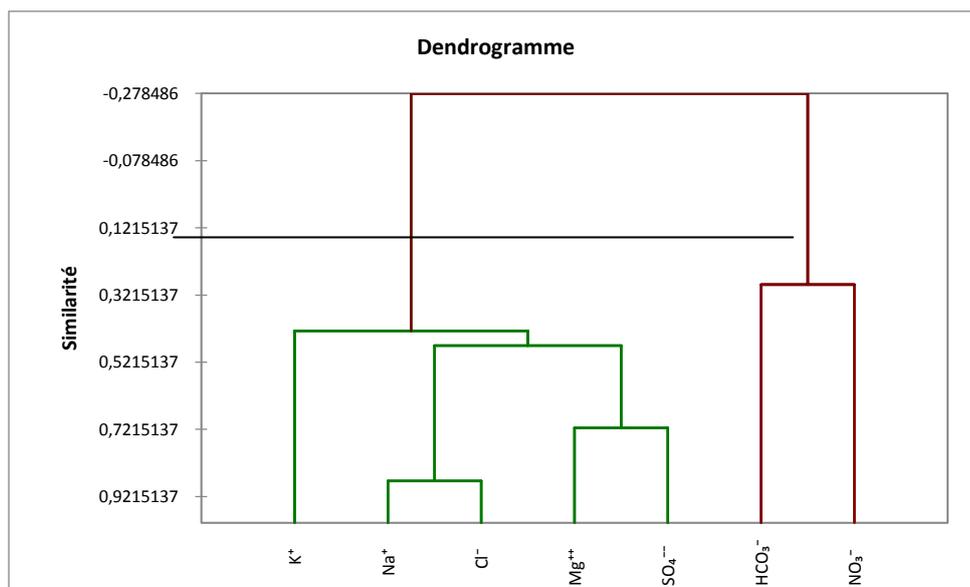


Fig.III.16. Classification hiérarchique des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées.

CONCLUSION :

L'analyse hydrochimique nous a permis de conclure que :

- Tous les paramètres physico-chimiques étaient conformes aux normes algériennes de potabilité, à l'exception de certains taux élevés en nitrates et en potassium dans quelques années.
- L'examen microbiologique des échantillons d'eau prélevés par les services de l'ADE, en date du 08/12/2021, révèle l'absence des germes infectieux. Nous pouvons conclure que les eaux de la source AIN FOUARA sont de bonne qualité bactériologique.
- Le diagramme de Piper a montré que tous les échantillons appartiennent à la famille bicarbonatée calcique et magnésienne, à l'exception de quelques-unes qui sont classées chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.
- L'estimation des eaux à des fins d'irrigation, en utilisant des indices, comme le pourcentage en Na^+ , et le KR a fait révéler que :
 - *Les eaux de la source, en calculant le % en Na^+ étaient de qualité bonne à excellente.
 - *Pour le KR, elles étaient classées de bonne qualité pour l'irrigation (KR inférieur à 1).
- D'après le diagramme de Wilcox, nous avons remarqué que toutes les eaux de la source étudiée appartiennent à la classe **excellente** pour l'irrigation, à l'exception de quelques échantillons qui sont de qualité **bonne** (N° 47, N° 48, N° 87, N° 97).
- Le diagramme de RIVERSIDE a montré deux classes :

* La majorité des échantillons d'eau s'inscrivent dans la classe : **C2-S1**, qualité bonne pour l'irrigation.

* Certains sont dans la classe **C3-S1**, représentés par les échantillons (N° 47, N° 48, N° 87, N° 97). Ils étaient admissibles pour l'irrigation.

L'analyse en composante principale a confirmé l'existence de deux facteurs (F1-F3) qui témoignent de la contamination par les eaux d'irrigation, tandis que le deuxième facteur est dû à la dissolution des formations carbonatées et aux infiltrations des eaux usées riches en nitrates. Aussi la classification ascendante hiérarchique a pu mettre en évidence, deux classes, l'une comprend les eaux qui subissent des dissolutions des formations carbonatées et l'existence de l'infiltration des eaux usées, l'autre représente les eaux qui subissent des contaminations par les eaux d'irrigation.

L'indice de saturation d'après PHREEQ C nous a montré la saturation par rapport à la calcite, la dolomite et à l'aragonite, ce qui confirme que l'encaissant de cette eau est une formation carbonatée.

CONCLUSION GENERALE

La compréhension de la minéralisation des eaux souterraines de la source d'Ain El Fouara supérieure est nécessaire pour gérer cette ressource, afin qu'elle puisse répondre aux besoins en eau actuels et futurs des utilisateurs.

Au terme de ce modeste travail, concernant la contribution à l'identification de l'origine de la minéralisation des eaux de la source d'Ain Fouara supérieure, nous avons conclu que :

Le secteur d'étude fait partie des piémonts- nords des Monts de Tlemcen. Il est caractérisé par un climat semi-aride à hiver tempéré avec :

- La température moyenne mensuelle est de 17.8 °C. Les mois de Juillet et d'Août sont les plus chauds, tandis que le mois de Janvier est le plus froid.
- La moyenne annuelle des précipitations est de 517 mm.
- La méthode des courbes pluvio-thermiques de Bagnouls et Gausson, nous permis de définir une période excédentaire allant du début septembre à la fin du mois de mai et une période déficitaire qui occupe les autres mois de l'année.

La synthèse des travaux géologiques effectués sur la région d'étude nous a permis de constater que le massif drainé par la source est un terrain karstique du Jurassique supérieur partiellement couvert par des terrains du Mio-Pio-Quaternaire, affecté d'une tectonique cassante.

La synthèse hydrogéologique nous a permis de constater que les formations calcaires et calcairo-dolomitiques du Jurassique supérieur forment les principales formations aquifères qui présentent un intérêt hydrogéologique dans le secteur d'étude.

L'étude hydrogéochimique portée sur les eaux de la source d'Ain Fouara supérieure a fait ressortir les résultats suivants:

- Tous les paramètres physico-chimiques étaient conformes aux normes algériennes de potabilité, à l'exception de certains taux élevés en nitrates et en potassium dans quelques années.
- L'examen microbiologique des échantillons d'eau prélevés par les services de l'ADE, en date du 08/12/2021, révèle l'absence des germes infectieux. Nous pouvons conclure que les eaux de la source AIN FOUARA sont de bonne qualité bactériologique.
- Le diagramme de Piper a montré que tous les échantillons appartiennent à la famille bicarbonatée calcique et magnésienne, à l'exception de quelques-unes qui sont classées chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.
- L'estimation des eaux à des fins d'irrigation, en utilisant des indices, comme le pourcentage en Na^+ , et le KR a fait révéler que :

*Les eaux de la source, en calculant le % en Na^+ étaient de qualité bonne à excellente.

*Pour le KR, elles étaient classées de bonne qualité pour l'irrigation (KR inférieur à 1).

➤ D'après le diagramme de Wilcox, nous avons remarqué que toutes les eaux de la source étudiée appartiennent à la classe **excellente** pour l'irrigation, à l'exception de quelques échantillons qui sont de qualité **bonne** (N° 47, N° 48, N° 87, N° 97).

➤ Le diagramme de RIVERSIDE a montré deux classes :

* La majorité des échantillons d'eau s'inscrivent dans la classe : **C2-S1**, qualité bonne pour l'irrigation.

* Certains sont dans la classe **C3-S1**, représentés par les échantillons (N° 47, N° 48, N° 87, N° 97). Ils étaient admissibles pour l'irrigation.

L'analyse en composante principale a confirmé l'existence de deux facteurs (F1-F3) qui témoignent de la contamination par les eaux d'irrigation, tandis que le deuxième facteur est dû à la dissolution des formations carbonatées et aux infiltrations des eaux usées riches en nitrates. Aussi la classification ascendante hiérarchique a pu mettre en évidence, deux classes, l'une comprend les eaux qui subissent des dissolutions des formations carbonatées et l'existence de l'infiltration des eaux usées, l'autre représente les eaux qui subissent des contaminations par les eaux d'irrigation.

L'indice de saturation d'après PHREEQ C nous a montré la saturation par rapport à la calcite, la dolomite et à l'aragonite, ce qui confirme que l'encaissant de cette eau est une formation carbonatée.

Recommandations :

A la fin de cette étude, nous proposons quelques recommandations, afin de mieux préserver et gérer la source d'Ain Fouara, du point de vue qualité et quantité :

- Rénovation de la station de prétraitement qui existe pour la rendre fonctionnaire en pleine capacité.
- Etablir un périmètre de protection éloigné de la source, afin de la protéger de tout type de pollution qui la menace et faire une enquête sur terrain, pour rechercher les sources de pollution et lutter contre ces dernières.
- Sensibiliser les gens et valorisation de cette ressource.
- Une surveillance quantitative et qualitative continue des eaux de la source, tout au long de l'année, pour voir l'évolution de son débit et des paramètres indicateurs de pollution.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **ABLAOUI Halima (2013)**- Structure et fonctionnement de trois émergences karstiques des Monts de Tlemcen à partir des réponses hydrogéologiques et hydrochimiques (période du 12/12/2005 au 16/01/2007). Mém. Magister, Univ. Oran, 169 p.
- **BELOUAFI Asma & KHEDIM Sanaâ(2021)**-Contribution à l'étude de l'évolution de la qualité physico-chimique des eaux de la source d'Ain El Houtz (Tlemcen, Ouest algérien). Mém. Master 2. Univ. Tlemcen, 85p.
- **BENEST Michel et ELMI Serge (1969)**- Précisions stratigraphiques sur le Jurassique inférieur et moyen de la partie méridionale des Monts de Tlemcen (Algérie). C.R. Géol. France, Paris, fasc.8
- **BENEST Michel (1985)**- Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et de début du Crétacé : stratigraphie ; milieu de dépôt et dynamique sédimentaire. Thèse Doc. Lab. Géol. Univ. Lyon.
- BENSAOULA Fouzia (2006)**- Karstification, hydrogéologie et vulnérabilité des eaux karstiques, mise au point d'outil pour leur protection (application au Monts de Tlemcen Ouest Oranais). Thèse. Doc. Univ. Tlemcen, 184 p.
- BOUANANI Abderrezak, (2004)**-Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérien). Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen.250p.
- BOUGUERRA Sid Ahmed (2014)**- Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (Tlemcen).Thèse. Magister. Univ. Tlemcen. 165p.
- **COLLIGNON Bernard (1986)**- Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Tome 1). Thèse. Doc. Univ. d'Avignon. 216p.
- **HAYANE Sidi Mohamed (1983)**- Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Sikkak (région de Tlemcen). Thèse. Doc. 3 ème cycle, Univ. Oran, 236 p.
- KEDDAH Karima et MEDJAHEDI Naïma (2018)**- Contribution à l'étude physico-chimique de quelques sources dans le groupement urbain de Tlemcen, Mémoire. Master, 128p.
- **KEROUCHE Abderrahim et GUNCHI Lahcene (2008)**- Inventaire des sources captées du grand Tlemcen, étude hydrogéologique et hydrochimique. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 68 p.
- **MEDJAHEDI Naima (2010)** - Interaction des paramètres climatiques -application à l'Atlas Tellien Occidental - Algérie. Mém. Ing. sci. Terre, Univ. Tlemcen, 144 p.
- **NEBIA Riad et SOUFI MERZOUK Sofiane (2005)**- Etude de la source d'AIN FOUARA «SUP» hydrogéologie et pollution. Mém. Ing. Univ. Tlemcen, 65 p.
- **RODIER Jean (1996)**- L'analyse de l'eau : eaux naturelles. 6ème édition, Dunod, Paris, 1345p.

- **RODIER Jean (1999)**- L'analyse de l'eau : eaux naturelles. 7ème édition, Dunod, Paris, 1366.
- **RODIER Jean (2005)**- L'analyse de l'eau : eaux naturelles. 8ème édition, Dunod, Paris, 1383p.
- **RODIER Jean (2009)**- L'analyse de l'eau : eaux naturelles. 9ème édition, Dunod, Paris, 1391p.
- **SFERDJLI Fouzia (2016)**- Les périmètres de protection des ouvrages de captages des eaux souterraines, bibliographie et étude de cas. Mém. Master, Univ. Tlemcen, 89 p.
- SOLTANI Wafaâ (2013)**- Gestion des ressources en eau dans le groupement urbain de Tlemcen- Bilan et perspectives. Mém. Master, 77 p.

Site internet :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Tlemcen
 - Google Map.

Carte consultées :

-Carte géologique de Tlemcen, au 1/50000.Doumergue.1922

Logiciels :

-Diagrammes version 6.57.
 -XLSTAT
 - Map info

Annexes

Tableau .1 : Précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Tlemcen (1995-2020).

| Mois Année | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août |
|---------------|-----------|---------|----------|----------|---------|---------|-------|--------|-------|------|---------|------|
| 1995-1996 | 15,6 | 43,4 | 20,7 | 82,5 | 123,4 | 106,1 | 119,9 | 52,1 | 54,9 | 21,0 | 10,8 | 9,8 |
| 1996-1997 | 36,2 | 26,9 | 0,2 | 39,2 | 119,6 | 0,1 | 15,4 | 104,0 | 16,3 | 2,8 | 18,0 | 31,0 |
| 1997-1998 | 54,4 | 29,4 | 73,3 | 100,5 | 39,2 | 52,2 | 62,2 | 34,5 | 79,4 | 0,8 | 0,0 | 2,3 |
| 1998-1999 | 14,1 | 6,9 | 46,4 | 16,9 | 164,0 | 94,4 | 120,8 | 0,0 | 0,4 | 7,4 | 0,5 | 2,7 |
| 1999-2000 | 40,4 | 34,1 | 93,7 | 105,2 | 0,0 | 0,0 | 2,4 | 26,6 | 36,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2000-2001 | 21,6 | 108,9 | 68,0 | 47,9 | 84,2 | 80,2 | 7,9 | 10,0 | 28,6 | 7,8 | 0,0 | 0,0 |
| 2001-2002 | 43,7 | 51,4 | 158,2 | 35,1 | 2,3 | 14,8 | 40,0 | 120,6 | 78,0 | 0,7 | 0,0 | 32,8 |
| 2002-2003 | 0,0 | 45,2 | 105,2 | 30,8 | 172,3 | 103,4 | 19,6 | 49,5 | 14,1 | 5,8 | 0,0 | 0,4 |
| 2003-2004 | 14,2 | 72,3 | 63,8 | 139,4 | 50,3 | 25,5 | 115,0 | 49,2 | 90,7 | 14,9 | 3,3 | 3,7 |
| 2004-2005 | 1,8 | 32,2 | 44,5 | 88,7 | 26,6 | 71,4 | 72,1 | 27,4 | 5,2 | 5,1 | 0,0 | 1,0 |
| 2005-2006 | 20,5 | 31,7 | 56,4 | 49,0 | 79,3 | 95,7 | 32,0 | 39,3 | 74,5 | 1,9 | 5,5 | 0,0 |
| 2006-2007 | 36,6 | 15,7 | 7,9 | 71,7 | 29,8 | 46,3 | 52,8 | 127,0 | 15,2 | 0,0 | 0,0 | 0,8 |
| 2007-2008 | 21,5 | 93,7 | 66,6 | 14,0 | 34,7 | 22,1 | 20,1 | 24,0 | 71,1 | 7,2 | 1,3 | 0,0 |
| 2008-2009 | 58,7 | 97,6 | 106,9 | 202,3 | 175,7 | 50,2 | 39,5 | 54,5 | 21,7 | 5,5 | 4,5 | 0,2 |
| 2009-2010 | 95,3 | 2,0 | 59,0 | 60,9 | 64,5 | 82,0 | 118,7 | 50,9 | 40,1 | 20,6 | 0,8 | 11,1 |
| 2010-2011 | 24,3 | 98,7 | 61,5 | 45,4 | 47,6 | 53,0 | 28,0 | 93,4 | 102,6 | 20,2 | 0,0 | 10,0 |
| 2011-2012 | 6,5 | 123,7 | 122,1 | 35,3 | 21,6 | 72,1 | 33,1 | 47,0 | 14,7 | 2,3 | 5,4 | 8,2 |
| 2012-2013 | 21,6 | 50,7 | 309,2 | 18,6 | 160,8 | 113,5 | 100,8 | 45,6 | 74,9 | 0,0 | 2,2 | 4,5 |
| 2013-2014 | 43,6 | 0,0 | 61,3 | 198,5 | 129,4 | 84,6 | 64,9 | 19,2 | 26,8 | 30,1 | 0,2 | 0,0 |
| 2014-2015 | 28,7 | 13,5 | 71,8 | 145,2 | 80,3 | 98,9 | 33,5 | 11,3 | 63,0 | 2,4 | 0,8 | 16,2 |
| 2015-2016 | 21,0 | 48,7 | 31,5 | 0,0 | 52,8 | 151,9 | 80,3 | 137,5 | 30,6 | 4,5 | 1,5 | 1,1 |
| 2016-2017 | 29,5 | 48,9 | 77,5 | 71,6 | 79,0 | 67,5 | 56,1 | 53,5 | 44,7 | 7,7 | 2,6 | 6,5 |
| 2017-2018 | 1,0 | 15,0 | 7,6 | 34,8 | 38,6 | 31,2 | 80,8 | 77,0 | 15,3 | 8,6 | 0,0 | 0,5 |
| 2018-2019 | 15,24 | 79,24 | 35,81 | 2,03 | 63,23 | 10,92 | 6,35 | 34,55 | 26,23 | 0,25 | 8,12 | 1,02 |
| 2019-2020 | 8,39 | 55,87 | 59,69 | 24,63 | 17,53 | 0 | 8,88 | 108,72 | 28,19 | 0 | 0,25 | 2,03 |

Source : A.N.R.H (1995/2017), complété par le site Tutiempo.

Tableau.2 : Températures moyennes mensuelles enregistrées à la station de Tlemcen (1995- 2020).

| Mois Année | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août |
|---------------|-----------|---------|----------|----------|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|
| 1995-1996 | 20,8 | 19,5 | 16,5 | 13,2 | 12,3 | 9,5 | 12,5 | 14,7 | 17,2 | 23 | 25 | 24,6 |
| 1996-1997 | 20,7 | 17,2 | 14,3 | 12,6 | 11,5 | 12,9 | 14 | 16,1 | 17,9 | 21,6 | 23,3 | 24,8 |
| 1997-1998 | 21,1 | 16,9 | 13,5 | 11,5 | 11,9 | 13,7 | 13,9 | 15,3 | 20,9 | 25,2 | 26,6 | 26,9 |
| 1998-1999 | 21,2 | 15,6 | 12,4 | 10,2 | 9,7 | 11,1 | 15,3 | 18,5 | 21,6 | 25 | 25,9 | 26,5 |
| 1999-2000 | 21,7 | 20,5 | 12,5 | 10 | 9,1 | 13,4 | 13,7 | 14,5 | 18,9 | 24,3 | 26,3 | 27,1 |
| 2000-2001 | 22,9 | 17,1 | 13,7 | 13,4 | 11,5 | 11,5 | 16 | 15,7 | 17,9 | 25 | 26,5 | 27,1 |
| 2001-2002 | 22,9 | 21,8 | 12,6 | 11,1 | 10,9 | 12,7 | 14 | 14,4 | 17,9 | 23,9 | 25,5 | 24,4 |
| 2002-2003 | 22,3 | 19,3 | 14,3 | 12,5 | 8,8 | 9,7 | 13,9 | 15,2 | 16,2 | 24,9 | 28,2 | 27,7 |
| 2003-2004 | 23,8 | 19,8 | 14,9 | 11,4 | 11,9 | 12,5 | 12,9 | 14,6 | 15,6 | 24 | 27,5 | 27,9 |
| 2004-2005 | 24,9 | 21,5 | 13,2 | 10,8 | 8,4 | 8,2 | 12,3 | 14,3 | 20,4 | 24,3 | 26,7 | 27,1 |
| 2005-2006 | 22,2 | 19,9 | 13,7 | 10,4 | 9,5 | 9,9 | 13,9 | 17,7 | 20,1 | 23 | 28,1 | 26,6 |
| 2006-2007 | 23,4 | 21,6 | 17,1 | 10,9 | 11,6 | 12,3 | 12,3 | 13,1 | 18,5 | 21,5 | 25,7 | 26,9 |
| 2007-2008 | 23 | 18,4 | 13,8 | 10,2 | 10,3 | 11,3 | 11,7 | 16,7 | 16,3 | 21,9 | 26,7 | 27 |
| 2008-2009 | 22,8 | 18,2 | 11,2 | 8,6 | 8,3 | 9,5 | 12,4 | 14 | 19,9 | 24,3 | 28,4 | 26,5 |
| 2009-2010 | 21,5 | 20,1 | 17,5 | 13,3 | 11,1 | 12,8 | 13,1 | 15,4 | 17 | 20,9 | 27,8 | 27,7 |
| 2010-2011 | 24,1 | 18,5 | 13,5 | 8,4 | 10,5 | 9,5 | 11,8 | 16,4 | 18,6 | 22,5 | 26,5 | 26 |
| 2011-2012 | 24,3 | 20,7 | 15,1 | 10,6 | 9,6 | 7,9 | 12 | 13,7 | 20,4 | 25,1 | 26,7 | 29,3 |
| 2012-2013 | 24,1 | 19,6 | 14,8 | 11,7 | 10,9 | 9,6 | 13,5 | 14,3 | 16,6 | 20,6 | 24,8 | 26,2 |
| 2013-2014 | 23,1 | 21 | 12,8 | 10,5 | 11,4 | 11,3 | 12,2 | 17,1 | 19,4 | 20,7 | 24,7 | 26 |
| 2014-2015 | 22,6 | 21,4 | 15,8 | 10,6 | 12,3 | 12,1 | 12,9 | 16,8 | 19,6 | 20,8 | 22 | 22,7 |
| 2015-2016 | 22,9 | 20,1 | 14,4 | 11,9 | 13 | 13,1 | 12,6 | 15,9 | 19 | 23,7 | 26,2 | 26,4 |
| 2016-2017 | 24,1 | 20,8 | 15,1 | 12,1 | 9 | 13,1 | 14,2 | 16,3 | 20,2 | 24,8 | 26,7 | 26,9 |
| 2017-2018 | 23,4 | 20 | 13,9 | 10,8 | 11 | 10,1 | 14 | 14,9 | 17,4 | 21,9 | 25,6 | 27,1 |
| 2018-2019 | 24,1 | 18,7 | 14,1 | 11,69 | 9,9 | 10,6 | 13,4 | 15,5 | 20,1 | 22 | 25,9 | 26,7 |
| 2019-2020 | 23,6 | 19,4 | 14,5 | 12,8 | 9,2 | 12,6 | 15,4 | 17,5 | 22,8 | 23,4 | 27 | 27,5 |

Source : A.N.R.H (1995/2017), complété par le site Tutiempo.

Tableau N° 3 : balance ionique

| N° échantillons | BI | N° échantillons | BI |
|-----------------|----|-----------------|----|
| 1 | 3% | 75 | |
| 2 | 4% | 76 | 0% |
| 3 | 4% | 77 | 3% |
| 4 | 2% | 78 | 0% |
| 5 | 0% | 79 | 0% |
| 6 | 4% | 80 | 0% |
| 7 | 1% | 81 | 0% |
| 8 | 1% | 82 | 3% |
| 9 | 4% | 83 | 0% |
| 10 | 5% | 84 | 3% |
| 11 | 0% | 85 | 3% |
| 12 | 5% | 86 | 2% |
| 13 | 1% | 87 | 2% |
| 14 | 3% | 88 | 4% |
| 15 | 3% | 89 | 1% |
| 16 | 2% | 90 | 0% |
| 17 | 2% | 91 | 2% |
| 18 | 5% | 92 | 1% |
| 19 | 3% | 93 | 0% |
| 20 | 3% | 94 | 3% |
| 21 | 0% | 95 | 2% |
| 22 | 5% | 96 | 2% |
| 23 | 1% | 97 | 1% |
| 24 | 3% | 98 | 1% |
| 25 | 2% | 99 | 3% |
| 26 | 4% | 100 | 3% |
| 27 | 3% | 101 | 4% |
| 28 | 1% | 102 | 0% |
| 29 | 2% | 103 | 1% |
| 30 | 0% | 104 | 4% |
| 31 | 4% | 105 | 5% |
| 32 | 4% | 106 | 3% |
| 33 | 2% | 107 | 4% |
| 34 | 1% | 108 | 0% |
| 35 | 2% | 109 | 0% |
| 36 | 2% | 110 | 2% |
| 37 | 3% | 111 | 5% |
| 38 | 3% | 112 | 2% |
| 39 | 1% | 113 | 4% |
| 40 | 2% | 114 | 5% |
| 41 | 1% | 115 | 4% |
| 42 | 0% | 116 | 3% |
| 43 | 2% | 117 | 2% |
| 44 | 1% | 118 | 3% |
| 45 | 3% | 119 | 5% |
| 46 | 3% | 120 | 5% |
| 47 | 1% | 121 | 0% |
| 48 | 3% | 122 | 1% |
| 49 | 1% | 123 | 0% |
| 50 | 1% | 124 | 3% |
| 51 | 3% | 125 | 5% |
| 52 | 1% | 126 | 4% |
| 53 | 0% | 127 | 0% |
| 54 | 4% | 128 | 1% |
| 55 | 1% | 129 | 3% |
| 56 | 3% | 130 | 3% |

| | | | |
|----|----|-----|----|
| 57 | 1% | 131 | 3% |
| 58 | 1% | 132 | 4% |
| 59 | 1% | 133 | 4% |
| 60 | 4% | 134 | 2% |
| 61 | 3% | 135 | 0% |
| 62 | 1% | 136 | 4% |
| 63 | 0% | 137 | 1% |
| 64 | 1% | 138 | 1% |
| 65 | 3% | 139 | 4% |
| 67 | 5% | 140 | 3% |
| 68 | 1% | 141 | 5% |
| 69 | 2% | 142 | 4% |
| 70 | 2% | 143 | 0% |
| 71 | 1% | 144 | 1% |
| 72 | 3% | 145 | 3% |
| 73 | 2% | 146 | 3% |
| 74 | 3% | | |

Tableau .4 : Normes algériennes des paramètres physico-chimiques.

| Paramètre | Unité | Concentration maximale admissible |
|---------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Calcium | mg/L | 200 |
| Magnésium | mg/L | 150 |
| Sodium | mg/L | 200 |
| Chlorures | mg/L | 500 |
| Potassium | mg/L | 12 |
| Sulfates | mg/L | 400 |
| Nitrates | mg/L | 50 |
| Résidu sec | mg/L après séchage à 105°C | 1500 |
| pH | - | ≥ 6.5 et ≤ 9 |
| Conductivité | µS/cm à 20°C | 2800 |
| Dureté totale | mg/L CaCO ₃ | 200 |

Tableau.5 : Classification des eaux selon l'indice de Kelly's Ratio.

| Date | KR | Date | KR | Date | KR | Date | KR |
|----------|------|-----------|------|----------|------|----------|------|
| 13/03/99 | 0,09 | 13/03/100 | 0,11 | 02/10/04 | 0,16 | 03/03/07 | 0,09 |
| 05/04/99 | 0,11 | 18/06/01 | 0,14 | 13/12/04 | 0,12 | 07/04/07 | 0,07 |
| 11/05/99 | 0,06 | 01/07/01 | 0,05 | 09/01/05 | 0,31 | 02/05/07 | 0,07 |
| 01/06/99 | 0,05 | 01/08/01 | 0,14 | 12/02/05 | 0,11 | 02/06/07 | 0,07 |
| 07/07/99 | 0,05 | 01/09/01 | 0,05 | 01/03/05 | 0,10 | 07/07/07 | 0,07 |
| 28/07/99 | 0,08 | 01/10/01 | 0,06 | 12/04/05 | 0,08 | 04/11/07 | 0,05 |
| 08/09/99 | 0,10 | 02/12/01 | 0,05 | 09/05/05 | 0,10 | 03/12/07 | 0,16 |
| 09/10/99 | 0,18 | 07/01/02 | 0,10 | 13/06/05 | 0,15 | 02/01/08 | 0,08 |
| 14/11/99 | 0,11 | 11/02/02 | 0,08 | 10/09/05 | 0,09 | 02/02/08 | 0,11 |
| 01/12/99 | 0,05 | 02/03/02 | 0,06 | 08/10/05 | 0,18 | 01/03/08 | 0,09 |
| 22/12/99 | 0,12 | 23/04/02 | 0,16 | 13/11/05 | 0,08 | 01/04/08 | 0,05 |
| 04/01/00 | 0,11 | 08/05/02 | 0,17 | 11/12/05 | 0,07 | 12/05/08 | 0,13 |
| 01/03/00 | 0,12 | 08/06/02 | 0,07 | 12/02/06 | 0,13 | 16/06/08 | 0,07 |
| 01/04/00 | 0,09 | 02/07/02 | 0,19 | 04/03/06 | 0,08 | 02/07/08 | 0,07 |

| | | | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| 03/05/00 | 0,12 | 03/08/02 | 0,36 | 02/04/06 | 0,11 | 18/08/08 | 0,08 |
| 03/06/00 | 0,06 | 01/10/03 | 0,09 | 02/05/06 | 0,09 | 15/09/08 | 0,10 |
| 01/07/00 | 0,15 | 02/11/03 | 0,17 | 05/06/06 | 0,11 | 03/11/08 | 0,06 |
| 05/09/00 | 0,11 | 03/01/04 | 0,10 | 02/07/06 | 0,13 | 06/12/08 | 0,06 |
| 01/10/00 | 0,06 | 03/02/04 | 0,09 | 17/09/06 | 0,11 | 04/02/09 | 0,10 |
| 04/11/00 | 0,08 | 01/03/04 | 0,15 | 02/10/06 | 0,07 | 03/03/09 | 0,13 |
| 02/12/00 | 0,09 | 06/04/04 | 0,12 | 08/10/06 | 0,06 | 04/04/09 | 0,07 |
| 02/01/01 | 0,08 | 03/05/04 | 0,95 | 02/11/06 | 0,07 | 04/05/09 | 0,22 |
| 03/02/01 | 0,10 | 01/06/04 | 0,57 | 04/11/06 | 0,07 | 02/06/09 | 0,10 |
| 04/03/01 | 0,21 | 11/07/04 | 0,15 | 03/01/07 | 0,23 | 04/07/09 | 0,12 |
| 01/04/01 | 0,07 | 08/09/04 | 0,10 | 06/02/07 | 0,08 | 06/09/09 | 0,18 |
| 05/10/09 | 0,15 | 07/06/10 | 0,16 | 05/04/11 | 0,05 | 01/02/12 | 0,07 |
| 04/11/09 | 0,25 | 01/07/10 | 0,14 | 08/05/11 | 0,05 | 01/03/12 | 0,08 |
| 02/12/09 | 0,16 | 05/08/10 | 0,10 | 05/06/11 | 0,06 | 01/04/12 | 0,07 |
| 14/01/10 | 0,11 | 12/09/10 | 0,07 | 06/07/11 | 0,05 | 03/05/12 | 0,07 |
| 02/02/10 | 0,20 | 06/10/10 | 0,09 | 08/08/11 | 0,07 | 03/06/12 | 0,15 |
| 01/03/10 | 0,10 | 02/11/10 | 0,06 | 08/09/11 | 0,16 | 01/07/12 | 0,08 |
| 04/04/10 | 0,08 | 05/12/10 | 0,07 | 05/10/11 | 0,08 | 02/09/12 | 0,06 |
| 04/05/10 | 0,09 | 09/01/11 | 0,07 | 03/11/11 | 0,11 | 02/10/12 | 0,09 |
| 04/04/10 | 0,08 | 06/02/11 | 0,09 | 04/12/11 | 0,06 | 04/11/12 | 0,05 |
| 04/05/10 | 0,09 | 07/03/11 | 0,08 | 02/01/12 | 0,09 | 02/12/12 | 0,08 |

Tableau .6 : Classification des eaux d'irrigation, selon le pourcentage en sodium.

| Date | Na % | qualité | Date | Na % | qualité | Date | Na % | qualité |
|------------|------|----------------|------------|------|----------------|------------|------|----------------|
| 13/03/1999 | 15,5 | Eau très bonne | 02/03/2002 | 18,9 | Eau très bonne | 17/09/2006 | 7,73 | Eau très bonne |
| 05/04/1999 | 27 | Eau bonne | 23/04/2002 | 55,8 | Eau admissible | 02/10/2006 | 11,6 | Eau très bonne |
| 11/05/1999 | 17,2 | Eau très bonne | 08/05/2002 | 49,4 | Eau admissible | 08/10/2006 | 17 | Eau très bonne |
| 01/06/1999 | 13 | Eau très bonne | 08/06/2002 | 37,7 | Eau bonne | 02/11/2006 | 11,3 | Eau très bonne |
| 07/07/1999 | 8,57 | Eau très bonne | 02/07/2002 | 21,7 | Eau bonne | 04/11/2006 | 11,2 | Eau très bonne |
| 28/07/1999 | 10,9 | Eau très bonne | 03/08/2002 | 13 | Eau très bonne | 03/01/2007 | 21,9 | Eau bonne |
| 08/09/1999 | 13,6 | Eau très bonne | 01/10/2003 | 22,7 | Eau bonne | 06/02/2007 | 21,4 | Eau bonne |
| 09/10/1999 | 16,8 | Eau très bonne | 02/11/2003 | 14,6 | Eau très bonne | 05/04/2011 | 22,7 | Eau bonne |
| 14/11/1999 | 13,4 | Eau très bonne | 03/01/2004 | 13,9 | Eau très bonne | 08/05/2011 | 29,5 | Eau bonne |
| 01/12/1999 | 7,24 | Eau très bonne | 03/02/2004 | 12,5 | Eau très bonne | 05/06/2011 | 17,8 | Eau très bonne |
| 22/12/1999 | 12,9 | Eau très bonne | 01/03/2004 | 15,9 | Eau très bonne | 06/07/2011 | 18,2 | Eau très bonne |
| 04/01/2000 | 14,6 | Eau très bonne | 06/04/2004 | 19,6 | Eau très bonne | 08/08/2011 | 14,6 | Eau très bonne |
| 01/03/2000 | 14,6 | Eau très bonne | 03/05/2004 | 21,7 | Eau bonne | 08/09/2011 | 26,2 | Eau bonne |

| | | | | | | | | |
|------------|------|----------------|------------|------|----------------|------------|------|----------------|
| | | | | | | 1 | | |
| 01/04/2000 | 11,4 | Eau très bonne | 01/06/2004 | 13,7 | Eau très bonne | 05/10/2011 | 23,7 | Eau bonne |
| 03/05/2000 | 15,2 | Eau très bonne | 11/07/2004 | 13,1 | Eau très bonne | 03/11/2011 | 14,8 | Eau très bonne |
| 03/06/2000 | 17,4 | Eau très bonne | 08/09/2004 | 17,1 | Eau très bonne | 04/12/2011 | 12,7 | Eau très bonne |
| 01/07/2000 | 17,1 | Eau très bonne | 07/06/2010 | 12,3 | Eau très bonne | 02/01/2012 | 13,4 | Eau très bonne |
| 05/09/2000 | 8,41 | Eau très bonne | 01/07/2010 | 16,5 | Eau très bonne | 03/03/2007 | 6,96 | Eau très bonne |
| 01/10/2000 | 10,7 | Eau très bonne | 05/08/2010 | 15,3 | Eau très bonne | 07/04/2007 | 9,09 | Eau très bonne |
| 04/11/2000 | 13,3 | Eau très bonne | 12/09/2010 | 17,8 | Eau très bonne | 02/05/2007 | 7,87 | Eau très bonne |
| 02/12/2000 | 11,7 | Eau très bonne | 06/10/2010 | 16,3 | Eau très bonne | 02/06/2007 | 9,55 | Eau très bonne |
| 02/01/2001 | 23,4 | Eau bonne | 02/11/2010 | 14,1 | Eau très bonne | 07/07/2007 | 7,34 | Eau très bonne |
| 03/02/2001 | 15,9 | Eau très bonne | 05/12/2010 | 10,2 | Eau très bonne | 04/11/2007 | 9,01 | Eau très bonne |
| 04/03/2001 | 9,5 | Eau très bonne | 09/01/2011 | 8,31 | Eau très bonne | 03/12/2007 | 18,3 | Eau très bonne |
| 01/04/2001 | 16 | Eau très bonne | 06/02/2011 | 9,93 | Eau très bonne | 02/01/2008 | 12,5 | Eau très bonne |
| 05/10/2009 | 22,9 | Eau admissible | 07/03/2011 | 9,93 | Eau très bonne | 02/02/2008 | 10,2 | Eau très bonne |
| 04/11/2009 | 9,21 | Eau très bonne | 02/10/2004 | 31,5 | Eau bonne | 01/03/2008 | 11,5 | Eau très bonne |
| 02/12/2009 | 15,1 | Eau très bonne | 13/12/2004 | 13,3 | Eau très bonne | 01/04/2008 | 22 | Eau admissible |
| 14/01/2010 | 9,21 | Eau très bonne | 09/01/2005 | 11 | Eau très bonne | 12/05/2008 | 12,3 | Eau très bonne |
| 02/02/2010 | 6,78 | Eau très bonne | 12/02/2005 | 9,64 | Eau très bonne | 16/06/2008 | 10,8 | Eau très bonne |
| 04/04/2010 | 13,6 | Eau très bonne | 12/04/2005 | 8,63 | Eau très bonne | 18/08/2008 | 11,1 | Eau très bonne |
| 04/05/2010 | 10,7 | Eau très bonne | 09/05/2005 | 8,2 | Eau très bonne | 15/09/2008 | 9,37 | Eau très bonne |
| 04/04/2010 | 20 | Eau très bonne | 13/06/2005 | 7,51 | Eau très bonne | 03/11/2008 | 13,2 | Eau très bonne |
| 04/05/2010 | 9,25 | Eau très bonne | 10/09/2005 | 22,5 | Eau bonne | 06/12/2008 | 20,3 | Eau bonne |
| 13/03/100 | 37,6 | Eau bonne | 08/10/2005 | 12,8 | Eau très bonne | 04/02/2009 | 12,1 | Eau très bonne |
| 18/06/2001 | 11,7 | Eau très bonne | 13/11/2005 | 12,5 | Eau très bonne | 03/03/2009 | 15,1 | Eau très bonne |
| 01/07/2001 | 19,4 | Eau très bonne | 11/12/2005 | 11,4 | Eau très bonne | 04/04/2009 | 21,2 | Eau bonne |
| 01/08/2001 | 12,9 | Eau très bonne | 12/02/2006 | 5,53 | Eau très bonne | 02/09/2012 | 14 | Eau très bonne |
| 01/09/2001 | 18,9 | Eau très bonne | 04/03/2006 | 18,6 | Eau très bonne | 02/10/2012 | 11,5 | Eau très bonne |
| 01/10/2001 | 17,1 | Eau très bonne | 02/04/2006 | 9,71 | Eau très bonne | 04/11/2012 | 8,11 | Eau très bonne |
| 02/12/2001 | 55,9 | Eau admissible | 02/05/2006 | 9,37 | Eau très bonne | 02/12/2012 | 11,5 | Eau très bonne |
| 07/01/2002 | 46,6 | Eau admissible | 05/06/2006 | 12,2 | Eau très bonne | | | |
| 11/02/2002 | 49,2 | Eau admissible | 02/07/2006 | 8,52 | Eau très bonne | | | |

Tableau.7: Classification des eaux d'irrigation d'après Servant, 1975 (U.S SalinityLab).

| Degré | Qualité | Classe | Description |
|-------|------------|-------------------------|--|
| 1 | Excellente | C1-S1 | Eau utilisable sans danger dans l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols |
| 2 | Bonne | C2-S1 C2-S2 | En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à forte capacité d'échanges d'ions (sols argileux). |
| 3 | Admissible | C3-S1 | En général, eau convenant à l'irrigation cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité. |
| 4 | Médiocre | C4-S1 C4-S2 C3-S3 | En général eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés. |
| 5 | Mauvaise | C3-S4 C4-S3 C4-S4 | Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisées sous certaines conditions sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel. |

Tableau.8: Indice de saturation d'après PHREEQ C.

| No | DATE | Anhydrite | Aragonite | Calcite | Dolomite | Gypsum |
|----|----------|-----------|-----------|---------|----------|--------|
| 1 | 13/03/99 | -2.55 | 0.42 | 0.56 | 1.57 | -2.33 |
| 2 | 05/04/99 | -2.42 | 0.32 | 0.47 | 1.67 | -2.20 |
| 3 | 11/05/99 | -2.49 | 0.22 | 0.37 | 1.40 | -2.27 |
| 4 | 01/06/99 | -2.40 | 0.17 | 0.31 | 1.17 | -2.18 |
| 5 | 07/07/99 | -2.45 | 0.78 | 0.92 | 2.07 | -2.23 |
| 6 | 28/07/99 | -2.41 | 0.28 | 0.96 | 2.11 | -2.19 |
| 7 | 08/09/99 | -2.47 | 0.72 | 0.86 | 1.94 | -2.25 |
| 8 | 09/10/99 | -1.95 | 0.90 | 1.04 | 1.71 | -1.73 |
| 9 | 14/11/99 | -2.58 | 0.50 | 0.64 | 1.31 | -2.36 |
| 10 | 01/12/99 | -2.49 | 0.92 | 1.06 | 2.16 | -2.27 |
| 11 | 22/12/99 | -2,49 | 0,92 | 0,59 | 1,3 | -2,16 |
| 12 | 04/01/00 | -2,56 | 0,36 | 0,5 | 1,07 | -2,34 |
| 13 | 01/03/00 | -2,52 | 0,62 | 0,76 | 1,84 | -2,3 |
| 14 | 01/04/00 | -2,02 | 0,56 | 0,71 | 1,49 | -1,8 |
| 15 | 03/05/00 | -2,21 | 0,18 | 0,32 | 0,8 | -1,99 |
| 16 | 03/06/00 | -2,65 | 0,66 | 0,8 | 1,82 | -2,43 |
| 17 | 01/07/00 | -2,26 | 0,71 | 0,86 | 1,94 | -2,04 |
| 18 | 05/09/00 | -2,25 | 1,23 | 1,37 | 2,92 | -2,03 |
| 19 | 01/10/00 | -2,36 | 0,19 | 0,33 | 1,01 | -2,14 |
| 20 | 04/11/00 | -2,61 | 0,61 | 0,75 | 1,57 | -2,39 |

| | | | | | | |
|----|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | 02/12/00 | -2,68 | 0,13 | 0,27 | 0,8 | -2,46 |
| 22 | 02/01/01 | -2,51 | 0,19 | 0,33 | 1,16 | -2,29 |
| 23 | 03/02/01 | -2,87 | 0,44 | 0,58 | 1,47 | -2,65 |
| 24 | 04/03/01 | -2,67 | 0,78 | 0,92 | 1,73 | -2,45 |
| 25 | 01/04/01 | -3,31 | 0,08 | 0,22 | 0,76 | -3,09 |
| 26 | 05/10/09 | -2,32 | 0,76 | 0,9 | 1,75 | -2,1 |
| 27 | 04/11/09 | -1,91 | -0,84 | -0,69 | -1,27 | -1,69 |
| 28 | 02/12/09 | -2,01 | -0,19 | -0,04 | 0,15 | -1,8 |
| 29 | 14/01/10 | -2,55 | -0,08 | 0,06 | 0,23 | -2,33 |
| 30 | 02/02/10 | -2,05 | 0,16 | 0,31 | 0,8 | -1,83 |
| 31 | 01/03/10 | -3,08 | -0,29 | -0,14 | 0,9 | -2,86 |
| 32 | 04/04/10 | -2,77 | 0,49 | 0,64 | 1,38 | -2,55 |
| 33 | 04/05/10 | -1,95 | 0,38 | 0,52 | 1,08 | -1,73 |
| 34 | 04/04/10 | -2,31 | 0,35 | 0,5 | 1,37 | -2,09 |
| 35 | 04/05/10 | -2,46 | 0,27 | 0,41 | 1,09 | -2,24 |
| 36 | 13/03/100 | -2,25 | 0,92 | 1,07 | 2,24 | -2,03 |
| 37 | 18/06/01 | -2,31 | 0,68 | 0,82 | 1,7 | -2,09 |
| 38 | 01/07/01 | -2,48 | -0,02 | 0,12 | 0,1 | -2,26 |
| 39 | 01/08/01 | -2,36 | 0,92 | 1,07 | 2,19 | -2,14 |
| 40 | 01/09/01 | -2,41 | 0,8 | 0,94 | 1,86 | -2,19 |
| 41 | 01/10/01 | -2,41 | 0,51 | 0,66 | 1,47 | -2,19 |
| 42 | 02/12/01 | -2,23 | 0,26 | 0,41 | 1,03 | -2,01 |
| 43 | 07/01/02 | -2,29 | 0,58 | 0,73 | 1,81 | -2,07 |
| 44 | 11/02/02 | -1,92 | 0,91 | 1,05 | 1,15 | -1,7 |
| 45 | 02/03/02 | -1,8 | 0,79 | 0,93 | 1,69 | -1,58 |
| 46 | 23/04/02 | -2,41 | 0,51 | 0,66 | 1,47 | -2,19 |
| 47 | 08/05/02 | -2,09 | 0,37 | 0,51 | 1,07 | -1,87 |
| 48 | 08/06/02 | -2,15 | 0,15 | 0,3 | 1,05 | -1,93 |
| 49 | 02/07/02 | -1,91 | 0,84 | 0,98 | 2,06 | -1,69 |
| 50 | 03/08/02 | -2,57 | 0,52 | 0,66 | 1,56 | -2,35 |
| 51 | 01/10/03 | -2,12 | 0,74 | 0,88 | 2,14 | -1,9 |
| 52 | 02/11/03 | -2,45 | 0,73 | 0,88 | 1,88 | -2,23 |
| 53 | 03/01/04 | -2,12 | 0,73 | 0,87 | 2,05 | -1,9 |
| 54 | 03/02/04 | -2,6 | 0,63 | 0,78 | 1,86 | -2,38 |
| 55 | 01/03/04 | -2,32 | 0,6 | 0,75 | 1,67 | -2,1 |
| 56 | 06/04/04 | -2,74 | 0,57 | 0,72 | 1,57 | -2,52 |
| 57 | 03/05/04 | -2,22 | 0,46 | 0,6 | 1,37 | -2 |
| 58 | 01/06/04 | -2,1 | 0,61 | 0,76 | 1,72 | -1,88 |
| 59 | 11/07/04 | -3,8 | 0,13 | 0,27 | 0,91 | -3,58 |
| 60 | 08/09/04 | -2,34 | 0,18 | 0,32 | 0,88 | -2,12 |
| 61 | 07/06/10 | -2,46 | 0,37 | 0,52 | 1,58 | -2,24 |
| 62 | 01/07/10 | -1,8 | 0,17 | 0,32 | 0,76 | -1,58 |
| 63 | 05/08/10 | -2 | 0,53 | 0,68 | 1,68 | -1,78 |
| 64 | 12/09/10 | -2,33 | 0,22 | 0,37 | 1,16 | -2,11 |
| 65 | 06/10/10 | -2,78 | 0,15 | 0,29 | 0,68 | -2,56 |
| 66 | 02/11/10 | -2,18 | -0,23 | -0,08 | 0,06 | -1,96 |
| 67 | 05/12/10 | -2,63 | 0,01 | 0,15 | 0,55 | -2,41 |
| 68 | 09/01/11 | -2,28 | 0,59 | 0,73 | 1,8 | -2,06 |
| 69 | 06/02/11 | -2,32 | 0,42 | 0,56 | 1,49 | -2,1 |
| 70 | 07/03/11 | -2,63 | -0,22 | -0,07 | -0,05 | -2,41 |
| 71 | 02/10/04 | -3,35 | 0,15 | 0,3 | 0,73 | -3,13 |

| | | | | | | |
|-----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 72 | 13/12/04 | -2,19 | 0,35 | 0,49 | 1,09 | -1,97 |
| 73 | 09/01/05 | -2,31 | -0,03 | 0,11 | 0,3 | -2,09 |
| 74 | 12/02/05 | -2,7 | 0 | 0,14 | 0,39 | -2,48 |
| 75 | 01/03/05 | -2,7 | 0 | 0,14 | 0,39 | -2,48 |
| 76 | 12/04/05 | -2,43 | 0,26 | 0,41 | 1,25 | -2,21 |
| 77 | 09/05/05 | -2,92 | 0,1 | 0,24 | 0,9 | -2,7 |
| 78 | 13/06/05 | -2,32 | -0,1 | 0,04 | 0,15 | -2,1 |
| 79 | 10/09/05 | -2,31 | 0,07 | 0,22 | 0,62 | -2,09 |
| 80 | 08/10/05 | -2,4 | -0,15 | 0 | 0,29 | -2,18 |
| 81 | 13/11/05 | -2,17 | -0,23 | -0,09 | -0,13 | -1,95 |
| 82 | 11/12/05 | -2,38 | 0,13 | 0,28 | 0,38 | -2,16 |
| 83 | 12/02/06 | -2,63 | 0,27 | 0,42 | 1,01 | -2,41 |
| 84 | 04/03/06 | -2,26 | 0,09 | 0,23 | 0,82 | -2,04 |
| 85 | 02/04/06 | -2,13 | -0,18 | -0,03 | 0,1 | -1,91 |
| 86 | 02/05/06 | -2,24 | 0,25 | 0,4 | 0,71 | -2,02 |
| 87 | 05/06/06 | -2,34 | 0,2 | 0,34 | 0,8 | -2,12 |
| 88 | 02/07/06 | -1,84 | 0,55 | 0,7 | 1,15 | -1,62 |
| 89 | 17/09/06 | -2,94 | -0,33 | -0,18 | -0,06 | -2,72 |
| 90 | 02/10/06 | -2,32 | 0,2 | 0,34 | 0,69 | -2,1 |
| 91 | 08/10/06 | -2,13 | 0,01 | 0,15 | 0,48 | -1,91 |
| 92 | 02/11/06 | -2,16 | 0,18 | 0,32 | 0,88 | -1,94 |
| 93 | 04/11/06 | -2,08 | 0,18 | 0,32 | 0,64 | -1,86 |
| 94 | 03/01/07 | -2,25 | 0,43 | 0,58 | 1,22 | -2,03 |
| 95 | 06/02/07 | -2,44 | 0,88 | 1,03 | 2,02 | -2,22 |
| 96 | 05/04/11 | -2,13 | 0,01 | 0,15 | 0,48 | -1,91 |
| 97 | 08/05/11 | -1,91 | 0,42 | 0,56 | 1,15 | -1,69 |
| 98 | 05/06/11 | -2,35 | -0,03 | 0,11 | 0,37 | -2,13 |
| 99 | 06/07/11 | -2,28 | -0,23 | -0,09 | 0,08 | -2,06 |
| 100 | 08/08/11 | -2,06 | 0,66 | 0,81 | 1,82 | -1,84 |
| 101 | 08/09/11 | -2,19 | 0,92 | 1,06 | 1,9 | -1,97 |
| 102 | 05/10/11 | -2,32 | 0,41 | 0,55 | 1,61 | -2,1 |
| 103 | 03/11/11 | -2,59 | 0,42 | 0,56 | 1,26 | -2,37 |
| 104 | 04/12/11 | -2,38 | 0,29 | 0,43 | 1,24 | -2,16 |
| 105 | 02/01/12 | -2,48 | 0,26 | 0,41 | 1,07 | -2,26 |
| 106 | 03/03/07 | -2,36 | 0,73 | 0,87 | 1,72 | -2,14 |
| 107 | 07/04/07 | -2,73 | 0,35 | 0,49 | 1,32 | -2,51 |
| 108 | 02/05/07 | -3,47 | -0,8 | -0,65 | -0,07 | -3,25 |
| 109 | 02/06/07 | -2,31 | 0,48 | 0,62 | 1,46 | -2,09 |
| 110 | 07/07/07 | -2,52 | 0,17 | 0,32 | 1,1 | -2,3 |
| 111 | 04/11/07 | -2,26 | 0,12 | 0,27 | 1,01 | -2,04 |
| 112 | 03/12/07 | -2,32 | 0,4 | 0,54 | 1,3 | -2,1 |
| 113 | 02/01/08 | -2,38 | 0,29 | 0,44 | 1,25 | -2,16 |
| 114 | 02/02/08 | -2,51 | 0,54 | 0,68 | 1,55 | -2,29 |
| 115 | 01/03/08 | -2,23 | 0,24 | 0,38 | 0,44 | -2,01 |
| 116 | 01/04/08 | -2,52 | 0,42 | 0,57 | 1,23 | -2,3 |
| 117 | 12/05/08 | -2,24 | -0,2 | -0,06 | 0,11 | -2,02 |
| 118 | 16/06/08 | -2,56 | 0,22 | 0,36 | 0,89 | -2,34 |
| 119 | 02/07/08 | -2,31 | 0,14 | 0,28 | 0,71 | -2,09 |
| 120 | 18/08/08 | -2,21 | 0,11 | 0,26 | 0,44 | -1,99 |
| 121 | 15/09/08 | -2,3 | 0,18 | 0,32 | 0,7 | -2,08 |
| 122 | 03/11/08 | -2,3 | 0,22 | 0,37 | 0,78 | -2,08 |

| | | | | | | |
|-----|------------|-------|-------|-------|------|-------|
| 123 | 06/12/08 | -2,46 | 0,27 | 0,41 | 1,05 | -2,24 |
| 124 | 04/02/09 | -2,32 | 0,34 | 0,49 | 1,1 | -2,1 |
| 125 | 03/03/09 | -2,35 | 0,37 | 0,51 | 1,31 | -2,13 |
| 126 | 04/04/09 | -2,36 | 0,11 | 0,26 | 0,86 | -2,14 |
| 127 | 04/05/09 | -2,5 | 0,04 | 0,18 | 0,56 | -2,28 |
| 128 | 02/06/09 | -2,25 | 0,13 | 0,28 | 0,55 | -2,03 |
| 129 | 04/07/09 | -2,53 | 0,06 | 0,2 | 0,64 | -2,31 |
| 130 | 06/09/09 | -2,55 | -0,16 | -0,01 | 0,1 | -2,33 |
| 131 | 01/02/12 | -2,24 | 0,46 | 0,6 | 1,35 | -2,02 |
| 132 | 01/03/12 | -2,28 | 0,17 | 0,31 | 0,74 | -2,06 |
| 133 | 01/04/12 | -2,64 | 0,05 | 0,19 | 0,76 | -2,42 |
| 134 | 03/05/12 | -2,91 | -0,11 | 0,04 | 0,68 | -2,69 |
| 135 | 03/06/12 | -2,63 | 0,06 | 0,2 | 0,61 | -2,41 |
| 136 | 01/07/12 | -2,68 | 0,28 | 0,42 | 1,25 | -2,46 |
| 137 | 02/09/12 | -2,58 | -0,25 | -0,1 | 0,3 | -2,36 |
| 138 | 02/10/12 | -2,81 | -0,05 | 0,09 | 0,8 | -2,59 |
| 139 | 04/11/12 | -2,44 | 0,2 | 0,35 | 0,83 | -2,22 |
| 140 | 02/12/12 | -2,29 | 0,05 | 0,2 | 0,55 | -2,07 |
| 141 | 04/1/2013 | -2.33 | 0.3 | 0.2 | 0.62 | -2.05 |
| 142 | 01/02/2013 | -2.58 | 0.05 | 0.08 | 0.51 | -2.38 |
| 143 | 06/03/2013 | -2.65 | -0.28 | 0.18 | 0.46 | -2.45 |
| 144 | 03/04/2013 | -2.26 | -0.12 | 0.2 | 0.87 | -2.68 |
| 145 | 06/05/2013 | -2.35 | 0.03 | 0.25 | 0.84 | -2.7 |
| 146 | 02/06/2013 | -2.66 | 0.29 | 0.17 | 0.4 | -2.62 |

ملخص

المساهمة في تحديد أصل تعدين مياه منبع عين الفوارة (TLEMCEN) ، غرب الجزائر)

للتعرف على عملية التمدن وأصلها ، تمت دراسة عين الفوارة العليا الواقعة على هضبة لالة ستي لتحليل العناصر الفيزيائية والكيميائية لمياهها .

التحليلات الفيزيائية والكيميائية أظهرت أن مياه منبع عين الفوارة العليا تتوافق مع المعايير الجزائرية للشرب باستثناء النترات والبوتاسيوم التي تجاوزت المعايير المحددة في بعض التواريخ . أظهر التحليل البكتريولوجي ، الذي أجري في 8 ديسمبر 2021 ، أن مياه البئع لا تحتوي على أي جراثيم .
سمح لنا تقرير العناصر الكيميائية في مخطط PIPER بتصنيف هذه المياه إلى وجهتين: بيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم (الأكثر انتشارًا) والكلوريد وكبريتات الكالسيوم و المغنيسيوم لفترات معينة .

أظهر تقدير المياه لأغراض الري ، باستخدام المؤشرات ، مثل النسبة المئوية لـ Na^+ و KR أنها جيدة جدًا إلى جيدة للري ، باستثناء فترات معينة ، كانت فيها مؤه لة نسبية . (Na^+).

أظهر الرسم البياني RIVERSIDE أن مياه عين الفوارة صنفت إلى فئتين : C2-S1: بالنسبة لمعظم المياه (جيدة للري) ، C3-S1: لتواريخ معينة (مسموح بها للري). قسمت المياه إلى فئتين: ممتازة لغالبية النقاط وجيدة .

أظهر لنا تقرير العناصر الكيميائية على الرسم التخطيطي لـ PHREEQ C أن مؤشرات التشبع لجميع المعادن بشكل عام مفرطة التشبع في الأراجونيت والكالسيت والدولوميت ، مما يشير إلى قوة انحلال هذه المياه بتركيزات الكربونات. سمحت لنا الدراسة الإحصائية بفهم أصل تمدن مياه عين الفوارة العليا بسبب انحلال تركيزات البيكربونات في العصر الجوراسي الأعلى وتسرّب مياه الري ومياه الصرف .

الكلمات المفتاحية: المنبع - عين الفوارة العليا - تلمسان - التحليلات الفيزيائية والكيميائية - المواصفات الجزائرية لمياه الشرب - الري - الرسوم البيانية - التمدن - PHREEQ C .

RESUME

CONTRIBUTION A L'IDENTIFICATION DE L'ORIGINE DE LA MINERALISATION DES EAUX DE LA SOURCE D'AIN FOUARA SUPERIEURE (TLEMCEN, OUEST ALGERIEN).

Pour identifier le processus de minéralisation et son origine, la source d'Ain Fouara supérieure, située au plateau de Lalla Setti a été étudiée pour analyser les paramètres physico-chimiques de ses eaux.

Les analyses physico-chimiques que nous disposons ont montré que les eaux de la source d'Ain El Fouara supérieure étaient conformes aux normes algériennes de potabilité à l'exception des nitrates et du potassium qui ont dépassé les normes prescrites dans quelques dates. L'analyse bactériologique, faite le 8 décembre 2021, a montré que les eaux de la source ne renferment aucun germe pathogène.

Le report des éléments chimiques sur le diagramme de PIPER nous a permis de classer ces eaux en deux faciès : bicarbonaté calcique et magnésien (le plus dominant) , chloruré sulfaté calcique et magnésien, pour certaines périodes.

L'estimation des eaux à des fins d'irrigation, en utilisant des indices, comme le pourcentage en Na^+ et le KR a fait révéler qu'elles sont très bonnes à bonnes et pour l'irrigation, mis à part quelques périodes où elles étaient admissibles (Na^+).

Le diagramme de RIVERSIDE a montré que les eaux de la source d'Ain Fouara étaient classées dans deux classes : C2-S1 : pour la plupart des eaux (Bonnes pour l'irrigation), C3-S1 : pour certaines dates (admissibles pour l'irrigation). Selon WILCOX, les eaux de la source étaient réparties en deux classes : Excellente pour la majorité des points et bonne.

Le report des éléments chimiques sur le diagramme de PHREEQ C, nous a montré que les indices de saturation pour les tous les minéraux sont généralement sur- saturés en aragonite, calcite et en dolomie, indiquant le pouvoir de dissolution de ces eaux aux formations carbonatées. L'étude statistique nous a permis de comprendre l'origine de la minéralisation des eaux d'Ain El Fouara supérieure qui est due à la dissolution des formations bicarbonatées du Jurassique supérieur, des infiltrations des eaux d'irrigation et celles des eaux usées.

Mots Clés : Source- Ain El Fouara supérieure- Tlemcen- Analyses physico-chimiques- normes algériennes de potabilité- Irrigation- Diagrammes- Minéralisation- PHREEQ C .

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO THE IDENTIFICATION OF THE ORIGIN OF MINERALIZATION OF THE WATERS OF THE SUPERIOR SOURCE OF AIN EL FOUARA (TLEMCEN- WEST ALGERIA).

In order to identify the mineralization process and its origin, the Superior source of Ain El Fouara, located at the Lalla Setti plate, was studied to analyze the physico-chemical parameters of its waters.

The physico-chemical analyses that we have available, have shown that the waters of the Superior source of Ain Fouara were in compliance with the Algerian standards of potability, except for nitrates and potassium, which exceeded the prescribed standards in some dates. The bacteriological analysis, carried out on December 8th 2021, showed that the source water does not contain any pathogenic germs.

The chemical elements report on the PIPER diagram allowed us to classify these waters in two faces: calcic bicarbonate and magnesium (the most dominant), chloride calcic sulphate and magnesium, for some periods.

The estimation of water for irrigation purposes, using indices such as the percentage of Na^+ and KR revealed that they are very suitable to suitable and for the irrigation, except for some periods where they were admissible (Na^+).

The RIVERSIDE diagram showed that the waters of Ain El Fouara source were classified in two classes: C2-S1: for most of the waters (good for irrigation), C3-S1: for some dates (admissible for irrigation). According to WILCOX, the source waters were divided into two classes: Excellent for the majority of the points and good.

The chemical elements report on the PHREEQ C diagram, showed us that the indices of saturation for all the minerals are generally over-saturated in the aragonite, calcite and dolomite, indicating the dissolution power of these waters to carbonate formations. The statistical study allowed us to understand the origin of the waters mineralization of Ain El Fouara superior, which is due to the bicarbonate formations dissolution of superior Jurassic, the water seepage of irrigation and wastewater.

Keywords: Source - Superior Ain El Fouara - Tlemcen – Physicochemical analysis - Algerian standards of potability - Irrigation - Diagrams - Mineralization - PHREEQ C .