

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence :/2024



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2024

Mémoire de Master

Filière : Hydraulique
Spécialité : Ouvrage Hydraulique

Thème :

Évaluation de la qualité des eaux souterraines à
l'aide de l'indice de qualité de l'eau (WQI) et
d'une analyse statistique multivariée.
cas de la région de Lioua

Etudiant :
Reghis Boubakeur

Encadrant :
Dr Masmoudi Toufik (MCA)
Université Mohamed Khider
Biskra

Session : Juin 2024

Remerciement

Je remercie Allah Le Tout puissant, et le maître des mondes d'avoir illuminé mon chemin à fin d'élaborer ce travail qui n'était plus facile à mon âge.

Au terme de ce travail ; je tiens à remercier toute ma reconnaissance et mon respect à Docteur Masmoudi Toufik, pour sa disponibilité son encouragement, ainsi que son soutien.

Tous mes remerciements à tout ce qui ont participé à l'élaboration de cette recherche, et pour tous ceux qui m'ont enseigné au département de Génie civil et Hydraulique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère, ma source de tendresse que je ne peux se désaltérer à une autre source, car elle est mon unique étoile qui parée le firmament de son scintillement de diamants dans la nuit.

Ce travail est aussi dédié, à l'âme de mon cher père et mon frère, qu'ils dorment en paix inchallah.

Ainsi, je dédié ce travail à ma femme, mes perles filles Rubine et Tuline et mes sœurs.

Enfin toute ma famille.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est un diagnostic de la qualité des eaux souterraines de la région de Lioua.

L'étude s'intéresse plus particulièrement à l'évaluation des eaux destinées à la consommation humaine et leur qualité sur la santé publique, l'irrigation et leur influence à l'agriculture.

La structure de la mémoire est construite en partant de la description des ressources, de leur contexte géographique, climatique et hydrogéologique, pour aboutir à une étude expérimentale de la qualité physico-chimique des eaux de 25 forages de la région de Lioua.

Pour les eaux souterraines, les résultats obtenus ont montré que l'eau de la nappe du Sénonien inférieur à une mauvaise qualité. Ceci concerne plus particulièrement le pH, la conductivité (minéralisation), la dureté totale ainsi que la concentration des éléments majeurs.

Ainsi que l'indice de la qualité d'eau (IQE) montre une mauvaise qualité d'eau pour la consommation humaine, et les résultats du digramme de Piper présentent deux faciès chimiques, chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Les résultats obtenus du diagramme de Riverside montrent de deux types de classes pour les eaux d'irrigations, classe C3S1 et C4S1.

Après l'analyse en composante principale (ACP) mettent en évidence des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles. L'axe I exprime 31,9 % de la variance et oppose le calcium aux bicarbonates, et aux nitrates. Il est traduit la minéralisation des eaux. Enfin, les sulfates et le magnésium sont étroitement liées et évoluent dans le même sens et se différencient sur l'axe II, qui est exprimé (14,8 %) de la variance.

A cet effet, l'évaluation continue de la qualité des eaux est impérative et un traitement pour l'amélioration de la qualité des eaux et éliminer les problèmes de santé peut s'avérer nécessaire.

ملخص

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو تشخيص جودة المياه الجوفية في منطقة ليوة. حيث تتركز هذه الدراسة بشكل أكبر على تقييم مياه الشرب وجودتها فيما يتعلق بالصحة العامة والري وتأثيرها على الزراعة. تم تحديد هيكل الدراسة ابتداءً من وصف المياه وسياقها الجغرافي والمناخي والهيدروجيولوجي، لتنتهي بدراسة تجريبية للجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الخاصة بـ 25 منقب لمنطقة ليوة. بالنسبة للمياه الجوفية، أظهرت النتائج أن مياه الطبقة الجوفية السنونية السفلية ذات جودة سيئة. وتشمل هذه بشكل خاص قيم الحموضة (pH) والتوصيلية (المعدنية) والصلابة الكلية بالإضافة إلى تركيز العناصر الرئيسية. كما أظهر مؤشر جودة المياه (IQE) جودة سيئة لمياه الشرب البشرية، وتقدم نتائج رسم بيبي مياه كيميائية ذات وجهين، الكلوري والكبريتي الكالسيوم المغنيسي. وأظهرت النتائج المتحصلة من رسم ريفرسايد وجود نوعين من الفئات لمياه الري، فئة C3S1 و C4S1. و بعد التحليل بنظرية العناصر الرئيسية (ACP)، حيث تبين لنا التجمعات و التعارضات والاتجاهات المختلفة. يعبر المحور الأول عن 31.9% من التباين ويقابل الكالسيوم بالبنيكربونات والنترات، ويعبر عن تعدد المعادن في المياه. وأخيراً، يرتبط الكبريتات والمغنيسيوم بشكل وثيق ويتطوران في نفس الاتجاه ويختلفان على المحور الثاني، الذي يعبر عن 14.8% من التباين.

في هذا السياق إن التقييم المستمر لجودة المياه أمر ضروري واكيد لتحسين جودة المياه والتخلص من المشاكل الصحية الناتجة عن نوعية المياه الغير معالجة.

Abstract

The main objective of this work is to diagnose the quality of groundwater in the Lioua region. The study focuses particularly on evaluating water intended for human consumption and its impact on public health, irrigation, and agriculture.

The thesis structure begins with a description of the resources, their geographical, climatic, and hydrogeological context, leading to an experimental study of the physicochemical quality of 25 drillings of Lioua.

For groundwater, the results indicate that the water from the lower Senonian aquifer is of poor quality. This is particularly evident in pH, conductivity (mineralization), total hardness, and the concentration of major elements. The Water Quality Index (WQI) also indicates poor water quality for human consumption, and results from the Piper diagram show two chemical facies: chlorinated and calcareous and magnesian sulfate.

Results from the Riverside diagram indicate two classes for irrigation water: C3S1 and C4S1. Principal Component Analysis (PCA) reveals groupings, oppositions, and directional trends. Axis I account for 31.9% of the variance and opposes calcium to bicarbonates and nitrates, representing water mineralization. Finally, sulfates and magnesium are closely related and evolve in the same direction but differentiate on Axis II, accounting for 14.8% of the variance.

Continuous evaluation of water quality is imperative, and treatment to improve water quality and eliminate health problems may be necessary.

Liste des tableaux

- Tableau N° 01** : Normes OMS et algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau potable OMS (2006) et JORA (2014)
- Tableau N° 02** : Indicateurs microbiens courants et causes possibles de leur présence dans l'eau potable (Verhille, 2013)
- Tableau N° 03** : Classification des eaux selon la dureté totale (Berne et al. 1991)
- Tableau N° 04** : Certains contaminants courants des eaux souterraines et les sources de pollution associées. Source : GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006
- Tableau N° 05** : Répartition de l'habitat selon (DPSB Fin 2022)
- Tableau N° 06** : Répartition de l'habitat selon la zone d'identification (DPSB Fin 2022)
- Tableau N° 07** : Répartition de l'habitat selon la zone urbaine ou rurale (DPSB Fin 2022)
- Tableau N° 08** : Répartition de l'habitat selon le genre (DPSB Fin 2022)
- Tableau N° 09** : Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019
- Tableau N° 10** : Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019) Source Station météorologique de Biskra 2019
- Tableau N° 11** : Températures moyennes mensuelles [maximales : T (°C) Max. et minimales : T (°C). Min] de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019
- Tableau N° 12** : Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)
- Tableau N° 13** : Evaporation moyennes mensuelle pour la période de (2008– 2018).
- Tableau N° 14** : vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019
- Tableau N° 15** : vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)
- Tableau N° 16** : Valeurs d'indice de Climagramme d'Emberger, station de Biskra (2008, 2018)
- Tableau N° 17** : Poids relatif des paramètres physico-chimiques.
- Tableau N° 18** : Classification de l'IQE, statut, et utilisation possible de l'échantillon d'eau (P. Balamurugan 2020).
- Tableau N° 19** : Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R (Méthode de Richards)
- Tableau N° 20** : Paramètres physico-chimiques de l'eau de 25 forages
- Tableau N° 21** : Statistique de la température de 25 forages.
- Tableau N° 22** : Statistique du pH de 25 forages.
- Tableau N° 23** : Statistique du CE de 25 forages.
- Tableau N° 24** : Statistique de Calcium de 25 forages.
- Tableau N° 25** : Statistique de Magnésium de 25 forages.
- Tableau N° 26** : Statistique de Sodium de 25 forages.
- Tableau N° 27** : Statistique de Potassium de 25 forages.
- Tableau N° 28** : Statistique de Bicarbonate de 25 forages.
- Tableau N° 29** : Statistique de Sulfate de 25 forages.
- Tableau N° 30** : Statistique de Chlorure de 25 forages.
- Tableau N° 31** : Statistique de Nitrate de 25 forages.
- Tableau N° 32** : Résultats de matrice de corrélation.
- Tableau N° 33** : Valeurs de WQI de 25 forages.

Tableau N°34 : Les classes issues du diagramme de RIVERSIDE (CLEMANT et GALAND, 1979).

Tableau N° 35 : Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE

Tableau N° 36 : Résultats des SAR de 25 forages

Tableau N° 37 : Résultats des Na% de 25 forages

Tableau N° 38 : Résultats des PI de 25 forages

Tableau N° 39 : Résultats des MHR de 25 forages

Tableau N° 40 : Variance totale expliquée

Tableau N° 41 : Contributions des variables

Liste des figures

- Figure N° 01** : L'eau souterraine et les différents ouvrages de captage (SCI, 2006).
- Figure N° 02** : Différentes activités de l'occupation des sols qui génèrent fréquemment des menaces de pollution des eaux souterraines. Source : GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006
- Figure N° 03** : Situation géographique de la commune de Lioua (Athamena, A 2022)
- Figure N° 04**: Nombre de la population par rapport à la zone d'identification
- Figure N° 05** : Répartition l'habitat selon le genre
- Figure N° 06** : Carte pédologique de la région de Biskra (Durant, 1957)
- Figure N° 07** : Carte du piémont de l'atlas saharien (Jean-Louis, B 2010)
- Figure N° 08** : Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).
- Figure N° 09** : la précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)
- Figure N° 10** : La précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019)
- Figure N° 11** : Variabilités thermique de la région de Biskra durant la période (2008-2018)
- Figure N° 12** : Evaporation mensuelle pour la période de (2008– 2018).
- Figure N°13** : Courbe de la vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)
- Figure N° 14** : La vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019)
- Figure N° 15** : le diagramme ombrothermique (Juin 2018-Mai 2019)
- Figure N°16** : Localisation de la région de Biskra sur le Climagramme d'EMBERGER
- Figure N° 17** : Carte géologique de la région de Lioua (Extrait de la carte Géologique-Map de Biskra 1/200 000).
- Figure N° 18** : Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).
- Figure N° 19** : Log litho-stratigraphique synthétique de la région de Biskra (Chebbah, 2007)
- Figure N° 20** : Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011)
- Figure N° 21** : Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).
- Figure N° 22** : Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1997)
- Figure N° 23** : Coupe Hydrogéologique schématique de la région de Lioua (Ahcène, S.2021)
- Figure N° 24** : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME
- Figure N° 25** : Diagramme de Piper
- Figure N° 26** : Diagramme de Scheller Berkaloff
- Figure N° 27** : Diagramme de RICHARDS (Riverside)
- Figure N° 28** : Diagramme de Wilcox
- Figure N° 29** : Diagramme de Chadha
- Figure N° 30** : Histogramme de la température de 25 forages.
- Figure N° 31** : Histogramme du pH de 25 forages.
- Figure N° 32** : Histogramme de la conductivité électrique de 25 forages.
- Figure N° 33** : Histogramme de Calcium de 25 forages.
- Figure N° 34** : Histogramme de Magnésium de 25 forages.
- Figure N° 35** : Histogramme de Sodium de 25 forages.
- Figure N° 36** : Histogramme de Potassium de 25 forages.
- Figure N° 37** : Histogramme de Bicarbonate de 25 forages.
- Figure N° 38** : Histogramme de Sulfate de 25 forages.
- Figure N° 39** : Histogramme de Chlorure de 25 forages.
- Figure N° 40** : Histogramme de Nitrate de 25 forages.
- Figure N° 41** : Histogramme de WQI de 25 forages.

- Figure N° 42** : Interface de logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.) version 8.44.
- Figure N° 43** : Diagramme de Piper pour 25 forages de Lioua.
- Figure N° 44** : Diagramme de Scheller et Berkloff pour 25 forages de Lioua.
- Figure N° 45** : Diagramme de Riverside pour 25 forages de Lioua.
- Figure N° 46** : Diagramme de Wilcox pour 25 forages de Lioua
- Figure N° 47** : Diagramme de Chadha pour 25 forages de Lioua
- Figure N° 48** : Histogramme de SAR pour 25 forages.
- Figure N° 49** : Histogramme des Na% de 25 forages
- Figure N° 50** : Histogramme des PI de 25 forages
- Figure N° 51** : Histogramme des MHR de 25 forages
- Figure N° 52** : Projection des variables sur le premier plan factoriel

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des Figures	

Partie A : Littérature et revue bibliographique

Introduction générale.....	I
----------------------------	---

Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution

I.1. Introduction.....	01
I.2. Caractéristiques des eaux souterraines.....	02
I.2.1 Définition des eaux souterraines.....	02
I.2.2 Importance des eaux souterraines.....	03
I.3 Norme de qualité d'eau.....	03
I.4 Principaux paramètres de potabilité.....	05
I.4.1 Paramètres organoleptiques (physique).....	05
I.4.1.1 Couleur.....	05
I.4.1.2 Odeur et Saveur.....	05
I.4.2 Paramètres bactériologiques.....	05
I.4.3 Paramètres physicochimiques.....	06
I.4.3.1 Température.....	06
I.4.3.2 Turbidité.....	06
I.4.3.3 Conductivité.....	07
I.4.3.4 Dureté de l'eau.....	07
I.4.3.5 Potentiel d'Hydrogène (pH).....	07
I.4.3.6 Les ions majeurs.....	08
I.4.3.7. Nutriments.....	09
I.4.3.8. Métaux lourds.....	09
I.5 Pollution des eaux.....	10
I.5.1 Sources de pollution.....	10
I.5.1.1. La pollution domestique.....	12
I.5.1.2. Origine industrielle.....	12
I.5.1.3 La pollution agricole.....	13
I.5.1.4. Phénomènes naturels.....	14
I.5.1.5. Pollution atmosphérique.....	14
I.5.2 Les principaux polluants des eaux.....	14
I.5.2.1 Les polluants microbiologiques.....	14
I.5.2.2 Les polluants chimiques.....	14
I.5.2.3 Les polluants physiques.....	15
I.6. Conclusion.....	16

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction.....	17
II.2 Situation géographique de la région de Ziban (Lioua).....	18
II.3 Répartition de l'habitat.....	19
II.4 Activité d'agriculture.....	20
II.5 Végétation (couvert végétal naturel).....	21
II.6 Types de Sol de la région d'étude.....	21
II.7 Relief.....	22
II.8 Hydrologie de la région.....	23
II.8.1 Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	23
II.8.2 Climat.....	24
II.8.2.1 Précipitation.....	24
II.8.2.2 Températures.....	26
II.8.2.3 Evapotranspiration.....	27
II.8.2.4. Les vents dominants.....	28
II.8.3 Le climat suivant les nouvelles données climatiques.....	30
II.8.3.1 Identification de la période sèche.....	30
II.8.3.2 Climagramme d'Emberger.....	30
II.9. Géologie de la zone d'étude.....	32
II.10 Cadre géologique générale.....	33
II.11. Identification des formations hydrogéologiques.....	36
II.11.1 Identification des différentes nappes.....	36
II.11.2 l'inventaire des points d'eau.....	40
II.11.3 La piézométrie.....	41
II.12 Les coupes hydrogéologiques.....	42
II.13 Conclusion.....	43

Partie B : Etude expérimentale

Chapitre I : Matériels et méthodes

I.1 Introduction.....	44
I.2 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)].....	45
I.3 Méthodes de traitement des données.....	47
I.3.1 Traitement des données par Excel.....	47
I.3.2 Traitement des données par diagramme.....	47
I.4 Les aptitudes des eaux d'irrigation.....	53
I.4.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR).....	53
I.4.2 La teneur en sodium (Na%).....	54
I.4.3 L'indice de perméabilité (PI).....	55
I.4.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR).....	56
II.5 Analyse statistique multivariées.....	56
II.5.1 Analyse en composantes principales (ACP).....	56
I.6 Conclusion.....	58

Chapitre II : Résultats et interprétation

II.1. Introduction.....	59
II.2. Paramètres physico-chimiques.....	60
II.3 Paramètres physiques.....	61
II.3.1 La température.....	61
II.3.2 Potentiel d'hydrogène (pH).....	62
II.3.3 Minéralisation (Conductivité électrique CE).....	63
II.4 Les paramètres chimiques.....	64
II.4.2 Les cations majeurs.....	64
II.4.2.1 Le Calcium (Ca ²⁺).....	64
II.4.2.2 Le Magnésium (Mg ²⁺).....	65
II.4.2.3 Le Sodium (Na ²⁺).....	66
II.4.2.4 Le Potassium (K).....	67
II.4.3 Les anions majeurs.....	68
II.4.3.1 Bicarbonate (HCO ₃ ⁻).....	68
II.4.3.2 Sulfate (SO ₄ ²⁻).....	69
II.4.3.3 Chlorure (Cl ⁻).....	70
II.4.3.4 Nitrate (NO ₃ ⁻).....	71
II.4.4 Analyse statistique des paramètres physico-chimique.....	72
II.5 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)].....	73
II.6 Classification hydro-chimique des eaux souterraines.....	75
II.6.1 Traitement des données par Diagramme.....	75
II.6.1.1 Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.).....	75
II.7 Les aptitudes des eaux d'irrigation.....	83
II.7.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR).....	83
II.7.2 La teneur en sodium (Na%).....	84
II.7.3 L'indice de perméabilité (PI).....	86
II.7.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR).....	87
II.8 Analyse en composantes principales (ACP).....	88
II.9 Conclusion.....	91
Conclusion générale.....	92
Références Bibliographies.....	95

Introduction Générale

L'eau est une ressource indispensable à la vie. D'habitude, quand les personnes pensent à propos des sources d'eau, ils pensent à des rivières et des cours d'eau, en d'autres mots, eaux de surface. Mais, de toute l'eau douce utilisable dans le monde, approximativement 97 % est de l'eau souterraine.

En Algérie, les sources d'eau comprennent à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines, certaines étant renouvelables et d'autres non. L'exploitation de ces ressources est intensément pratiquée, en raison des besoins croissants dus à l'augmentation de la population et à l'essor rapide des activités économiques, notamment l'agriculture et l'industrie (Harrat et Achour, 2010). La forte croissance démographique et urbaine d'une part, et le développement économique et social d'autre part, alimentent une demande en eau en constante évolution. Cependant, les années de sécheresse successives, combinées à la rareté et à l'irrégularité des apports annuels en eaux souterraines, entravent le développement et posent des défis pour la gestion des ressources hydriques. Cette réalité se manifeste clairement dans notre zone d'étude (Lioua), où le développement économique repose principalement sur l'agriculture, nécessitant une utilisation intensive de l'eau.

Les ressources en eau sont confrontées à diverses contraintes, telles que la rareté, l'irrégularité temporelle, la mauvaise répartition spatiale et une grande vulnérabilité à la sécheresse et à la pollution (Boukhari, 2008). La région de Biskra ne fait pas exception, avec une faible pluviométrie et un potentiel agricole considérable en termes de superficie.

Dans ce contexte, l'objectif primordial de notre travail est d'étudier les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de 25 forages, et l'évaluation de la classification de ces eaux et voir la possibilité de leurs utilisations dans la consommation humaines et dans l'irrigation.

Pour aboutir à notre objectif, le manuscrit est scindé en deux parties :

➤ **Partie A : Littérature et revue bibliographique**

- ❖ Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique qui traite la qualité des eaux souterraine et problème de pollution.
- ❖ Le deuxième chapitre, traite une présentation approfondie de la zone d'étude.

➤ Partie B : Etude expérimentale

❖ Le premier chapitre, présentation de matériels et méthodes utilisés

❖ Le deuxième chapitre, englobe les résultats obtenus, leurs interprétations et discussion.

Enfin ce travail de recherche sera finalisé par une conclusion générale et les références bibliographiques.

Partie A : Littérature et revue bibliographique

- **Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution**
- **Chapitre II : Présentation de la zone d'étude**

Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution

I.1 Introduction

Dans les conditions naturelles, l'eau souterraine est généralement potable et ne nécessite quasiment pas de traitement avant la distribution et l'utilisation.

La bonne qualité de l'eau est le résultat de la protection des sols et des roches dans la zone non saturée au-dessus de la nappe phréatique.

Ils filtrent les bactéries et protègent les eaux souterraines des contaminants en surface. Mais l'entrée massive de polluants générés par l'agriculture moderne, l'industrie et le manque d'installations d'assainissement peut dépasser la capacité de la zone non saturée à filtrer les contaminants et protéger les eaux souterraines. Une fois la nappe souterraine est polluée, la décontamination est une tâche très coûteuse et de longue durée. En raison du très long décalage qui pourrait avoir lieu avant qu'un impact de la pollution sur la ressource soit perceptible, la bonne gestion des aquifères, avec des activités de prévention de la pollution, sont d'une grande importance.

Ce chapitre présente les propriétés et les paramètres fondamentaux de la qualité des eaux souterraines, et identifie les diverses causes de pollution sur les nappes d'eau souterraine.

I.2 Caractéristiques des eaux souterraines :

I.2.1 Définition des eaux souterraines

Les eaux souterraines regroupent l'ensemble des réserves d'eau qui se trouvent dans le sous-sol et qui constituent une provision d'eau potable inestimable pour l'humanité. L'eau est stockée dans des zones appelées aquifères, composées de roches poreuses et/ou fissurées. L'eau peut s'accumuler dans ces espaces vides pour former des nappes, qui occupent tout ou partie de l'aquifère.

Les sources et les eaux souterraines sont traditionnellement les ressources en eau privilégiées pour l'eau potable, car plus à l'abri des pollutions que les eaux de surface (Guergazi et Achour, 2005).

D'une manière générale, les eaux souterraines se caractérisent par une turbidité faible ou leurs eaux bénéficient de filtration naturelle importante et aussi se caractérise par une contamination bactérienne faible, car elle est habituellement à l'abri des sources de pollution. Par contre la dureté est souvent élevée à cause de contact entre les eaux souterraine et formations rocheuses des aquifères (Chelli et Djouhri, 2013).

La plupart des eaux souterraines ont pour origine les eaux pluviales (pluie ou neige). Si elles ne sont pas perdues par évaporation, transpiration ou écoulement, l'eau de ces sources peut s'infiltrer dans les sols. Les quantités d'eau des précipitations sont retenues très difficilement sur le sol sec formant un film sur la surface et dans les micros pores des particules du sol (Manahan,2005).

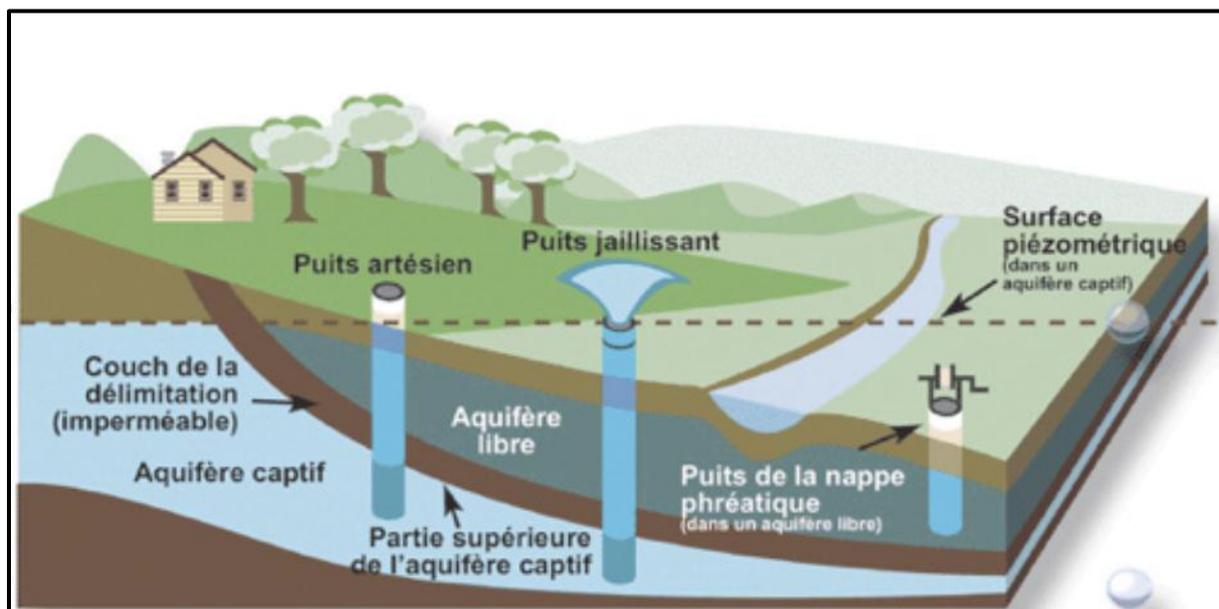


Figure N° 01 : L'eau souterraine et les différents ouvrages de captage (SCI, 2006).

I.2.2 Importance des eaux souterraines

L'eau circule sous la surface du sol. Comme l'eau de surface, mais à des débits beaucoup plus lents, elle s'écoule de l'amont vers l'aval pour ultimement rejoindre les cours d'eau et les lacs. L'émergence de l'eau souterraine peut contribuer considérablement au maintien des débits de base d'un cours d'eau ou du niveau de l'eau d'un lac. Durant les périodes sèches, certains cours d'eau et milieux humides peuvent être entièrement alimentés par l'eau souterraine. À l'inverse, en période de précipitations abondantes et de crue, ce sont généralement les eaux de surface qui alimentent les eaux souterraines. Ainsi, l'eau souterraine est étroitement liée aux eaux de surface et est une composante importante du cycle global de l'eau (COSANDEY, 2003).

Les eaux souterraines contribuent à l'alimentation des sources et des cours d'eau et leur rôle est souvent essentiel pendant les périodes d'étiage. Elles sont exploitées pour la consommation humaine (eau potable), l'agriculture (irrigation) et l'industrie. L'accumulation de nitrate dans les hydrosystèmes est aujourd'hui à l'origine de problèmes de santé publique même si cela fait encore l'objet de débats (WEYER et *al.*, 2001). L'absorption répétée d'importantes quantités de nitrate pourrait favoriser l'apparition de certains cancers (MORALES et *al.*, 1996).

I.3 Norme de qualité d'eau :**A- L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) :**

La nature et la forme des normes s'appliquant à l'eau de boisson peuvent varier d'un pays ou d'une région à l'autre. Il n'existe pas d'approche unique, universellement applicable. Lors du développement et de la mise en œuvre des normes, il est essentiel de prendre en compte la législation actuelle ou en préparation concernant l'eau, la santé et l'administration locale et d'évaluer la capacité du pays à établir des réglementations et à les faire appliquer. Des démarches susceptibles de fonctionner dans un pays ou une région ne sont pas nécessairement transposables à d'autres pays ou régions. Il importe que chaque pays fasse le bilan de ses besoins et de ses capacités pour la mise au point d'un cadre réglementaire (OMS, 2017).

B- Norme Algérienne (JORA 2014) :

Les normes algériennes (JORA 2014) définissant la potabilité de l'eau fixent les seuils limites de présence de certaines substances nocives ou indésirables qui peuvent se trouver dans l'eau :

- Certains éléments doivent être totalement absents de l'eau pour qu'elle soit jugée potable, comme les agents pathogènes (virus, bactéries...) qui présentent un risque important pour la santé.

- D'autres éléments font l'objet de seuils maximaux d'admissibilité, comme par exemple les nitrates, les pesticides ou les métaux lourds. Ces critères sont déterminés selon les connaissances scientifiques et le risque acceptable déterminé et évoluent dans le temps. L'eau est à ce jour la denrée alimentaire la plus réglementée, et elle fait donc l'objet de nombreux traitements pour être conforme avant d'arriver aux consommateurs (Guerzou, 2008).

Tableau N° 01 : Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau potable OMS (2006) et JORA (2014)

Substances	Unité	Normes OMS	Norme Algérienne
Couleur	mg/l platine	Pas de valeur guide	15
Odeur à 25°C	Taux dilution	Acceptable	4
Saveur à 25°C	Taux dilution	Acceptable	4
Turbidité	NTU	5	5
Température	C°	25	25
Calcium	mg/l	/	200
Magnésium	mg/l	/	150
Chlorure	mg/l	250	500
Ions hydrogène	PH	6,5 - 9,5	6,5 - 9
Dureté	mg/l de CaCO3	200	500
Conductivité A 20°C	µS/cm	pas de norme	2800
Ammonium	mg/l	Pas de contraintes	0,5
Potassium	mg/l	250	12
Oxygène dissous	O ₂ %	Pas de valeur guide	Pas de valeur guide
Fluorure	mg/l	1,5	1,5
Fer	mg/l	Pas de valeur guide	0,3
Nitrate	mg/l	50	50
Sulfate	mg/l	500	400
Sodium	mg/l	Pas de valeur guide	200
Phosphore	mg/l	pas de norme	5
Résidu sec	mg/l	/	1500

I.4 Principaux paramètres de potabilité**I.4.1 Paramètres organoleptiques (physique)****I.4.1.1. Couleur**

Dans l'idéal, l'eau potable doit être claire et incolore. Le changement de couleur d'une eau potable peut être le premier signe d'un problème de qualité (Chelli et Djouhri ,2013).

I.4.1.2 Odeur et Saveur

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur non désagréables. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, émanent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés purement organoleptiques (Chelli et Djouhri ,2013).

I.4.2 Paramètres bactériologiques

De nombreux micro-organismes (bactéries, virus et parasites) sont présents dans les eaux naturelles superficielles et, à un degré moindre, dans les eaux souterraines. Certains peuvent être pathogènes pour l'homme (A R S d'Auvergne, 2014).

Leur présence dans les eaux de consommation est le plus souvent liée à :

- Un état de dégradation chronique ou accidentel de la qualité de la ressource en eau (pollution, épisode pluvieux et infiltration d'eau de ruissellement...)
- Une mauvaise protection ou un manque d'entretien des ouvrages de captage d'eau
- Une défaillance du traitement de désinfection
- Une contamination du réseau au cours du transport et/ou du stockage de l'eau (temps de séjour important ou stagnation dans les réseaux de distribution, défaut d'entretien des canalisations et des réservoirs, entrée d'eau parasite, retour d'eau...).

La présence de micro-organismes dans l'eau de consommation peut engendrer un risque à court terme pour la santé de la population qui l'utilise. Les conséquences dépendent de la sensibilité des personnes exposées (enfants en bas âge, personnes âgées, personnes immunodéprimées...), de la nature des germes pathogènes en présence mais aussi de leur concentration.

Parmi ces microorganismes on peut présenter dans le tableau N° 01 quelques indicateurs microbiens courants et causes possibles de leur présence dans l'eau potable.

Tableau N° 02 : Indicateurs microbiens courants et causes possibles de leur présence dans l'eau potable (Verhille, 2013)

Indicateur microbien	Causes possibles de la détection de l'indicateur	CAM*ou valeur de référence
E. coli	<ul style="list-style-type: none"> Contamination fécale récente, présence possible d'organismes pathogènes. 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune UFC détectable dans 100 ml.
Coliformes fécaux	<ul style="list-style-type: none"> Traitement et désinfection inadéquats, recolonisation bactérienne ou infiltration dans le réseau de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune UFC détectable dans 100 ml d'eau traitée.
Coliformes totaux	<ul style="list-style-type: none"> Leur présence dans l'eau sortant de la station de traitement indique une grave défaillance du système de traitement 25. Leur présence dans l'eau du réseau de distribution (prélevée ailleurs qu'à la sortie de la station de traitement) indique une vulnérabilité à la contamination ou une recolonisation bactérienne du réseau 25. Elle n'est pas nécessairement liée à une contamination fécale. 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune UFC détectable dans 100 ml à la sortie de station de traitement. Ailleurs dans le réseau de distribution, elle dépend de la fréquence des prélèvements et de la taille du réseau 25.
Numération des bactéries Hétérotrophes (NBH)	<ul style="list-style-type: none"> Un pie de NBH dans l'eau sortant de la station de traitement peut indiquer un problème dans le traitement ou un changement de qualité à la source avant de même le traitement. Une pie de NBH dans le réseau de distribution indique qu'il pourrait y avoir une recolonisation bactérienne. 	<ul style="list-style-type: none"> La valeur et la plage de référence sont à chaque réseau et dépendent des caractéristiques du site.

I.4.3 Paramètres physicochimiques

I.4.3.1 Température

Les variations de température saisonnières peuvent affecter les eaux, surtout quand elles sont superficielles. Elle est accélérée la croissance de micro-organismes, d'algues, entraînant des goûts et des odeurs désagréables, ainsi qu'une augmentation de couleur et de la turbidité dans le cas de température supérieur à 15°C.

En rapport avec les normes de potabilités de l'eau fixées journal officiel de la république algérienne (JORA) l'eau est : excellente lorsque la température varie entre 20 et 22°C passable lorsque la température oscille dans l'intervalle de 22 à 25°C (JORA, 2014).

I.4.3.2 Turbidité

La turbidité est l'indicateur du caractère plus ou moins troublant de l'eau ; c'est l'opposé de la limpidité. Techniquement, la turbidité est la propriété optique de l'eau qui fait que la lumière incidente est déviée (diffraction) ou absorbée par les particules plutôt que transmise en ligne droite (C.E.R.S.P, 2003).

Elle est généralement causée par des matières en suspension et des particules colloïdales d'origine naturelle (acides humiques, particules provenant de la dégradation des végétaux ou de l'érosion du sol) ou anthropique (rejets industriels, agricoles et urbains).

I.4.3.3 Conductivité

La conductivité des eaux potables est souvent liée à la concentration en sels minéraux dissous. Son unité est exprimée en ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Elle permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau dans la mesure où la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement (Tardat et Beaudry, 1984).

La classification des eaux en fonction de la conductivité se présente de la manière suivante : Conductivité égale à $0.05\mu\text{S}/\text{cm}$: eau déminéralisée ; Conductivité de 10 à $80\mu\text{S}/\text{cm}$: eau de pluie; Conductivité de 80 à $100\mu\text{S}/\text{cm}$: eau peu minéralisée ; Conductivité de 300 à $500\mu\text{S}/\text{cm}$: eau moyennement minéralisée ; Conductivité de 1000 à $3000\mu\text{S}/\text{cm}$: eau saline ; Conductivité supérieure à $3000\mu\text{S}/\text{cm}$: eau de mer (Rodier, 2009).

I.4.3.4. Dureté de l'eau

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations des ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} (ions alcalino-terreux). Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelquefois les ions fer, aluminium. Elle s'exprime en milliéquivalents de concentration en CaCO_3 . Elle est aussi très souvent donnée en degrés Français (Rodier, 2009). Les eaux peuvent être classées suivant la dureté totale indiquée dans le tableau N° 2.

Tableau N° 03 : Classification des eaux selon la dureté totale (Berne et al. 1991)

TH en degrés français (°F)	TH en degrés français (°F)
Spécificité de l'eau	Spécificité de l'eau
0 à 6	0 à 6
Eau très douce	Eau très douce
6 à 15	6 à 15

I.4.3.5 Potentiel d'Hydrogène (pH)

C'est une mesure de l'activité des ions H^+ et OH^- contenus dans une eau. En chimie, par convention, on considère le pH de l'eau pure comme celui qui correspond à la neutralité d'une solution. Autrement dit, toute solution de pH inférieur à 7 (à 25°C) est considérée comme

acide et inversement. Les normes édictées par la réglementation locale et internationale en matière de potabilité de l'eau recommandent un pH situé entre 6,5 et 90 (JORA, 2014).

Il diminue en présence de la matière organique et augmentent en saison sèche, quand l'évaporation est élevée.

I.4.3.6 Les ions majeurs

Les éléments majeurs dissoutes dans une eau naturelle provenant des terrains traversés (calcium, sodium, potassium, sulfates, chlorures,) :

- **Calcium**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés (Rodier, 2009).
Magnésium Le magnésium est un élément très répandu dans la nature et il est présent dans la plupart des eaux naturelles. Le magnésium contribue à la dureté de l'eau sans être l'élément essentiel et aussi il est indispensable pour la croissance et pour la production de certaines hormones (Savary, 2010).

- **Potassium**

Le potassium est le cation le plus abondant du liquide intracellulaire et joue un rôle important dans un grand nombre de fonctions cellulaires pour lesquelles les besoins de l'organisme par jour sont importants (Houillier et al, 2004).

- **Sulfate**

Les sulfates (SO_4^{2-}) proviennent du ruissellement ou d'infiltration dans les terrains à gypse. Ils résultent également de l'activité de certaines bactéries (chlorothiobactéries, rhodothiobactéries, etc.). Cette activité peut oxyder l'hydrogène sulfuré (H_2S) toxique en sulfate (Belghitim, 2013).

- **Chlorures**

Les teneurs en chlorures (Cl^-) des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes non polluées ont souvent une teneur en chlorures. Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé (Degremont, 2005).

- **Sodium**

Le sodium est un élément constant de l'eau, toutefois les concentrations peuvent être extrêmement variables. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques

contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, des retombées d'origine marine, de la venue d'eaux salées dans les nappes aquifères, des nombreux usages industriels etc... Un régime normal apporte 3 à 5 g /j de sodium (8 à 12 g /j en chlorure de sodium. La quantité nécessaire est inférieure à 200 mg/j pour l'enfant et à 2000 mg/j pour l'adulte (Belghitim, 2013).

La fabrication des explosifs, dans l'industrie chimique comme oxydant, et comme conservateur dans les denrées alimentaires (Savary, 2010).

I.4.3.7. Nutriments

- **Nitrites**

Ils sont également assez largement présents, mais à des niveaux bien moindres que les Nitrates. Les nitrites proviennent d'une oxydation incomplète des matières organiques. Le taux normal en nitrites est fixé à 0,1mg/l selon l'OMS. La présence des Nitrites dans l'eau en quantité importante dégrade la qualité de l'eau et pourrait affecter la santé humaine. La toxicité liée au nitrite est très significative en raison de leur pouvoir oxydant (Rodier, 2009).

- **Nitrates**

Les nitrates constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont très répandus dans la plupart des eaux et dans les plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et superficielles. Les nitrates sont employés dans la fabrication des explosifs, dans l'industrie chimique comme oxydant, et comme conservateur dans les denrées alimentaires (Savary, 2010).

I.4.3.8. Métaux lourds

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds.

On appelle métaux lourds tout élément métallique naturel dont la masse volumique dépassent 5g/cm³. Ils englobent l'ensemble des métaux et métalloïdes présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Les métaux lourds les plus souvent considérés comme toxique pour l'homme sont : le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. D'autres comme le cuivre, le zinc, le chrome, pourtant nécessaires à l'organisme en petites quantités, peuvent devenir toxiques à doses plus importantes.

I.5 Pollution des eaux

Lorsque l'on considère la qualité des eaux souterraines et leur dégradation, il faut faire la différence entre la contamination naturelle et anthropique. Dans la plupart des cas l'eau souterraine est naturellement potable, et ne nécessite pas de traitement. Il y a quelques exceptions à travers le monde, où l'eau souterraine naturelle a des concentrations de divers matériaux solubles à des niveaux qui sont nocifs pour la santé humaine, animale ou végétale. Un cas bien connu est la forte concentration en arsenic de la nappe au Bangladesh. La salinisation est aussi un exemple de contamination naturelle, mais elle est très souvent aggravée par les activités humaines. Il semble que dans le contexte africain, la plupart des problèmes de qualité des eaux souterraines sont liés à :

- La baisse de la qualité des eaux souterraines en milieu urbain, en raison d'une combinaison de fuite de latrines / fosses septiques et des rejets d'effluents non contrôlés de l'industrie, des eaux usées et des zones d'enfouissement municipales.
- La salinisation des eaux souterraines due à un excès de prélèvement pour l'irrigation, conduisant à une baisse de qualité des eaux souterraines
- L'intrusion saline en raison de l'abaissement de la nappe par des forages de production d'eau non loin ou dans les zones côtières. (GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006)

I.5.1 Sources de pollution

Dans le monde entier, les aquifères sont confrontés à un risque croissant de pollution avec l'urbanisation, le développement industriel, les activités agricoles et les entreprises minières (Figure N° 02). Dans certains cas, il peut prendre plusieurs années avant que l'impact de la pollution par un contaminant persistant ne devienne tout à fait évident.

Les eaux souterraines des forages profonds, ou des sources ou des écosystèmes tributaires des eaux souterraines, ont souvent une trajectoire d'écoulement longue qui peut prendre des décennies ou plus pour se déplacer de la zone de recharge à la zone de décharge. Cela peut conduire à la méprise de la menace de pollution. Malheureusement lorsque que les gens prennent conscience que la source d'eau souterraine est devenue polluée, de grands volumes de l'aquifère auront été généralement déjà contaminés.

Des mesures d'atténuation ont alors tendance à être très coûteuses et la réhabilitation est techniquement problématique et chronophage. Ces aquifères contaminés peuvent être impropres à l'utilisation pendant des décennies ou des siècles. C'est pourquoi les mesures de prévention telles que la protection des eaux souterraines doivent être intégrées dans les activités de planification de l'occupation des sols.

La pollution des eaux souterraines se produit si la charge de contaminants du sous-sol, générés par les émissions d'origine humaine (déversement de déchets, les rejets et fuites) est mal contrôlée, et dépasse la capacité d'atténuation naturelle des sols et couches sous-jacents . Les profils de sous-sol naturels atténuent activement de nombreux polluants de l'eau, et ont longtemps été considérés comme potentiellement efficaces pour l'élimination sûre des excréments humains et des eaux usées domestiques.

L'auto élimination des contaminants pendant le transport souterrain dans la roche / sol est le résultat de la dégradation biochimique et de la réaction chimique. Mais un mouvement retardé du contaminant (dû à la sorption sur les minéraux argileux et / ou matière organique) est également important, car elle augmente considérablement le temps disponible pour les processus aboutissant à l'élimination du contaminant.

Cependant, tous les profils de sous-sol et toutes les couches sous-jacentes ne sont pas aussi efficaces dans l'atténuation des contaminants, ce qui conduit à des risques de contamination des aquifères libres peu profonds (nappe phréatique).

Les menaces de pollution des eaux souterraines proviennent d'une variété de points différents et de sources de contamination non ponctuelles (Figure N° 02 et tableau N° 03) provenant de sources industrielle, agricole, domestique (assainissement inadéquat), de stockage de carburant, médicale et d'autres sources courantes. (GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006)

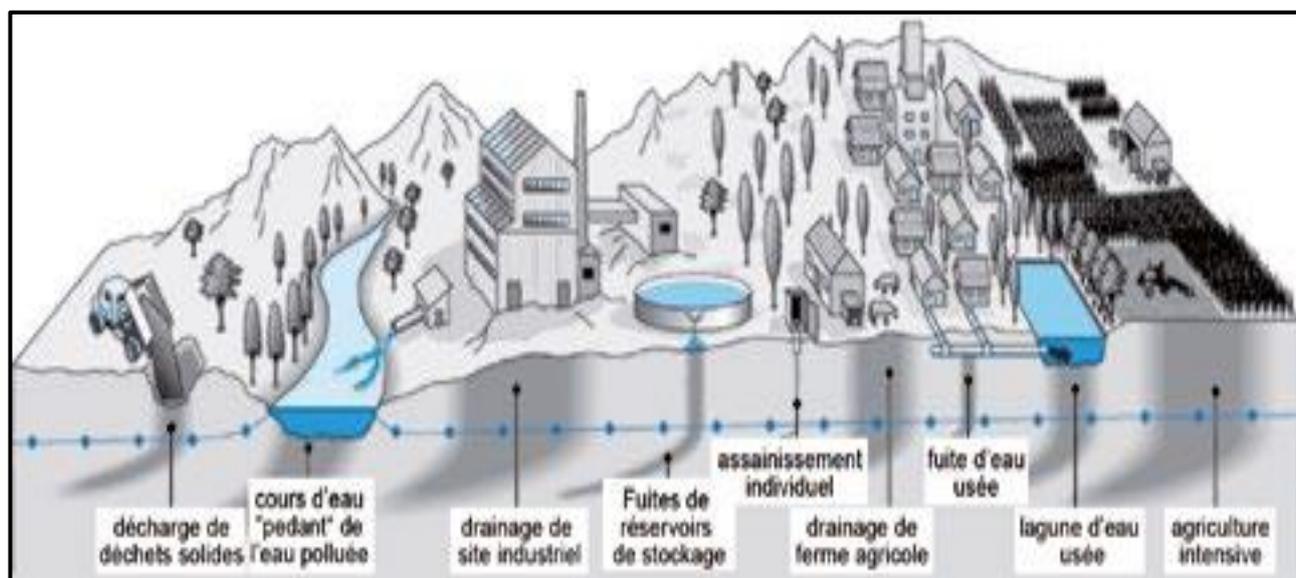


Figure N° 02 : Différentes activités de l'occupation des sols qui génèrent fréquemment des menaces de pollution des eaux souterraines. Source: GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006

Tableau N° 04 : Certains contaminants courants des eaux souterraines et les sources de pollution associées. Source: GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006

SOURCE DE POLLUTION	Type de contaminant
Activité agricole	les nitrates, ammonium, pesticides, organismes fécaux
Assainissement individuel	les nitrates, les organismes fécaux, hydrocarbures synthétiques de trace
Stations d'essence & Garages	benzène, d'autres hydrocarbures aromatiques, des phénols, des hydrocarbures halogènes
Enfouissement des déchets solides	ammonium, salinité, hydrocarbures halogènes, métaux lourds
Industries métalliques	trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, métaux lourds, des phénols, cyanures
Travaux de Peinture	alkylbenzène, tétrachloroéthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, des métaux, quelques hydrocarbures aromatiques
Industrie du bois	pentachlorophénol, certains hydrocarbures aromatiques
Nettoyage à sec	trichloroéthylène, tétrachloroéthylène,
Fabrication de pesticides	divers hydrocarbures halogènes, des phénols, de l'arsenic
Vidange des boues d'eaux usées	les nitrates, les divers hydrocarbures halogènes, plomb, zinc
Tanneries	chrome, divers hydrocarbures halogènes, des phénols
Exploration / Extraction pétrolière et gazière	salinité (chlorure de sodium), les hydrocarbures aromatiques
Les mines de charbon et métallifères	acidité, divers métaux lourds, fer, sulfates

I.5.1.1. La pollution domestique

Elle est généralement liée aux rejets d'eaux usées, qui peuvent être de deux types :

- Les eaux usées issues de l'utilisation d'eau au quotidien (toilettes, cuisine, douche...) contiennent des déchets organiques ou de la matière fécale. Les habitations mal ou non raccordées au réseau d'assainissement collectif, peuvent ainsi engendrer une pollution bactériologique de l'eau.

- Les produits ménagers que nous utilisons sont chargés de polluants chimiques nocifs pour l'environnement. Mélangés à l'eau, ils terminent dans nos canalisations ou dans la nature et engendrent une pollution chimique. Difficilement traités par les réseaux d'assainissement, les résidus de ces produits viennent enrichir les cours d'eau en substances chimiques. (La pollution de l'eau | Surfrider Ocean Campus)

I.4.1.2. Origine industrielle

Les industries de fabrication et de secteur tertiaire ont des demandes élevées en eau pour les procédés de refroidissement, de traitement ou de nettoyage.

La pollution des eaux souterraines se produit quand l'eau utilisée est retournée au cycle hydrologique.

Certaines entreprises, habituellement sans accès aux réseaux d'égouts, se servent dans les eaux souterraines peu profondes. Elles emploient des fosses ou des puisards secs, ou envoient l'eau usagée dans les réservoirs septiques. Tout ceci peut mener à la contamination des sources souterraines d'eau potable (Degrémont, 1991).

Les pratiques en matière de disposition d'eau usagée de certains types d'entreprises, telles que des stations-service d'automobile, fabricants de composant électrique ou de machine, processeurs de photo sont particulièrement concernés parce que les déchets qu'ils génèrent sont susceptibles de contenir des produits chimiques toxiques (Degrémont, 1991).

Ces différentes sources de contamination industrielles incluent le nettoyage des réservoirs ou la pulvérisation d'équipement sur la terre, l'évacuation de déchets dans les systèmes septiques ou les puits secs, et le stockage de matériaux dangereux dans des secteurs découverts ou dans les secteurs qui n'ont pas des garnitures avec des drains ou des bassins de captation.

On trouve aussi les réservoirs de stockage contenant des produits pétroliers, des acides, des dissolvants ou des produits chimiques qui peuvent avoir des fuites dus à la corrosion, à des défauts, à des problèmes dans les installations.

L'exploitation du carburant et des minerais non-combustibles peut elle aussi créer une contamination des eaux souterraines (Degrémont, 1991).

I.5.1.3 La pollution agricole

Les pesticides, les engrais, les herbicides et les déchets animaliers sont des sources agricoles de contamination des eaux souterraines.

Les sources agricoles de contamination sont nombreux et variés débordements des engrais et des pesticides pendant la manipulation, écoulement du chargement et lavage des pulvérisateurs de pesticide ou de tout autre équipement d'application, utilisation de produit Chimique (Marquita, 2004).

Une région agricole qui manque de drainage est considérée par beaucoup de fermiers comme étant terre perdue du point de vue du revenu.

Ainsi, ils peuvent installer des tuiles de drain ou des puits de drainage pour rendre la terre plus productive. Les puits de drainage servent alors de conduit direct aux eaux souterraines pour les déchets agricoles.

Le stockage de produits chimiques agricoles près de conduits d'eaux souterraines, telles que les puits, les trous d'évier, est susceptible de s'accumuler et de provoquer une contamination.

La contamination peut également se produire quand des produits chimiques sont stockés dans

des secteurs découverts, non protégés du vent et de la pluie (Marquita, 2004).

I.5.1.4. Phénomènes naturels

Les eaux souterraines contiennent quelques impuretés, même si elles ne sont pas affectées par les activités humaines.

Les types et les concentrations d'impuretés naturelles dépendent de la nature du matériel géologique par lequel les eaux souterraines se déplacent, et de la qualité de l'eau de recharge.

Les eaux souterraines se déplaçant à travers les roches et les sols sédimentaires, peuvent absorber un éventail de composés tels que le magnésium, le calcium, et les chlorures.

Certaines couches aquifères ont des concentrations naturelles élevées en constituants dissous tels que l'arsenic, le bore, et le sélénium. L'effet de ces sources normales de contamination sur la qualité d'eaux souterraines dépend du type du contaminant et de ses concentrations (Stanley, 2005).

I.4.1.5. Pollution atmosphérique

L'eau d'origine pluviale est relativement polluée. L'origine de cette pollution peut provenir des gaz ou solides en suspension rejetés dans l'atmosphère par les véhicules, les usines ou les centrales thermiques. Ces polluants (oxyde de carbone, dioxyde de soufre, poussière...) sont envoyés vers le sol à la moindre averse. (K.KARA.2020)

I.5.2 Les principaux polluants des eaux

La pollution des milieux aquatiques par des substances introduites par l'homme comme les produits agricoles et industriels a des conséquences néfastes qui menacent l'environnement et qui sont de plus en plus responsables de l'apparition de la pollution organique et chimique de l'eau qui nécessite une lutte soutenue.

I.5.2.1 Les polluants microbiologiques

La pollution microbiologique des eaux se traduit par une forte contamination par de nombreux agents pathogènes, bactéries, protozoaires et virus. L'importance de la pollution de l'eau dépend également des conditions d'hygiène des populations, mais aussi des caractéristiques écologiques et épidémiologiques.

Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient dans l'eau sont les bactéries, les virus, les parasites et les champignons, on parle ainsi de la pollution bactérienne, virale ou parasitaire. (K.KARA.2020)

I.2.2.2 Les polluants chimiques

La pollution chimique des eaux résulte de la libération de certaines substances minérales toxiques dans les cours d'eau (les nitrates, les phosphates, l'ammoniac et autres sels) ainsi que des ions métalliques. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et

les rendent plus dangereuses. Les polluants chimiques sont classés en substances chimiques dites indésirables, les pesticides, les détergents, les colorants et autres éléments toxiques.

(KARA.K.2020)

I.5.2.3. Les polluants physiques

La pollution physique désigne la pollution thermique due à la température élevée causant une diminution de la teneur en oxygène dissous ainsi qu'une réduction de la solubilité des gaz et la pollution mécanique, qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variés dans l'eau qui lui confèrent un caractère trouble.(KARA.K.2020)

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit notre recherche par la détermination des caractéristiques des eaux souterraines, normes de qualité d'eau, principaux paramètres de potabilité et finalement la signification minutieuse de la pollution des eaux souterraines.

Les quatre points étudiés dans ce chapitre sont indispensables pour atteindre une compréhension convenable, et meilleur à notre thème présenté dans ce mémoire.

Le chapitre qui s'intitule qualité des eaux souterraine et problème de pollution est une étape pédagogique qui permettra d'avoir les paramètres, indicateurs et les substances fondamentales de l'eau souterraines.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Afin de donner une caricature à la commune de Lioua, à travers maints points : commençant par la situer géographiquement, montrer sa spécificité hydrologique et sa spécificité météorologique ainsi que géologique, sans fermer la parenthèse. Car notre chapitre se résume en une petite étude de tous les détails qui font partie de la présentation de cette zone d'étude Lioua.

Cette dernière formerait un point essentiel sur lequel la présente étude a été effectuée, car notre travail s'intéresse en particulier à cette commune et pour arriver à notre objectif celui de faire une recherche menée sur sa qualité d'eau à l'aide de l'indice (WQI) et une analyse multivariée, et on a intérêt de décortiquer, si nous pouvons dire cet endroit pour donner des résultats pertinents et fiables.

II.2 Situation géographique de la région de Ziban (Lioua)

La région des Ziban fait partie de la wilaya de Biskra, qui constitue l'une des grandes régions du Sud-est algérien. Elle est située à l'ouest du chef-lieu de la wilaya. Elle est limitée au Nord par les communes suivantes ; d'El Outaya, Branis et Mchounech. À l'Est par la commune d'Ain naga, El-Haouch. Au Sud par la commune de Still (wilaya d'El Oued) et à l'Ouest par la commune de Chaïba, Zerzour, et Ouled Slimane (wilaya de M'sila).

Cette région est l'une des grandes oasis du Sahara algérien, elle est composée de deux entités distinctes. Celle située à l'ouest de Biskra est appelée le Zab Gharbi. Elle regroupe administrativement les communes de Tolga -El Ghrous -Bordj ben Azzouz -Lichana -Bouchagroune - Foughala et El Hadjeb, qui forment un premier groupement constituant l'axe nord de l'oasis. Alors que l'axe sud de l'oasis est formé par l'ensemble des communes suivantes : Oumeche, Mlili, Ourelal, Mekhadma et Lioua.

Commune de Lioua :

Située entre l'altitude de $34^{\circ}38'00''N$ et $5^{\circ}25'00''E$, est une commune placée dans la partie de sud-ouest de la Wilaya de Biskra avec une superficie de 243.10 km². elle appartient administrativement et juridiquement à la Daïra d'Ourlal. Elle est située à environ de 48 km de son siège social et elle est bordée au nord par la ville de Tolga et reliée à celle-ci par la route nationale n°61 à distance de 42 km à l'ouest se trouvent les communes Doucen et Elghrous, au nord-ouest se trouve la commune de Borj Ben Azouz, et à l'est se trouve la commune de Mkhadma, tandis qu'à l'extrême nord-est elle se trouve à côté par la municipalité de Lichana.

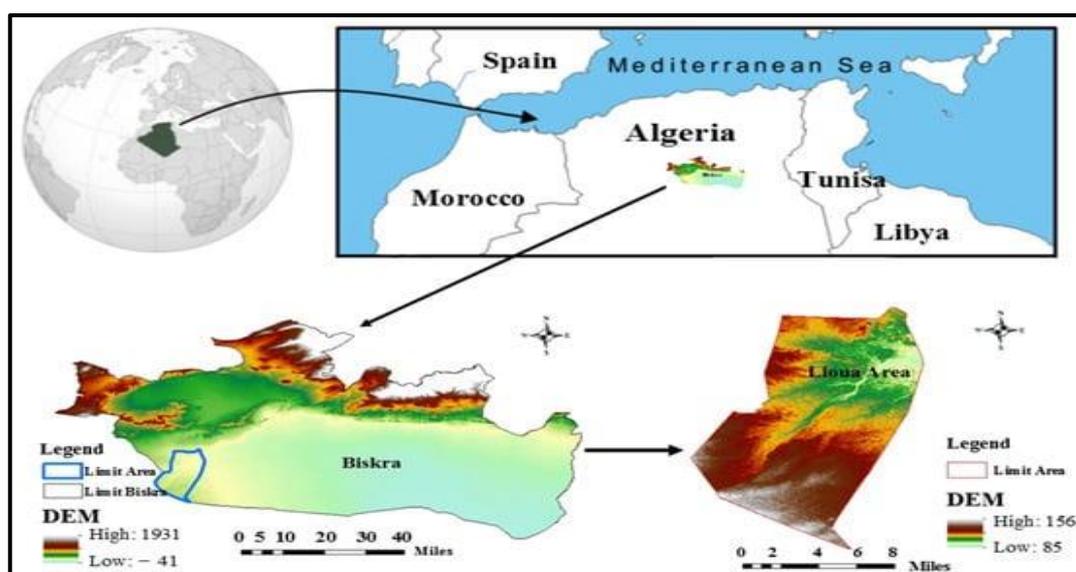


Figure N° 03 : Situation géographique de la commune de Lioua (Athamena, A 2022)

II.3 Répartition de l'habitat

Une population (l'habitat) est constituée d'individus de la même espèce formant un groupe suffisamment distinct du reste de l'espèce pour être considéré à part. Cette distinction peut être évaluée principalement par des approches génétiques (fréquences alléliques différentes) ou démographiques (dynamique du groupe dépendant des fréquences de naissance et de mort au sein du groupe).

La connaissance de répartition de l'habitat de la région de Lioua permet de cerner les problèmes et connaître les handicaps et les contraintes qui vent défavorisés son évolution, sa juste répartition spatiale, son dynamisme et ses besoins.

Plusieurs classifications définies la répartition de l'habitat (citoyen) sur notre zone d'étude.

Les chiffres obtenus deviennent enregistrés sur la base de données de la DPSB de la Wilaya de Biskra et les tableaux suivants montrent la répartition d'habitat selon plusieurs facteurs et paramètres jusqu'à la fin de mois de décembre 2022.

Tableau N° 05 : Répartition de l'habitat (DPSB Fin 2022)

Commune	Nombre de population	Superficie Km ²	Densité C/Km ²
Lioua	29 895	242.10	123.8

Tableau N° 06 : Répartition de l'habitat selon la zone d'identification (DPSB Fin 2022)

Commune	Nombre de population par rapport à la zone d'identification				Total
	Groupe centre-ville	Groupe secondaires	Zone dispersés	Population nomade	
Lioua	10390	4658	14845	0	29893

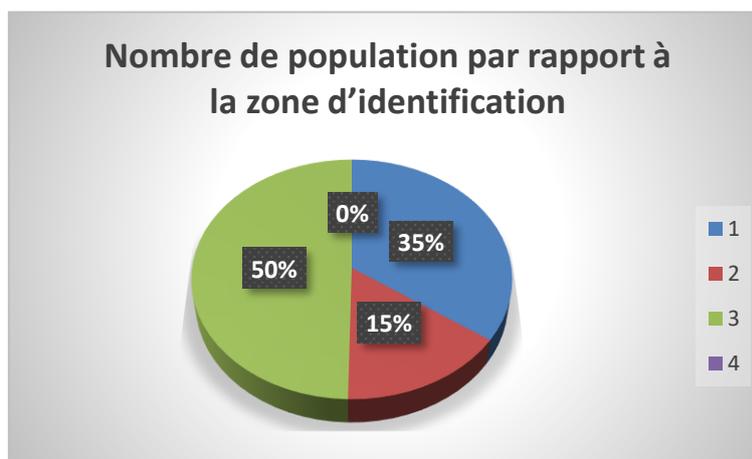


Figure N° 04: Nombre de la population par rapport à la zone d'identification

Tableau N° 07 : Répartition de l'habitat selon la zone urbaine ou rurale (DPSB Fin 2022)

Commune	Répartition l'habitat selon la zone		Total
	Urbaine	Rurale	
Lioua	0	29893	29893

Tableau N° 08 : Répartition de l'habitat selon le genre (DPSB Fin 2022)

Commune		Répartition l'habitat selon le genre		Total
Lioua	Masculin	Féminin	29893	
	15 246	14 647		

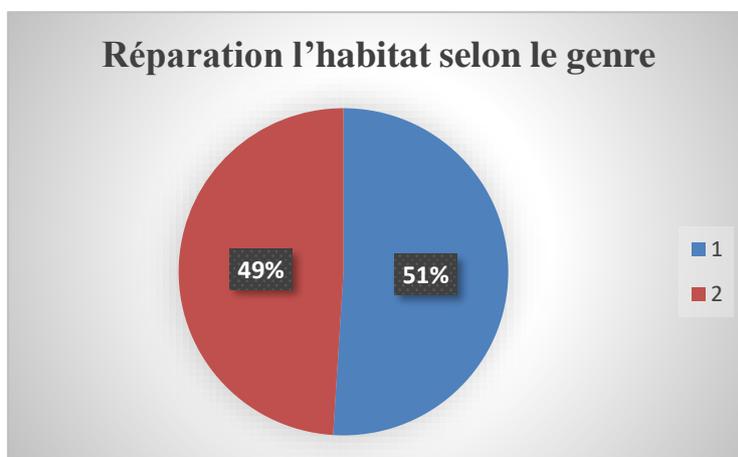


Figure N° 05 : Répartition l'habitat selon le genre

L'analyse des chiffres des tableaux précédents permis de tirer certains résultats sur la répartition de l'habitat, et l'examen de ces derniers démontrent des caractéristiques suivantes :

- Une densité moyenne (124 C/Km²) de population sur cette zone.
- Un léger équilibre entre le nombre d'habitat et sa zone d'identification administrative.
- La répartition de l'habitat selon la zone d'habitation définie la région comme une zone rurale qui signifié une région agricole et un territoire d'élevage.
- Presque un équilibrage de nombre qui réside dans les deux sexe masculins et féminin (seulement 02 % de déférence).

II.4 Activité d'agriculture

La phoeniciculture est très importante et représente la première ressource dans la commune de Lioua, cette culture du palmier dattier dont 70% est composée de la fameuse Degletnour avec sa renommée mondiale.

Le nombre est dépassé cent mille de palmiers, la superficie destinée à cette culture connaît un accroissement très important avec le lancement fréquent des programmes de développement agricole par l'état (F.N.D.A, P.N.D.A..) et l'aide que consacre les banques a cette activité (crédits bancaires, assurances...).les cultures maraîchères sous serres vient se placer dans les premiers rangs dans le domaine agricole dans la commune de Lioua avec sa forte rentabilité. et se voit s'acquérir de plus en plus de terrain agricole.

Malgré le soin que porte l'état sur ce secteur stratégique et spécialement dans cette région, cette activité connaît malheureusement des problèmes qui entravent son développement.

On peut désigner des problèmes, dans les quelques points suivants :

- Manque de la main d'œuvre qualifiée.
- Drainage du surplus en eau d'irrigation.
- Exploitation anarchique et excessive des nappes non renouvelables
- Vieillesse des palmiers dattiers.
- Branchement à l'énergie électrique (ou même solaire) et réalisation des pistes agricoles.

II.5 Végétation (couvert végétal naturel)

La végétation naturelle de la région des Ziban (Lioua) est adaptée à un climat aride presque toute l'année, le milieu désertique est caractérisé par un couvert floristique très clairsemé, discontinu, à aspect généralement nu et isolé et très irrégulier sous l'influence des facteurs édapho-climatiques qui sont très rudes. Mais Halitim (1989) montre que ces facteurs n'inhibent pas l'apparition ou la prolifération d'une flore saharienne spontanée caractéristique que sous l'existence des conditions plus ou moins favorables favorisée par des zones géomorphologiques spécifiques. Parmi les espèces herbacées et arbustives que l'on peut rencontrer dans cette zone, on peut citer : *Salsola vermiculata* ; *Salsola* sp; *Carex* sp; *Tamarix articulata* ; *Atriplex halimus* ; *Helianthemum* sp. Selon Dubost (2002), l'exploitation agricole est fortement influencée par les conditions physiques locales comme la géomorphologie, la topographie et la circulation de l'eau. L'une des meilleures cultures arboricoles, qui s'adapte le mieux au sol et au climat de la région, est celle du palmier dattier qui constitue la richesse principale de la population locale comme notre zone d'étude Lioua.

La région des ziban est devenue ces dernières années la première région, d'Algérie, productrice de primeurs maraichères sous serre, détrônant même les régions traditionnelles de la plasticulture située au nord du pays (Tipaza, Boumerdès et Jijel) avec une superficie de 3079,76 m (Belhadi et al., 2016).

II.6 Types de Sol de la région d'étude

Comme tous les sols des régions arides du monde, les sols de la zone saharienne d'Algérie contiennent des quantités relativement importantes de sels solubles. L'accumulation de ces sels, dans ce type de climat, est due à la rareté des pluies, qui freine la lixiviation de ces sels (Halilet, 1998).

Selon l'étude de l'ANAT en 2003 sur « Schéma directeur des ressources en eau » de la wilaya de Biskra, la Caractérisation et la répartition des ressources en sols rencontrées de la région des Ziban sont classés comme de suite :

- Classe des sols peu évolués (régosols).

- Classe des sols calcimagnésiques.
- Classe des sols halomorphes.

La région se divise généralement en deux zones : à l'est on a le Zab el Charki et à l'ouest on a le Zab el Gharbi (Endroit de notre zone d'étude). À l'est les sols sont généralement riches en argile et en calcaire par contre à l'ouest (Notre zone d'étude) la texture est généralement à

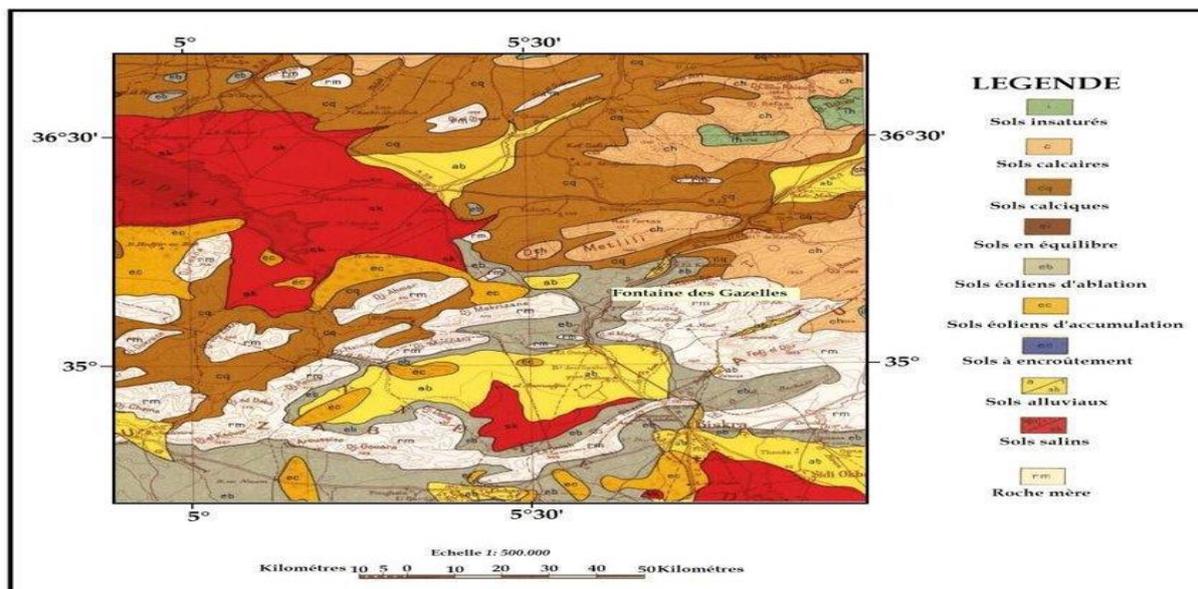


Figure N° 06 : Carte pédologique de la région de Biskra (Durant, 1958)

II.7 Relief

Lioua appartient d'une région qui est située au piémont Sud de la chaîne montagneuse des Ziban (Monts du Zab). Différents types de relief peuvent être distingués du Nord au Sud, de la manière Suivante :

- Une zone montagneuse avec relief parfois assez accidenté et d'accès difficile, le point culminant de cette zone est Djebel Ksoum (1087 m) ; il est situé au Nord-Ouest, dans la commune de Tolga.
- Une zone de piémonts composée d'éboulis et parfois de dunes de sables éoliens dunes qu'on retrouve aussi au Sud – Est de Lichana et au Sud-Ouest de Bouchagroune
- Une zone plaine composant plus de 50% du territoire du groupement.
- Une zone de marécages et fonds humides au Sud de Tolga et au Sud de Bordj Ben Azzouz.

Oued Metana et Oued Oum El Henbal. Prenant leur source dans la région montagneuse du Nord, il se jette dans les dépressions ou dayas comme celles du Maâdher ou d'El Baher par exemple.

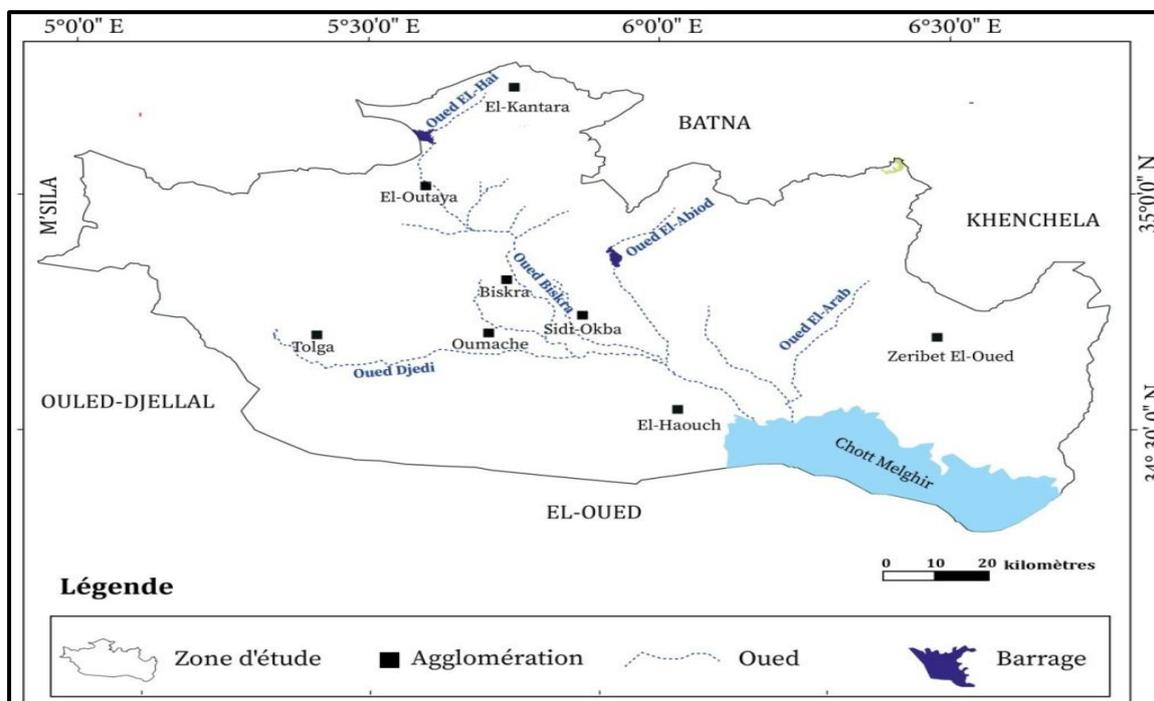


Figure N° 08 : Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).

II.8.2 Climat

L'ensemble agroécologique des Ziban appartient à l'étage bioclimatique saharien, caractérisé par un hiver doux peu pluvieux et un été sec et chaud.

Le climat de la région est du type aride ou semi désertique avec des étés chauds et secs et des hivers froids et secs.

Les principaux paramètres climatiques retenus dans cette étude sont : les précipitations, la température, le vent, l'humidité relative, (les climatiques sont obtenues à partir de l'Office National de Météorologie O.N.M.2019)

II.8.2.1 Précipitation

Le terme « précipitations » englobe toutes les eaux météoriques qui tombes sur la surface de la terre, que ce soit sous forme liquide (pluie) ou sous forme solide (neige, grêle). Dans notre région d'étude, les précipitations sont faibles.

Tableau N° 09 : Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018)
Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
PRECIPITATIONS EN MM	12.8	5.4	15.0	15.9	13.0	6.5	0.8	2.1	18.2	28.7	10.8	6.8

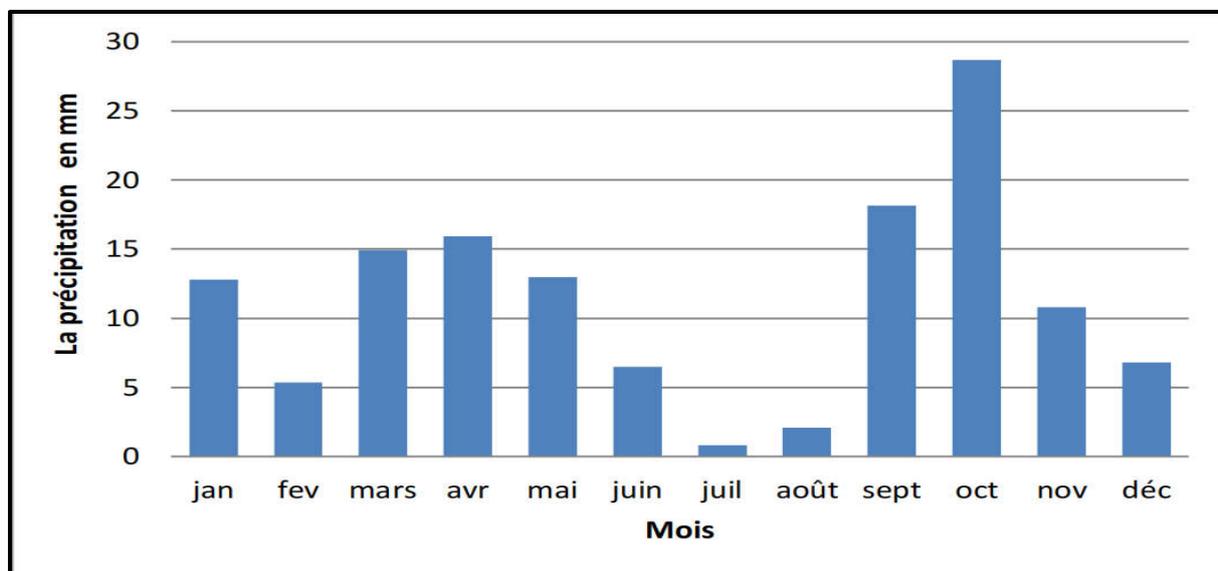


Figure N° 09 : précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)

La lecture de ces données montre que le climat de la région étudiée est caractérisé par l'irrégularité de la pluviométrie. La figure, montre que les précipitations moyennes enregistrées au niveau de Biskra durant la période 2008-2018 sont assez faibles car elles ne dépassent pas une moyenne de 135,8 mm/an.

La pluviométrie moyenne la plus élevée est enregistrée durant le mois d'octobre avec 28,7 mm et la plus faible au mois de juillet avec 0,8 mm.

Tableau 10 : Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)
Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JUIN	JUI	AOOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI
PRECIPITATIONS EN MM	0	0	2.29	13.21	17.68	0.76	0.5	1.52	0.25	9.14	18.5	9.8

Les mois de juin et juillet sont très secs dans cette année avec précipitation de 0 mm et dans le mois d'avril est la plus élevée avec 18,5mm.

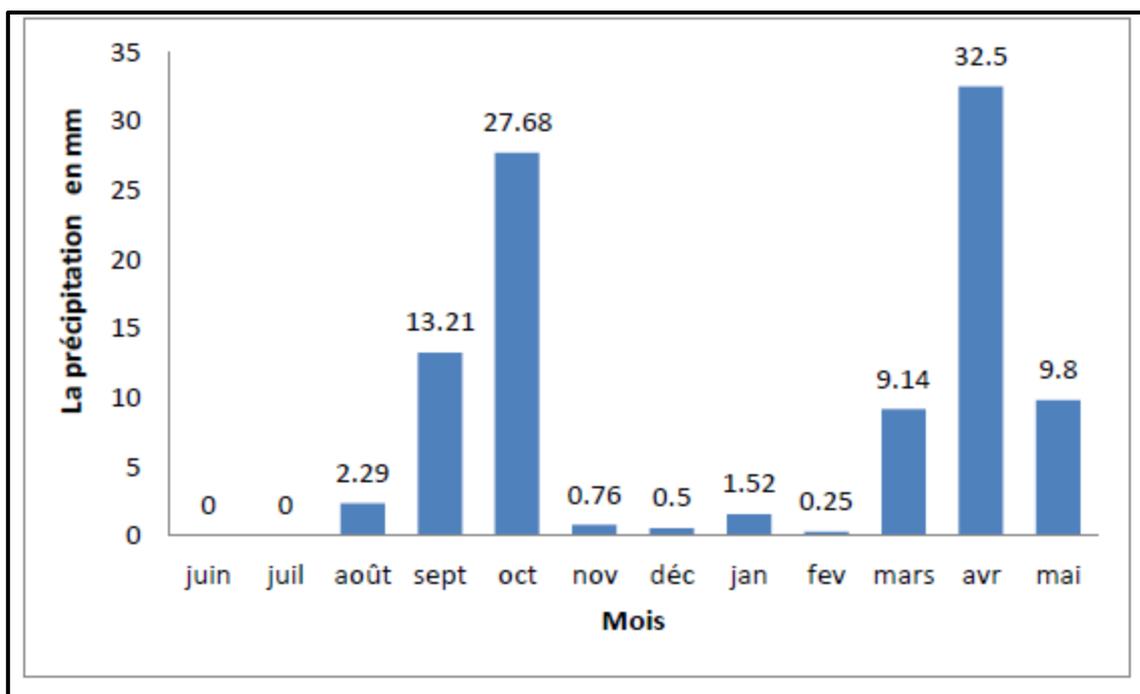


Figure N° 10 : La précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019)

II.8.2.2 Températures

La température est le second facteur, après la précipitation qui conditionne le climat d'une région. Elle permet aussi d'estimer le déficit d'écoulement.

Tableau N° 11 : Températures moyennes mensuelles [maximales: T (°C) Max. et minimales: T (°C). Min] de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018)
Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
T° C MAX	18.1	19.1	23.2	28.1	32.5	37.5	41.6	40.2	35.1	29.4	22.7	18.5
T° C MIN	7.1	7.8	11.4	15.4	19.5	24.4	28.4	27.6	23.6	18.1	12.0	7.8
T° C MOY	12.4	13.3	17.4	22.0	26.2	31.4	35.3	34.1	29.4	23.6	17.1	12.7

- T° C MAX : Moyennes mensuelles des températures maximales.
- T° C MIN : Moyennes mensuelles des températures minimales.
- T° C MOY : Températures moyennes mensuelles.

A partir du tableau, les variations des températures moyennes mensuelle, minimales et maximales, représentées dans la figure, montrent en général que le mois de Janvier est le mois le plus froid, avec une température de 12,4 °C, et que les mois de Juillet et Août sont les plus chauds, avec une température allant de 35,3°C et 34,1°C, respectivement.

Tableau N° 12 : Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)

MOIS	JUIN	JUIT	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI
T° C MAX	36.0	42.7	36.9	35.9	27.1	21.6	19.2	16.5	18.7	23.0	26.5	29.8
T° C MIN	23.9	30.5	26.4	25.1	17.4	12.1	8.0	7.5	7.4	10.4	15.0	18.0
T° C MOY	30.6	37.1	31.8	30.4	22.1	16.7	13.2	12.1	13.1	17.1	21.0	24.5

D'après ce tableau, on trouve que les mois de juillet et d'Août étaient les mois le plus chaud sont de 37,1°C et 31,8°C. Et les basses températures sont enregistrées en mois de janvier avec une moyenne de 12,1°C.

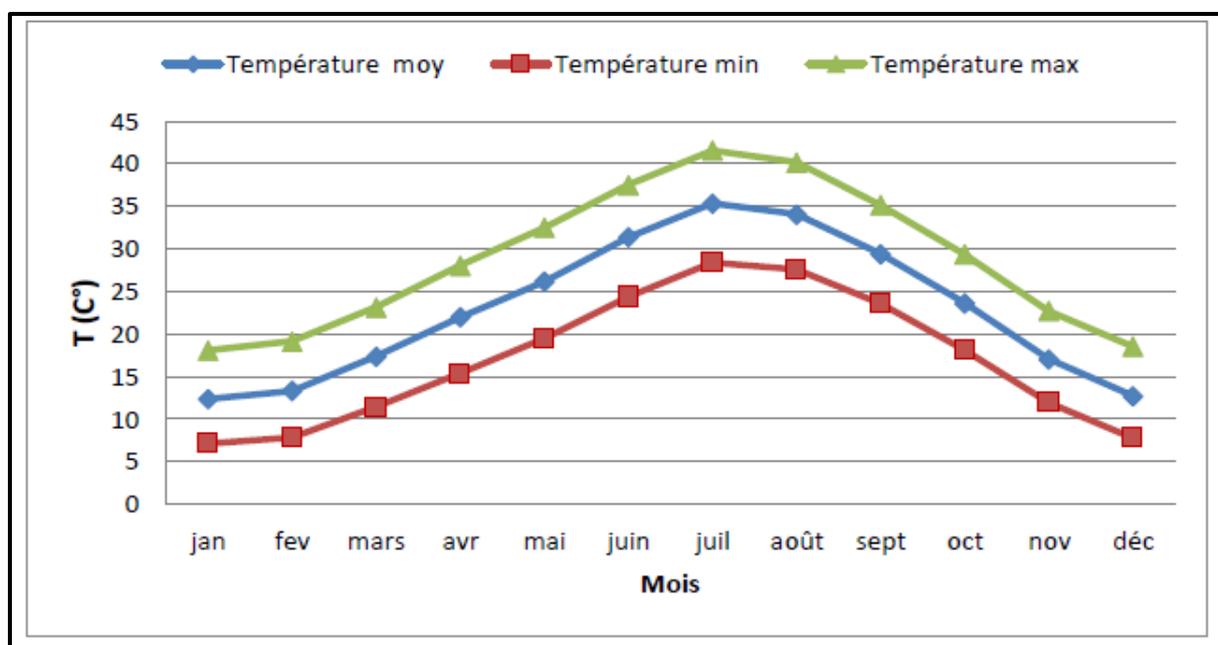


Figure N° 11 : Variabilités thermiques de la région de Biskra durant la période (2008-2018)

II.8.2.3 Evapotranspiration

Le processus de l'évaporation s'intensifie aux moments du sirocco (O.N.M., 2010) (Djellouli, 1990) cite que l'évaporation est fonction des températures, de l'humidité, du rayonnement solaire, la vitesse des vents, l'importance du couvert végétal et du degré d'humidité du sol.

Tableau N° 13 : Evaporation moyennes mensuelle pour la période de (2008– 2018).

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
ETO	2.9	3.6	5.4	6.8	8.7	9.9	10.3	8.9	7.0	5.0	3.4	2.4

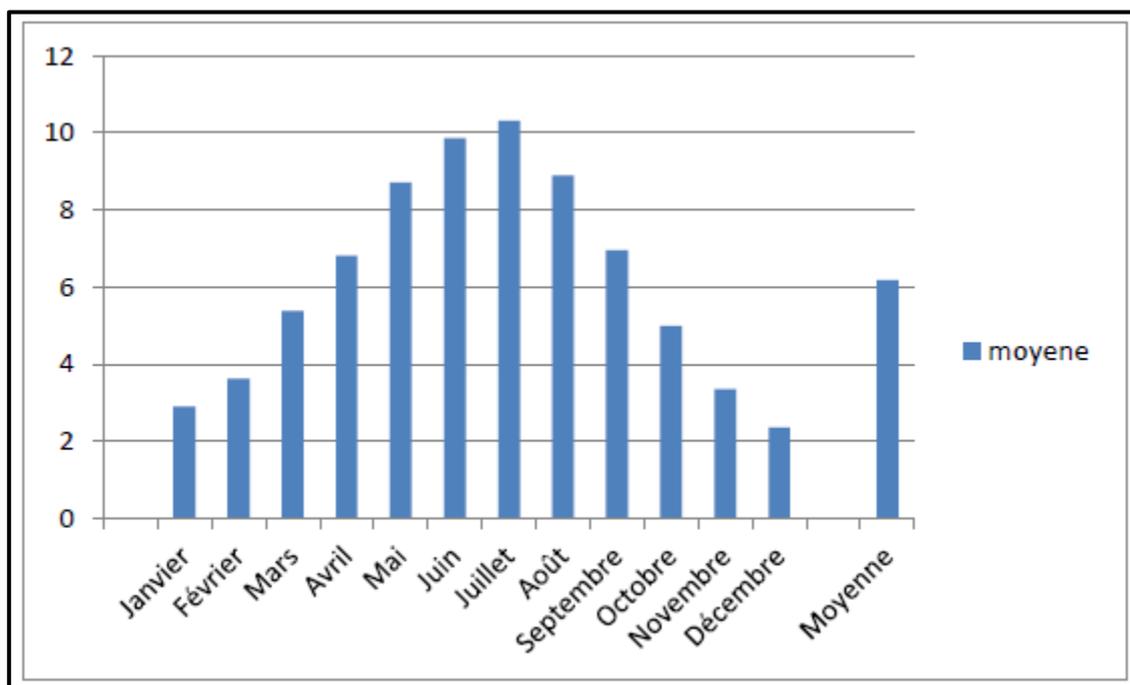


Figure N° 12 : Evaporation mensuelle pour la période de (2008– 2018).

D'après l'histogramme (figure N° 10) ; on remarque que l'évaporation moyenne la plus élevée se concentre au mois de juillet 10.3 mm (Tableau N° 12). L'évapotranspiration est très importante dans la région, la méthode de "Turc" nous a permis d'obtenir une valeur de 2540.85mm/an. L'intensité de l'ETP est fortement renforcée par les vents et notamment ceux qui sont chauds (Sirocco)

II.8.2.4. Les vents dominants

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année Dans la région de Biskra, les vents sont fréquents durant toute l'année. En hiver, on enregistre la prédominance des vents froids et humides venant des hauts plateaux et du nord-ouest, les vents issus du sud sont les plus secs et froids.

Tableau N° 14 : vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018)
Source Station météorologique de Biskra 2019

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Vitesse de vent (km/h)	13.3	16.2	17.1	16.4	16.6	14.5	12.2	11.3	12.2	10.7	12.1	11.2

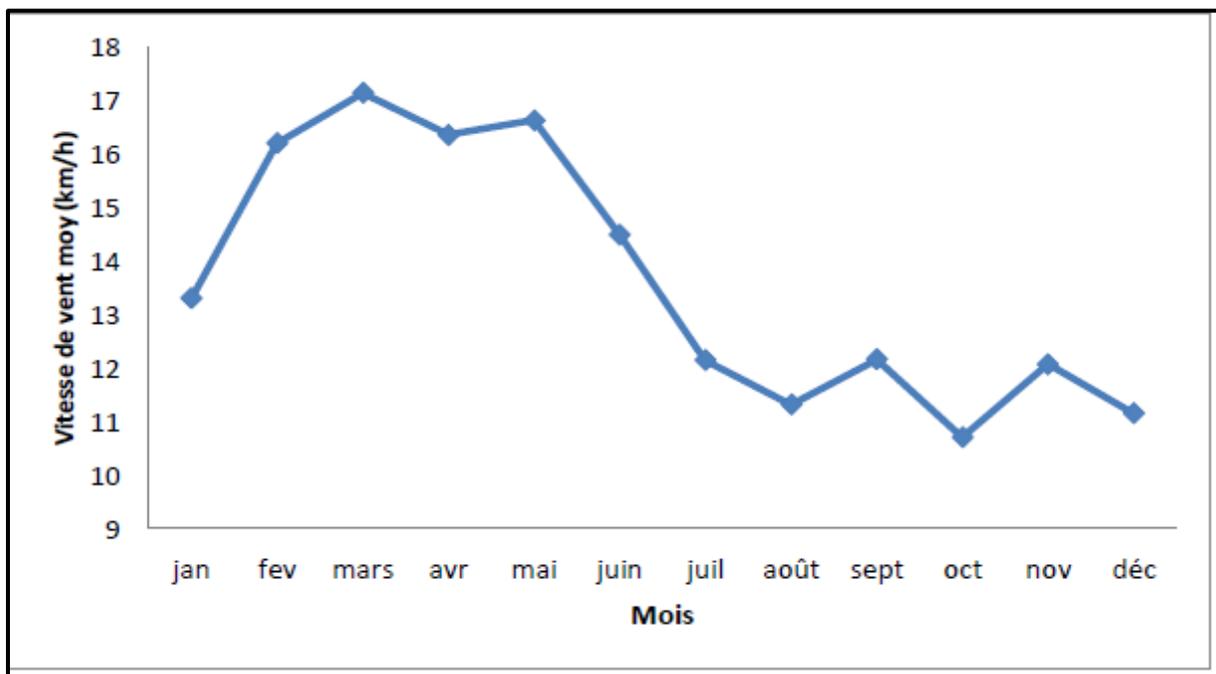


Figure N° 13 : Courbe de la vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année, avec des vitesses moyennes mensuelles de 13,6 km/h environ ; alors que les vitesses maximales sont enregistrées aux mois de Mars de 17,1 km/h, et la vitesse minimale au mois d'Octobre de 10,7 km/h.

Durant la saison sèche, les vents dominants sont de secteur Sud-Est. En effet, durant cette période arrivent souvent des siroccos, d'une moyenne de 58 jours/an.

Tableau N° 15 : vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)

Mois	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai
Vitesse de vent (km/h)	16.7	13.6	11.6	10.4	14.6	16.6	10.7	20.8	15.0	11.7	17.6	16.5

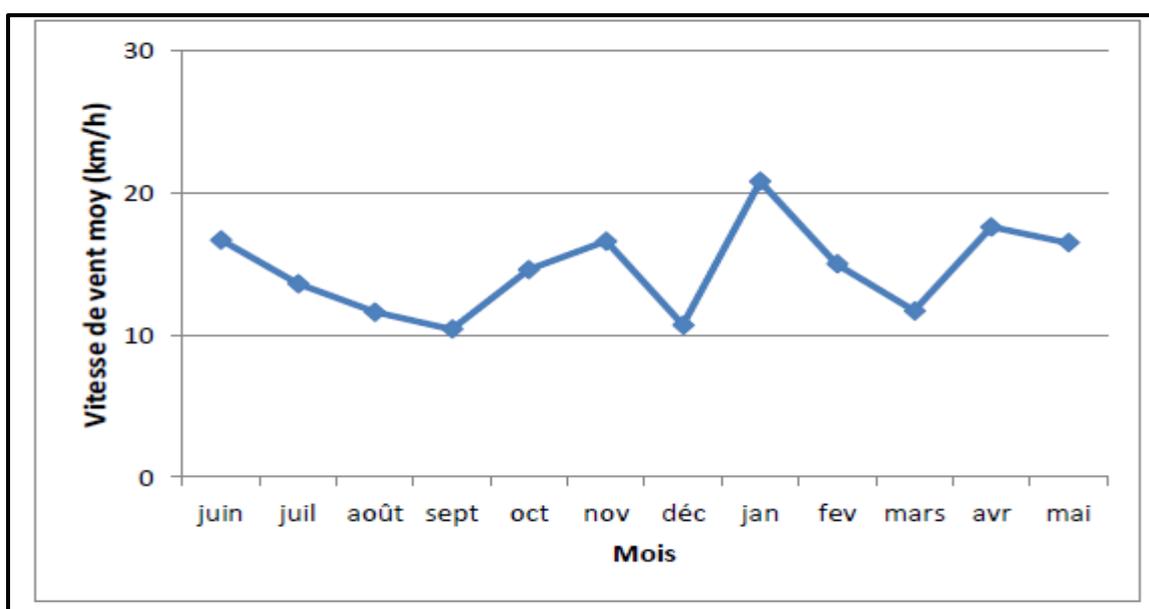


Figure N° 14 : La vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019)

Pour le vent, est toujours répartie dans cette période aussi avec une valeur élevée de 17,6% dans le mois d'avril et une autre très basse de 10,4% dans le mois de septembre

II.8.3 Le climat suivant les nouvelles données climatiques

II.8.3.1 Identification de la période sèche

De nombreux auteurs (Giacobbe, 1961) ont proposé diverses formules pour caractériser la saison sèche, qui joue un rôle capital dans la distribution de la végétation, notamment par sa durée et son intensité. Selon Bagnouls et Gaussen (1953), le diagramme ombrothermique de Gaussen permet de définir empiriquement la durée de la saison sèche et par conséquent la saison humide. Il tient compte de la pluviométrie moyenne mensuelle (P) (mm) et la température moyenne mensuelle (°C), qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviométrie est doublée de la température. La sécheresse s'établit lorsque la pluviosité mensuelle est inférieure au double de la température moyenne

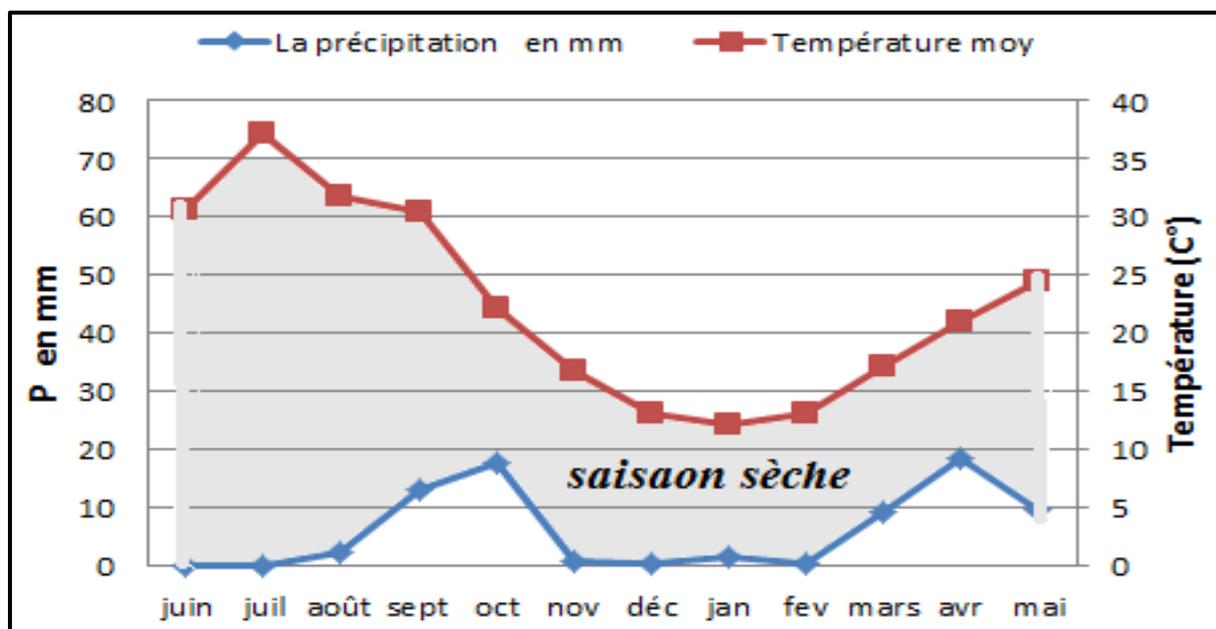


Figure N° 15 : le diagramme ombrothermique (Juin 2018-Mai 2019)

Pour la région de Biskra, Ce diagramme a été réalisé avec les données climatiques relevées durant de la période 2008 à 2019 et aussi dans toute l'année d'étude et montre que la période sèche s'étale durant toute l'année. (Figure N°13)

II.8.3.2 Climagramme d'Emberger

Il permet de situer la région d'étude dans l'étage bioclimatique qui lui correspond (Dajoz, 1971). Le quotient pluviothermique d'Emberger est déterminé selon la formule suivante (Stewart, 1968) $Q = 3,43 \times P / (M - m)$ (01)

P: la somme des précipitations annuelles exprimées en mm.

M: la moyenne des températures maxima du mois le plus chaud.

m: la moyenne des températures minima du mois le plus froid.

- Humide pour $Q > 100$
- Tempérée pour $100 > Q > 50$
- Semi-aride pour $50 > Q > 25$
- Aride pour $25 > Q > 10$
- Désertique pour $Q < 10$

Donc :

Tableau N° 16 : Valeurs d'indice de Climagramme d'Emberger, station de Biskra (2008, 2018)

Région	P (mm)	M (°C)	m (°C)	Q	Etage bioclimatique
Biskra	135.8	41.6	7.1	13.5	Saharien à hiver chaud

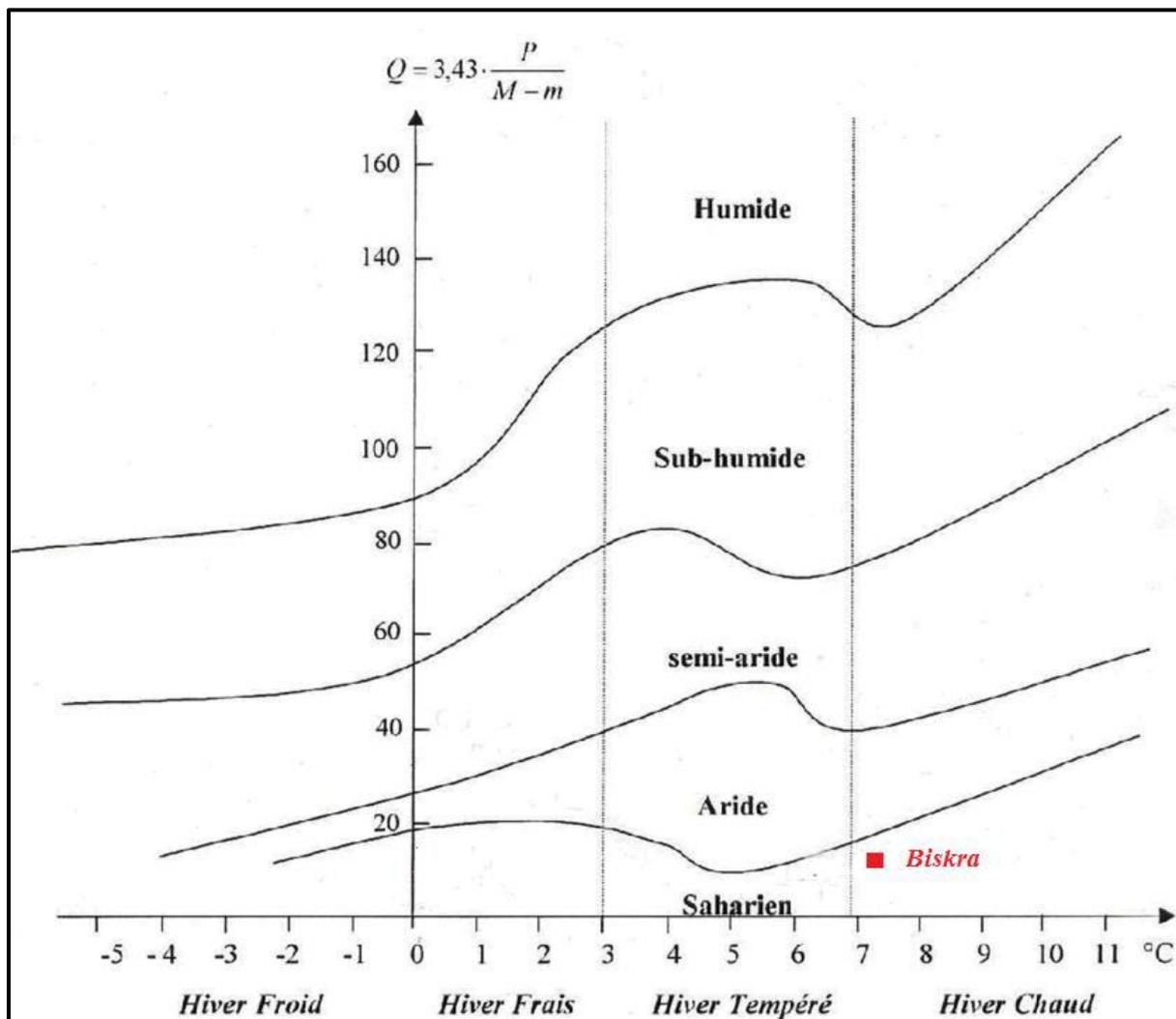


Figure N°16 : Localisation de la région de Biskra sur le Climagramme d'EMBERGER

D'après les données climatiques et la valeur de **Q** (indice de Climagramme d'Emberger), la valeur de **Q** est égale de **13.5**, la région de Biskra classé dans l'**étage bioclimatique saharien à hiver chaud** durant la période (2008-2018).

II.9. Géologie de la zone d'étude

D'après la carte géologique de l'Algérie nord au 1/200 000, la région d'étude s'inscrit dans un contexte géologique **<Qt>** : ce sont des terres quaternaire, constitués par des dépôts gypseux blanchâtres avec une épaisseur très importante.

Le quaternaire **<Qt>** est caractérisé aussi par une érosion plus active que l'alluvionnaire. Dans la majeure partie de la région, malgré la présence d'une immense terrasse datant du quaternaire ancien, les dépôts pliocènes préexistants sont partiellement détruits. Les produits de lessivage sont transportés par les crues des oueds vers le Sud-Est, dans la région des grands Chotts. (N.GOUSKOV, 1964).

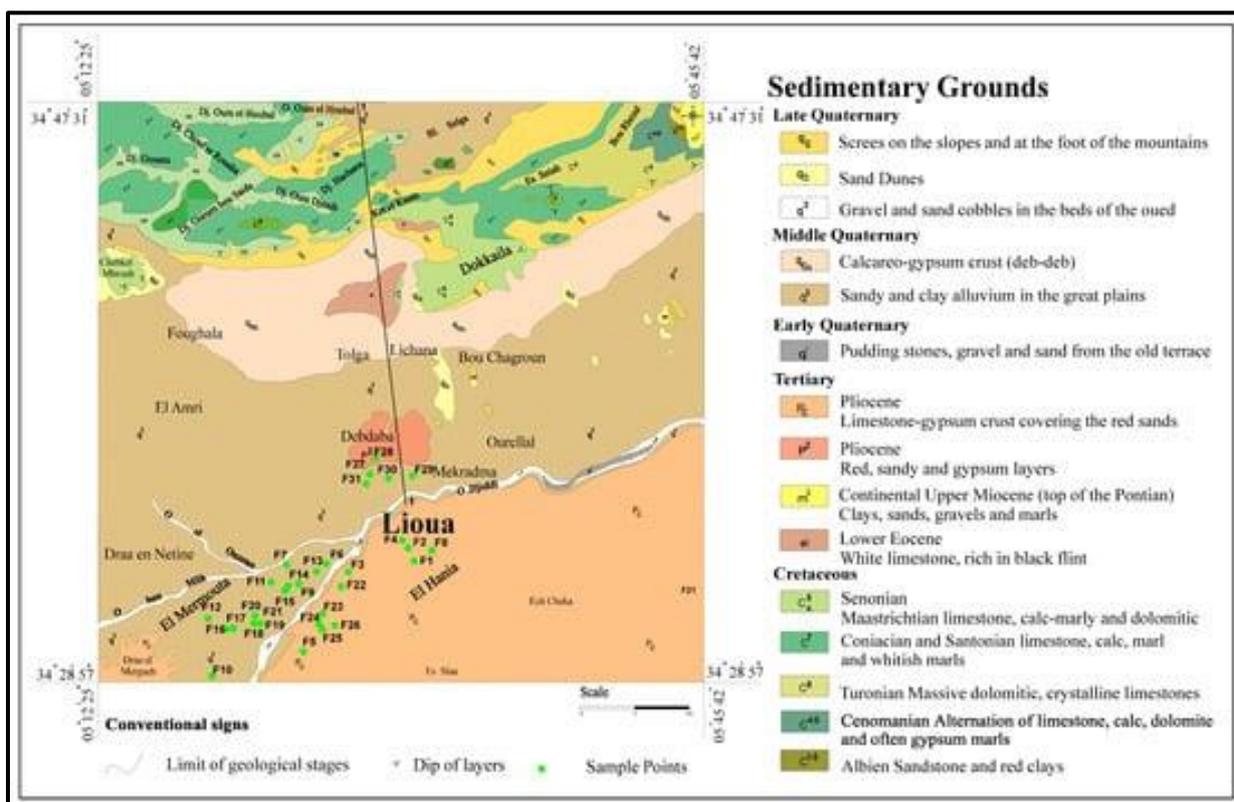


Figure N° 17 : Carte géologique de la région de Lioua (Extrait de la carte Géologique-Map de Biskra 1/200 000).

II.10 Cadre géologique générale

Du point de vue géologique, la région de Biskra ne représente qu'une zone de transition structurale et sédimentaire : Au Nord, c'est une région montagneuse tandis qu'au Sud, c'est un paysage effondré qui fait partie du Sahara Septentrional. Le passage entre ces deux domaines distincts se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de flexure, de plis failles d'orientation Ouest Est appelé « Flexure Saharienne ».

La Flexure saharienne s'est développée lors de la phase paroxysmale pliocène et post pliocène de la surrection des Aurès. Cette phase orogénique responsable de toutes déformations majeures de l'ensemble du continental néogène (Mio-Pliocène).

Au nord de l'accident sud atlasique, ces terrains constituent les monts du Zab et le massif des Aurès avec, dans certaines zones orthographiquement basses, les dépôts de recouvrement récents et discordants du Mio-Plio-Quaternaire. Au sud de cette flexure, les dépôts du Néogène et Quaternaire recouvrent en discordance et sous une épaisseur importante les formations sédimentaires plus anciennes.

Sur le plan géo-structural, La région de Biskra peut être divisée en deux zones essentielles qui se succèdent du Nord au Sud qui sont :

- La zone de la plaine saharienne :

La partie supérieure Nord est occupée par les montagnes représentant les derniers anticlinaux de l'Atlas saharien.

Une description détaillée de ces formations est donnée dans la notice explicative de la carte géologique de la région de Biskra à l'échelle 1/200.000.

Dans cette zone montagneuse, on peut distinguer d'ouest en Est quelques régions naturelles :

Le Djebel Kahila, dont le sommet atteint 796 m d'altitude, formé en partie par les calcaires compacts dolomitiques et récifaux du sénonien supérieur ; La trouée de Chaiba empruntée par la route de Boussaâda-Biskra et constituant l'une des grandes failles séparant l'Atlas saharien et le Sahara, passe au Nord du Bordj-Chaiba. A trois kilomètres vers l'Est, elle met en contact les couches du sénonien supérieur avec les grès rouges du barrémien.

- Le massif du Djebel-ksoum, point culminant à 1 087 m, est un anticlinal dont le noyau est constitué par les calcaires turoniens, est mis à jour par la grande faille de Chaiba. Vers l'Est, le massif se termine par le col Teniet-Ennaam, mettant en communication la partie occidentale de la plaine d'El Outaya avec la plaine saharienne. Au-delà de Teniet-Ennaam, le massif de Djebel-Gouara, assez surbaissé, puisque son sommet ne dépasse pas 755 m, est entièrement constitué par les calcaires et marno-calcaires du sénonien supérieur.

- La dépression de la plaine Selga sépare le Djebel-Gouara de l'anticlinal du Djebel Bou-Rhezal éventré par le col de l'Oued khremissen.

A l'Est, l'anticlinal du Djebel Bou Rhezal domine la ville de Biskra. Il a subi une érosion intense aboutissant à une inversion totale du relief. Les parois rocheuses sont constituées par les calcaires massifs turoniens surmontant les calcaires et marno-calcaires cénomaniens plus tendres. Le noyau de cet anticlinal est érodé jusqu'aux grés rouges.

La plaine saharienne peut être divisée en deux parties principales séparées par la vallée de l'Oued Djedi. Dans la première partie, au Nord de l'Oued Djedi, on distingue les zones suivantes :

- A l'Ouest, la terminaison orientale du Djebel Hamara dont le sommet se trouve sur la feuille Ain-Rich, bordant à l'Ouest la feuille de Biskra.

C'est une terminaison périclinale dirigée vers le Nord-est qui se relie avec le Kef-Seba, prolongement oriental du massif du Djebel-ksoum.

Au Nord-Ouest de cet axe, se trouve une plaine surélevée dont le sol est, en majeure partie, constitué par des calcaires blancs de l'éocène inférieur.

Au Sud-est et à l'Est, s'étend la plaine de Doucen dans laquelle l'alluvionnement joue un rôle assez subordonné ; le substratum formé par l'éocène moyen et par le pliocène y affleure en de multiples endroits.

- Au centre, une plaine alluviale où sont situées les principales plantations de palmier dattiers des Ziban et les plus importantes Oasis de la région : Tolga, Bou-Chagroun, Lichana.

- A l'Est, enfin, le cône de déjection alluvionnaire sablo-limoneux de l'Oued Biskra, qui s'étend jusqu'à la grande dépression du Chott Melrhir et du Chott Merouane.

Dans la seconde partie au Sud de l'Oued Djedi, sur la rive droite, existent deux régions naturelles.

- Vers l'Ouest, au Sud des Ouled-Djellal, la terminaison occidentale faiblement découpée du grand plateau pliocène, montrant vers l'Oued Djedi le substratum argileux et gypseux de l'éocène moyen.

- Au centre et à l'Est, couvrant le quart Sud-Est de la feuille, une plaine uniforme et monotone formée par une carapace calcaro-gypseuse d'âge pliocène, faiblement recouverte par les sables et les regs caillouteux

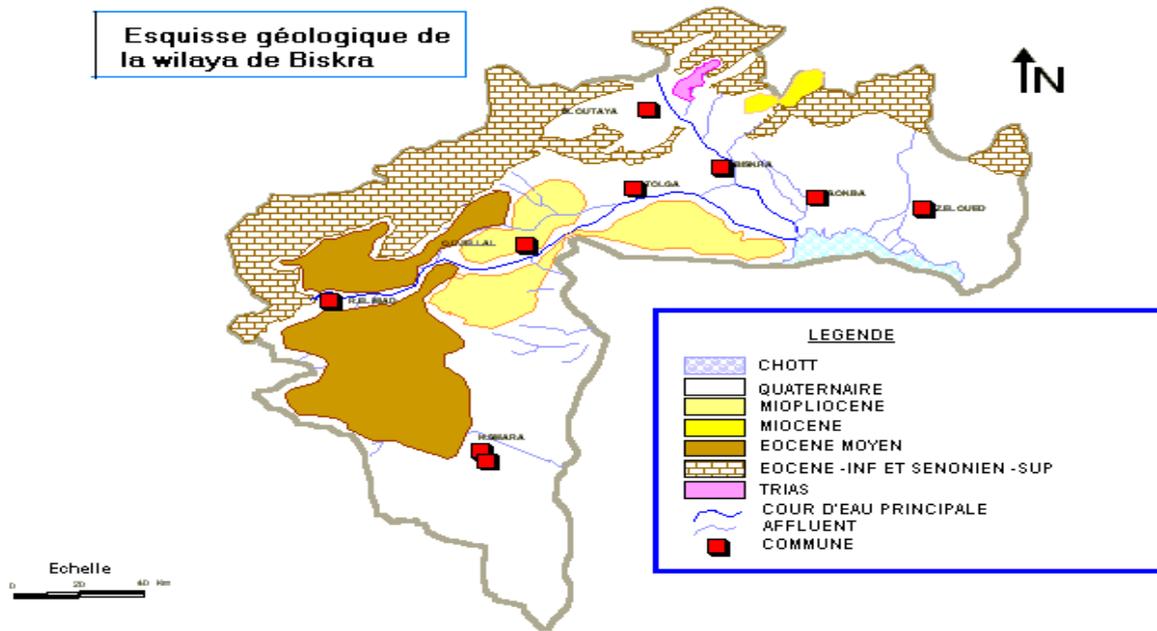


Figure N° 18 : Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).

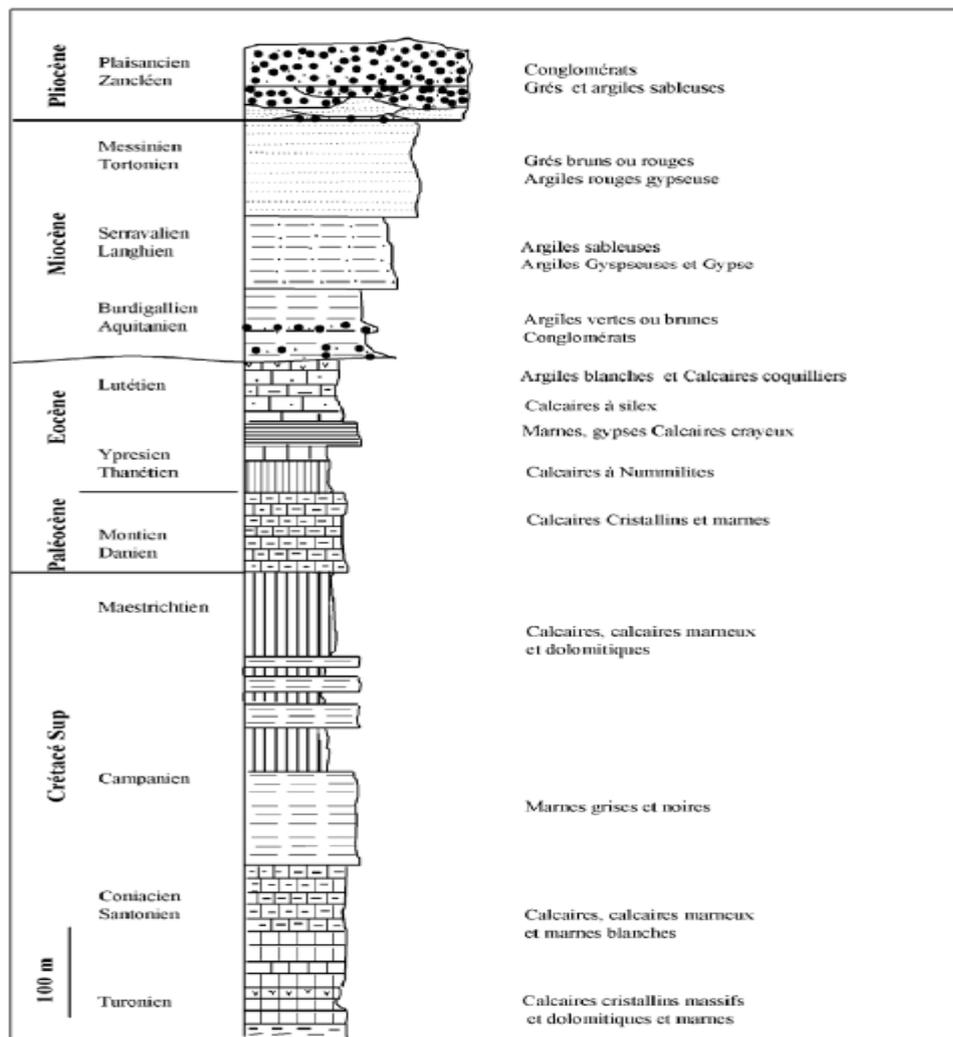


Figure N° 19 : Log litho-stratigraphique synthétique de la région de Biskra (Chebbah, 2007)

II.11. Identification des formations hydrogéologiques.

La connaissance de l'hydrogéologie de la région hydrodynamique est très intéressante car elle permet d'envisager les échanges souterrains qui peuvent se produire dans les aquifères. En se basant sur la description géologique des terrains ainsi que sur les caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation.

II.11. 1 identification des différentes nappes

Les limites de la carte hydrogéologique des Ziban (carte établie par INRH, 1981) ne correspondent pas, dans leur ensemble, aux limites du Bassin hydrogéologique. Celui-ci englobe, la vallée de l'Oued Djeddi, la région de Biskra et la cuvette d'El Outaya. Les unités aquifères, qui seront étudiées par la suite, ont une grande extension et débordent très largement le cadre de cette carte. La lithologie et les considérations hydrodynamiques permettent d'individualiser quatre (04) unités aquifères principales et sont respectivement :

Nappe phréatique du Quaternaire.

Nappe des calcaires de l'Eocène inférieur et du Sénonien (CT) et nappe des grès du continental Intercalaire (CI).

1- Les nappes phréatiques

- **Répartition spatiale** : les nappes phréatiques sont traditionnellement exploitées dans les Zibans, peut-être même sont-elles à l'origine de certains palmiers qui étaient alimentés, soit directement grâce à des trous (sources) soit indirectement par des puits traditionnels.

Outre les eaux écoulées par les oueds atlasiques celles issues du drainage des palmeraies et celles qui, profitant de la faible étanchéité des toits ou des forages mal réalisés percolent depuis l'Eocène à travers les formations du continental terminal La nappe phréatique est localisée généralement dans les alluvions des Oueds, les plus importantes étant celles d'Oued Biskra, en amont de la ville et celle d'Oued Djedi.

- **La nappe des alluvions d'Oued Biskra** : cette nappe qui se localise généralement dans les accumulations alluvionnaires, elle est alimentée essentiellement par les eaux d'infiltration des Oueds (inféro-flux). Les plus importantes dans la région de Biskra, sont celles de l'Oued Biskra et de l'Oued Djedi.

Cette nappe qui présente l'unique ressources des régions de Ouled Djellal, Sidi Khaled et la ville de Biskra, est trop sollicitée vue sa faible profondeur et sa bonne qualité chimique, pour être raison qu'elle est utilisée pour l'alimentation en eau potable.

La profondeur de cette nappe est comprise entre 20 et 150 m avec un débit oscillant entre 05

et 20 l/s et une qualité chimique qui se situe de bonne à mauvaise selon les zones.

Le quaternaire se subdivise dans la région en trois niveaux différents ; les alluvions anciennes, qui sont constituées de galets et des formations conglomératiques plaquées aux pieds des versants calcaires miocènes, limitent toutes la dépression des Zibans.

Les alluvions des moyennes terrasses d'Oued Biskra dont l'extension est importante, sont formées d'un assemblage de cailloutis, graviers et sables occupent une altitude inférieure à celle des anciennes alluvions.

Enfin, les alluvions récentes qui forment les basses terrasses d'Oued Biskra ; elles présentent un intérêt agricole et hydrogéologique régional important ; elles sont constituées de gros galets, graviers et sables résultant de l'érosion par ruissellement sur les massifs calcaires et dunaires limitrophes. Ces matériaux, favorables à la formation des nappes d'eau phréatique, permettent d'importants prélèvements pour l'alimentation en eau potable de la ville de Biskra. Les limites géographiques de la nappe se rapportent au remblaiement actuel des terrasses des oueds, en effet ces limites sont beaucoup plus basses que cette bordure. L'extension verticale de la nappe peut atteindre parfois 40m, où l'on rencontre des grandes lentilles d'argiles quaternaires marquant le substratum local de la nappe. Mais cette hypothèse du substratum et encore une discussion du fait qu'on passe directement parfois sur des niveaux de calcaires compacts. En général le mur est atteint à 40 mètres quelque soit sa nature, calcaire ou argile. La surface piézométrique se trouve à 3 mètres en moyenne sous le niveau du sol par contre; elle peut baisser plus profondément en période sèche, vu le grand pompage par forage et l'intensité de l'évaporation superficielle.

L'alimentation de la nappe des alluvions de l'oued Biskra semble provenir de deux origines différentes :

➤ **Les précipitations :**

Cette alimentation superficielle est importante dans cette région où l'on enregistre entre 150 et 200 mm /an. A cela s'ajoutent les apports considérables amenés en amont par l'oued qui traverse la couverture limoneuse peu épaisse et s'infiltré pour atteindre la nappe phréatique.

➤ **Alimentation souterraine :**

Le long des couches calcaires sous-jacentes, lors du gonflement de la nappe des calcaires, il y a des échanges souterrains (relation hydraulique souterraine réciproque).

2-Les nappes profondes

D'un point de vue hydrogéologique, on regroupe sous le terme de réservoir toutes les formations continentales les plus récentes, déposées au Sahara, qui sont d'âge Tertiaire et Quaternaire. Au Bas - Sahara, on regroupe la nappe des calcaires de l'Eocène et du Sénonien

et même celle du continental intercalaire sous le nom de 'complexe terminal'.

- **Nappe des sables** : constituée par une alternance de niveaux d'Argile, Sable, et Cailloutis d'âge Mio-pliocène, elle couvre une grande superficie de la wilaya. Cette nappe est fortement exploitée dans la partie Est de la région de Biskra et surtout dans la zone de M'Zirâa.

Les formations aquifères reposent en discordance sur les formations calcaire-marneuses de l'Eocène moyen et inférieur. Cet ensemble aquifère est recouvert de dépôts alluvionnaires peu épais, de croûtes gypseuses et de sables. En ce qui concerne le système hydraulique, la nappe des sables est très hétérogène, elle est constituée le plus souvent de couches aquifères de divers perméabilités et épaisseurs.

Du point de vue hydrodynamique cette nappe présente un système très hétérogène car elle est constituée par des couches de diverses perméabilités. La profondeur de cette nappe varie de 100 à 300 m, avec un débit moyen de 15 l/s

Les forages qui ont été réalisés dans la région ne captent généralement qu'une partie seulement de ces couches, les plus perméables et souvent, les moins profondes. Il est donc, évident qu'une différence existe entre la transmissivité horizontale, obtenue à partir d'un essai de pompage de longue durée et la transmissivité totale de l'ensemble aquifère.

La surface piézométrique de la nappe des sables est presque partout en charge à l'intérieur de la limite d'extension des argiles, elle est donc jaillissante au centre de la région et libre sur les bordures.

A l'Est de Biskra (Zab Est) cette nappe se subdivise en deux aquifères séparés par une épaisse couche d'argile et d'argile sableuse, l'un profond désigné sous le nom du Pontien et l'autre moyennement profond qui est la nappe du Mio-pliocène connue dans cette région, le sens d'écoulement principale de la nappe des sables se dirige vers la zone de Chott Melghrir. (Boutouga Fateh,2012)

- **La nappe profonde du continental intercalaire** : la nappe du continental intercalaire est souvent appelée « albiennaise » formée dans des terrains, en grande partie gréseux, dont les limites stratigraphiques varient selon les régions.

C'est un réservoir très important constitué essentiellement de Grés et de marne d'âge Albien et Barrémien. Son exploitation est très coûteuse en raison de sa profondeur qui dépasse 2000m, la température de l'eau peut dépasser les 60° C. Cette nappe est exploitée dans la région de Biskra par 19 forages.

Cette nappe est représentée également dans la région de Biskra par des sources hydrothermales qui sont: la source de Hammam Essalhine dans la commune de Biskra.

L'extension géographique de la formation aquifère dépasse beaucoup, en effet, la dépression du Bas Sahara. Elle est limitée à l'Ouest par la vallée de l'oued Saoura -Messaoud, au sud par une ligne Est- Ouest, Reggane - Fort Flaiters, au Nord par l'Atlas Saharien, à l'Est elle s'étend depuis le Sud tunisien jusqu'au Sud - Ouest Lybien. Déposé sur le vieux socle africain, le continental intercalaire a échappé à toute tectonique violente, mais des mouvements de grande amplitude ont pourtant déformé l'ensemble des couches post-hercyniennes. Il en résulte, en premier lieu un mouvement synclinal de faible pendage d'axe Sud-ouest et Nord-est. Dans l'atlas Saharien les niveaux continentaux du Crétacé inférieur occupent généralement les synclinaux à fond plat, et correspondent aux dépressions topographiques favorisant l'infiltration à travers les couches.

L'alimentation actuelle se poursuit sur les marges d'affleurements :

- réseau hydrographique de l'atlas saharien
- pluies retenues par le grand Erg occidental.

Le sens d'écoulement est généralement Nord-Sud, mais la cuvette de Taoudeni au Sud de Reggane et la nappe côtière tunisienne fonctionnent comme des exutoires naturels et déterminent des écoulements vers l'Est et vers l'Ouest. .(Boutouga Fateh,2012)

- **La nappe des calcaires éocènes inférieurs** : la nappe concernée est localisée dans les calcaires marins de l'éocène inférieur, qui sont relayés latéralement par les calcaires du Crétacé supérieur.

Au Nord du Bas – Sahara, les calcaires aquifères du Sénonien et de l'Eocène se relèvent dans les contreforts de l'atlas, où ils affleurent largement.

Cette nappe est constituée essentiellement de calcaires fissurés d'âge Eocène inférieur, elle est la plus sollicitée dans les palmeraies des Zibans, cette dernière est appelée « Nappe de Tolga ». La profondeur de cette nappe varie de 100 m dans la zone de Tolga à 500 m dans la zone de Lioua, le débit de cette nappe varie de 10 l/s par pompage jusqu'à 30 l/s jaillissant dans les zones d'Ourlal et Lioua. Les différents sondages réalisés dans cette région montre qu'il existe un contact hydraulique entre la nappe de l'Eocène inférieur et celle du Sénonien Supérieur sous-jacente, est parfois elle se sépare par une mince couche de marne et de marno-calcaire dans la zone d'Oumache et M'lili où la profondeur atteint 100 m.

Au Nord et au Nord Est de la Biskra cette nappe est représentée par un aquifère très important qui est le Maestrichtien et le Campanien d'une profondeur comprise entre 200 et 900m et d'une bonne qualité chimique d'eau. On note par ailleurs l'existence de la nappe du Turonien qui n'est pas exploitée.

Les calcaires turoniens, tantôt affleurant, tantôt situés près du sol à la faveur des anticlinaux

II.11. 3 La piézométrie

Les mesures piézométriques réalisées par l'ANRH de Biskra, nous ont permis de dresser la carte piézométrique (Figure.19 et 20) pour bien visualiser l'écoulement des eaux souterraines de la plaine de la région de Lioua. L'écoulement dans son ensemble se fait du Nord vers le Sud de la plaine, avec quelques particularités.

Des courbes piézométriques très serrés dans la partie Nord-Ouest, ceci traduit un gradient hydraulique fort, dû à la topographie. Les courbes iso-pièzes sont espacées au centre de la plaine (Nord-est et Sud), avec un gradient hydraulique très faible indiquant un écoulement lent dû à la topographie plane de la région (pente faible ne dépasse pas les 3%). Les lignes de courant pour l'ensemble de la plaine sont dirigées vers la zone de dépression située au Sud-est de la région d'étude, il s'agit en fait de zone de chott Melghrir à altimétrie négative (atteignant par endroits -40 m) ; cette zone constitue le point de convergence et d'exécutoire naturel de la majorité des grands oueds qui drainent la zone d'étude.

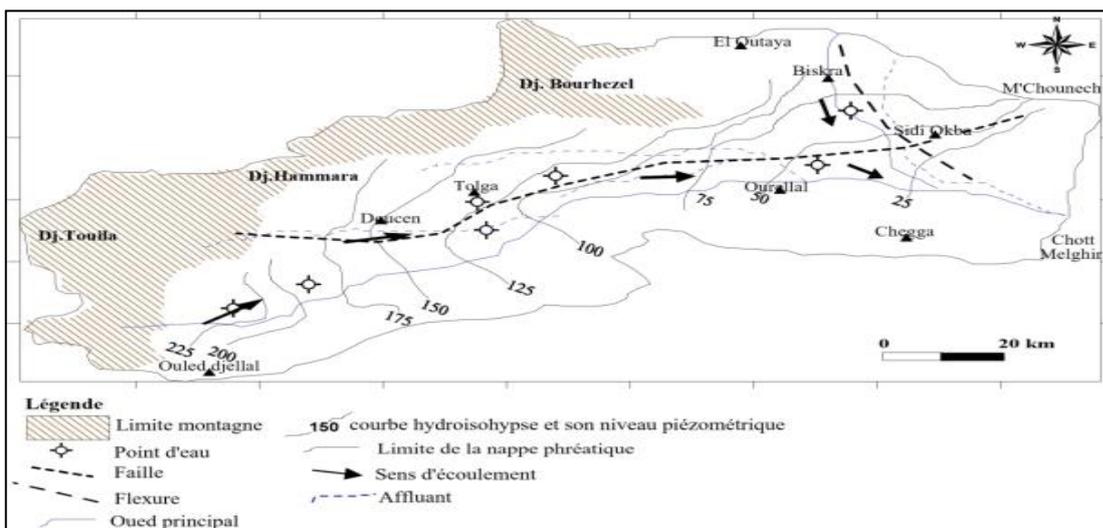


Figure N° 21 : Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).

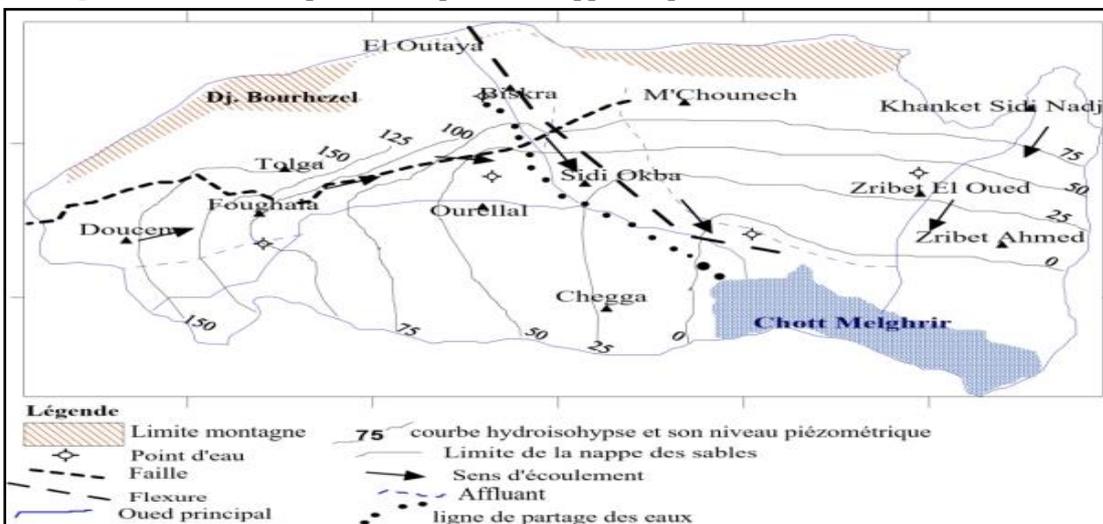


Figure N° 22 : Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)

II.12 Les coupes hydrogéologiques

Oued Djedi représente particulièrement la nappe phréatique superficielle et l'épaisseur de cette nappe varie entre 50 et 70 m, avec un débit moyen de 20 l/s. La qualité de l'eau extraite est médiocre à moyenne qui ce n'est qu'au sud de Lioua qu'elle est de bonne qualité.

Le réservoir aquifère est hétérogène et constitué de matériaux détritiques (cailloux, graviers et sable). Le substrat est constitué d'une épaisse formation argileuse et parfois, elle se présente sous forme de lentilles de sable en discordance avec les couches d'argile. La nappe phréatique est alimentée par les eaux de pluie, les infiltrations des Oueds et les eaux d'irrigation. Le plateau des sables du Mio Pliocène est essentiellement constitué d'une alternance de sables, de graviers et d'argiles. Elle est fortement exploitée par un nombre très important de forages destinés essentiellement à l'irrigation des terres agricoles. L'épaisseur de cette nappe varie de 80 à 140 m avec un débit de 5 à 15 L/s. L'aquifère est constitué de plusieurs niveaux producteurs avec une composition hétérogène et matériaux détritiques, graviers et sables enveloppés dans une matrice argileuse. En profondeur, la formation devient à dominante argilo-sableuse et repose sur une formation imperméable composée de marnes gypseuses et d'anhydrite de l'Éocène moyen. La nappe de sables est recouverte d'un dépôt alluvionnaire peu profond ou d'une couche de sables gypseux quaternaires. Par endroits, les affleurements du Mio Pliocène mettent cet aquifère en contact direct avec la surface, assurant ainsi son alimentation à partir des eaux de surface (Athemna.A, 2022).

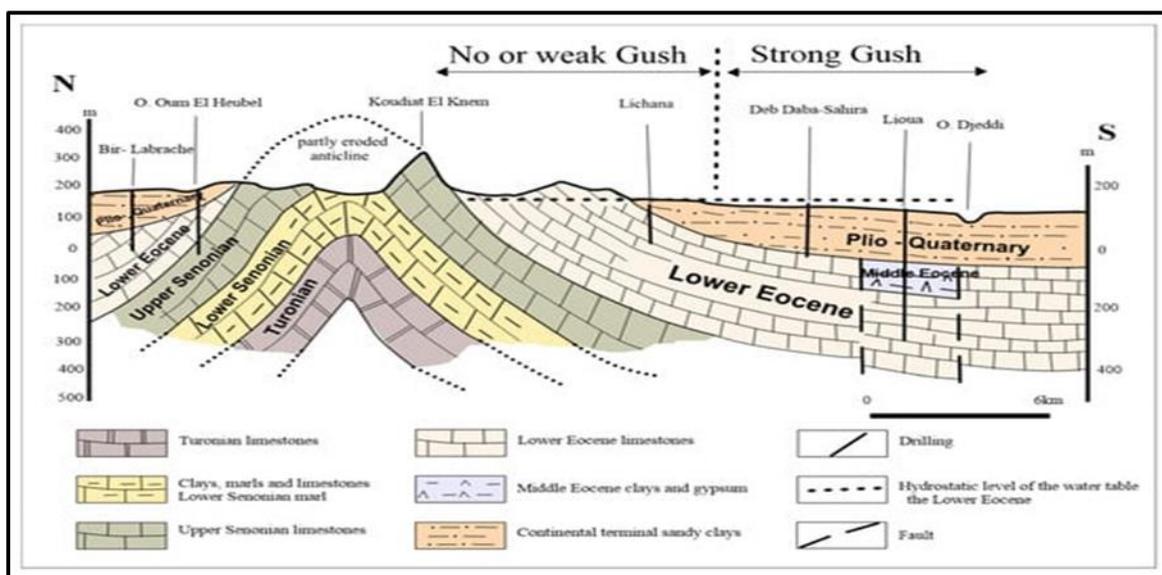


Figure N° 23 : Coupe Hydrogéologique schématique de la région de Lioua (Ahcène, 2021)

II.13 Conclusion

Selon le Climagramme d'Emberger la zone de Lioua appartient d'une région à l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud cette zone caractérisée par un climat hyperaride spécifiée par la faiblesse des précipitations, des températures extrêmes élevées et des vents qui contribuent à augmenter la très forte évaporation.

Les précipitations dans les zones sahariennes sont très faibles et irrégulières, mais sont parfois très violentes. Et les plus orageuses sont celles des saisons estivales (Mediouni, 1997). Les caractéristiques climatiques limitent le développement du couvert végétal et l'agriculture quand la population base à la précipitation comme source unique de l'eau.

L'étude montre que la région de Lioua en générale a une potentialité naturelle et socioéconomique remarquable manifeste par une présence importante des ressources hydriques, la disponibilité en main d'œuvre (densité populaire) où l'agriculture constitue le moyen le plus important de la subsistance et du développement de cette région.

Par contre, elle comporte de véritables problèmes, socioéconomique tel que la main d'œuvre qualifiée, drainage du surplus en eau d'irrigation, exploitation anarchique et excessive des nappes non renouvelables, vieillissement des palmiers dattiers, le branchement à l'énergie électrique (ou même solaire), réalisation des pistes agricoles, et environnemental (la sécheresse, qualité d'eau, sol,.....), considérablement préoccupants, dus aux facteurs, d'ordre humain et physique liés aux différents contextes contraignants.

Partie B : Etude expérimentale

- **Chapitre I : Matériels et méthodes**
- **Chapitre II : Résultats et interprétations**

Chapitre I : Matériels et méthodes

I.1 Introduction

Ce chapitre se concentrera sur l'exploration des méthodes de dosage employées pour évaluer les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Lioua, située dans la wilaya de Biskra.

Nous examinerons en détail les procédures analytiques utilisées, mettant en lumière les techniques employés dans notre étude.

De plus, nous discuterons des logiciels utilisés pour l'analyse des données recueillies, fournissant ainsi un aperçu de notre approche méthodologique. Enfin, nous présenterons les paramètres clés utilisés pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans notre contexte d'étude, en mettant l'accent sur leur importance dans la prise de décision et la gestion durable des ressources hydriques.

I.2 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]

L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) est déterminé en évaluant plusieurs facteurs biologiques, physiques et chimiques. Ces paramètres servent d'indicateurs pour l'utilisation multifacette des ressources en eau dans des contextes de consommation humaine, englobant des aspects tels que les activités récréatives, l'approvisionnement en eau potable, les applications industrielles, l'irrigation et l'usage résidentiel (Akhtar et al. 2021).

Voici les étapes impliquées dans le calcul de l'IQE :

Dans la phase initiale, des poids (w_i) allant d'une plage numérique de 1 à 5 ont été attribués à chacune des dix caractéristiques chimiques, reflétant leur importance respective dans l'influence de la qualité globale de l'eau d'irrigation. Par la suite, le poids relatif (W_i) de ces paramètres a été déterminé en utilisant l'équation (2) (Şener et al. 2017) (Abdel-Fattah, Mokhtar et Abdo 2021).

Le tableau 1 comprend également les valeurs pondérées relatives dérivées (W_i) pour chaque paramètre

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Dans ce contexte,

Le poids attribué au i -ème paramètre de qualité de l'eau est désigné par w_i , et le nombre total de paramètres de qualité de l'eau est noté n .

À la troisième étape, une évaluation de la qualité (q_i) a été générée pour chaque paramètre, à l'exception du pH. Cette évaluation a été calculée en divisant la concentration dans chaque échantillon d'eau par les valeurs limites établies selon les normes algériennes (JORA 2014).

Ce calcul a été effectué en utilisant l'équation suivante (3) :

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (3)$$

Dans cette équation,

q_i représente l'évaluation de la qualité ; où C_i désigne la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau, exprimée en mg/L, tandis que S_i représente la norme respective pour l'eau potable de chaque paramètre chimique conformément aux directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011) et aux normes algériennes (JORA 2014). Par la suite, les sous-indices de qualité de l'eau (SI_i) pour chaque paramètre chimique sont calculés en utilisant l'équation suivante (4).

$$SI_i = W_i \times q_i \quad (4).$$

Si désigne le sous-indice attribué au i -ème paramètre.

Enfin, l'indice global de qualité de l'eau (IQE), utilisé pour évaluer la qualité globale de l'eau pour chaque échantillon, a été calculé en utilisant l'équation suivante (5).

$$WQI = \sum_{n=1}^n S I_i \quad (5).$$

Comme illustré dans le tableau 2, les valeurs calculées de l'IQE ont ensuite été classées en cinq classes distinctes pour déterminer le statut de la qualité de l'eau, allant de "eau excellente" à "eau non appropriée pour la consommation".

Dans le calcul de l'IQE, les normes de potabilité recommandées fournies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011) et les normes algériennes (JORA 2014) ont été incorporées de manière exhaustive (Tableau N° 17).

Tableau N° 17 : Poids relatif des paramètres physico-chimiques.

Paramètres chimique	(JORA 2014)	Poids Relatif
pH	≥ 6,5 et ≤ 9	0.445
Calcium (mg/L)	200	0.019
Magnésium (mg/L)	50	0.076
EC (uS/cm)	2800	0.001
Nitrate (mg/L)	50	0.076
Sulfate(mg/L)	250	0.009
Chloride (mg/L)	500	0.008
Bicarbonates (mg/l)	120	0.032
Sodium (mg/L)	200	0.019
Potassium (mg/L)	12	0.315

Tableau N° 18 : Classification de l'IQE, statut, et utilisation possible de l'échantillon d'eau (Balamurugan 2020).

IQE Intervalle	Qualité de l'Eau	Possibilité d'utilisation
0-25	Excellente	Consommation humaine, irrigation
26-50	Bonne	Consommation humaine, irrigation
51-75	Modérée	Irrigation et traitement nécessaire avant d'utilisation comme eau potable
76-100	Mauvaise	une possibilité utilisation à l'irrigation avec des conditions
>100	Très Mauvaise	Utilisation interdit (Consommation humaine ou irrigation)

I.3 Méthodes de traitement des données

Le traitement des données des eaux superficielles de la région d'étude nous a permis d'apprécier leur qualité chimique.

L'évaluation de la qualité des eaux et de l'évolution des paramètres physico-chimiques nous a obligé à utiliser des méthodes de traitement classiques et d'application de logiciels adéquats.

I.3.1 Traitement des données par Excel

En général, la qualité des eaux est déterminée selon des critères quantitatifs et qualitatifs tels que, par exemple, la présence en quantités suffisantes de certains nutriments, la teneur en oxygène, le pH, la température ou encore, la présence des métaux lourds. De ce fait il devient impératif de déterminer les caractérisations physico-chimiques et les métaux lourds des eaux de la région d'étude avec les normes.

I.3.2 Traitement des données par diagramme

Les résultats des analyses chimiques des sels exprimés sous la forme ionique, peuvent être portés sur des diagrammes qui permettent de comparer les eaux entre elles, et de les classer en familles chimiques, c'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau qui permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau et la qualité des eaux des affluant en vus d'usage agricole. Les représentations les plus utilisées sont :

- Le diagramme en losange ou diagramme de Piper.
- Le diagramme semi-logarithmique Schoëller-Berkaloff.
- Le diagramme de Riverside.
- Le diagramme de Wilcox.
- Le diagramme de Chadha.

Pour pouvoir analyser ces données et en ressortir le plus d'information en peu de temps, il a fallu utiliser des outils et méthodes efficaces et rapides. Le principal outil utilise est le logiciel de diagrammes (Figure N° 22) créé par Roland SIMLER du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. C'est un logiciel d'Hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau. Ces fonctions sont variées et complètes, en voici quelques-unes :

Piper, Schoeller-Berkalov, Korjinski, Stiff, Riverside Wilcox.

Toutes les fonctionnalités n'ont pas été utilisées, mais ce logiciel s'avère être simple d'utilisation. De ce fait les diagrammes de Piper, Schoeller et de Riverside ont été établis grâce à ce logiciel (Figure N° 22).

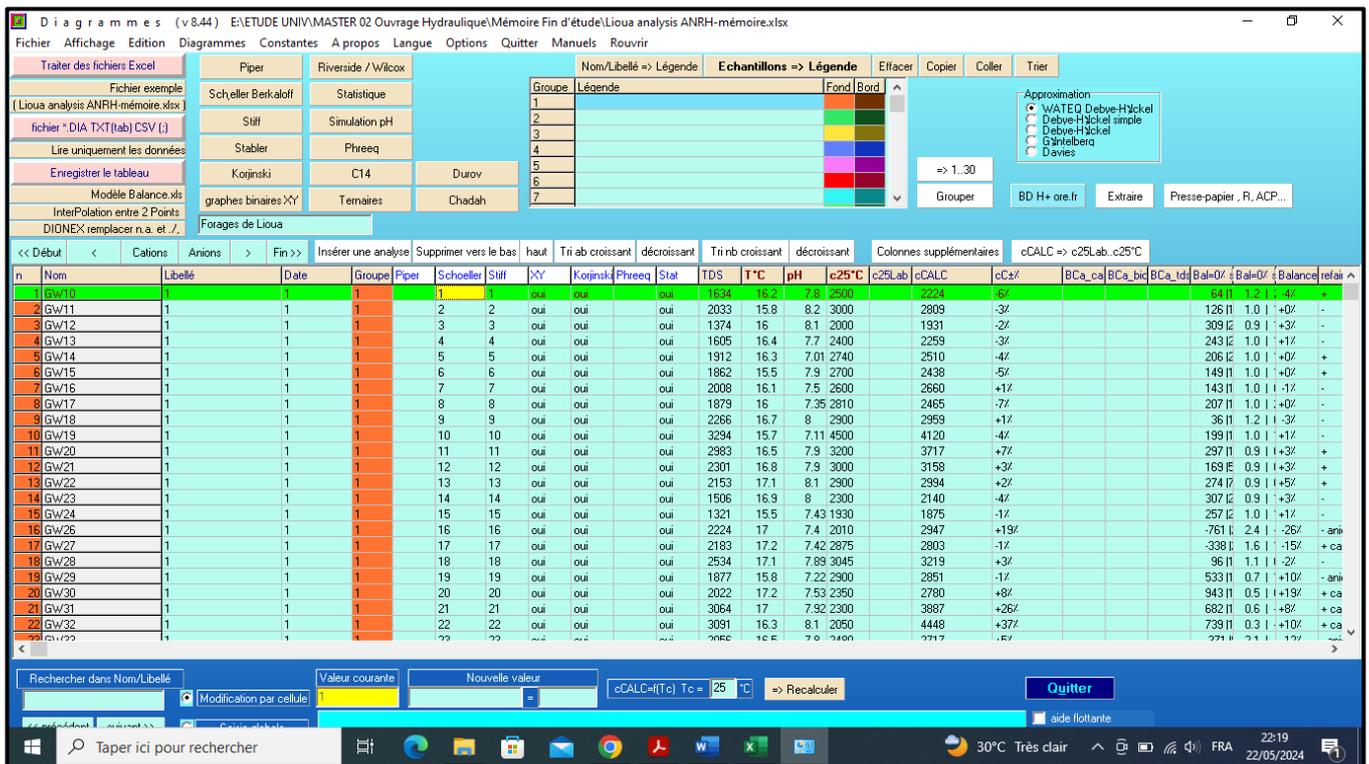


Figure N° 24 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME

➤ Diagramme de Piper

Le diagramme trilinéaire de Piper (Piper, 1944), est utilisé pour classifier l'eau en fonction de ses caractéristiques hydrochimiques, en se basant sur les ions prédominants qui influent sur sa qualité. Ce schéma offre une représentation graphique de l'équilibre chimique entre les principaux cations tels que le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium, et les principaux anions comme le chlorure, le sulfate, le carbonate et le bicarbonate présents dans les échantillons d'eau. Il permet de visualiser la prédominance des ions contribuant ainsi que les réactions chimiques se produisant dans l'eau. Le diagramme se compose de deux triangles inférieurs représentant les cations majeurs et les anions, ainsi que d'un losange situé au centre supérieur, indiquant la distribution combinée des cations et des anions (Zakir et al., 2020).

Ce diagramme révèle les similitudes et les différences entre les échantillons d'eau, car ceux présentant des qualités similaires auront tendance à se regrouper ensemble (Todd, 2001). Ce diagramme est utile pour mettre en évidence les relations chimiques entre les eaux de manière plus précise (Walton, 1970).

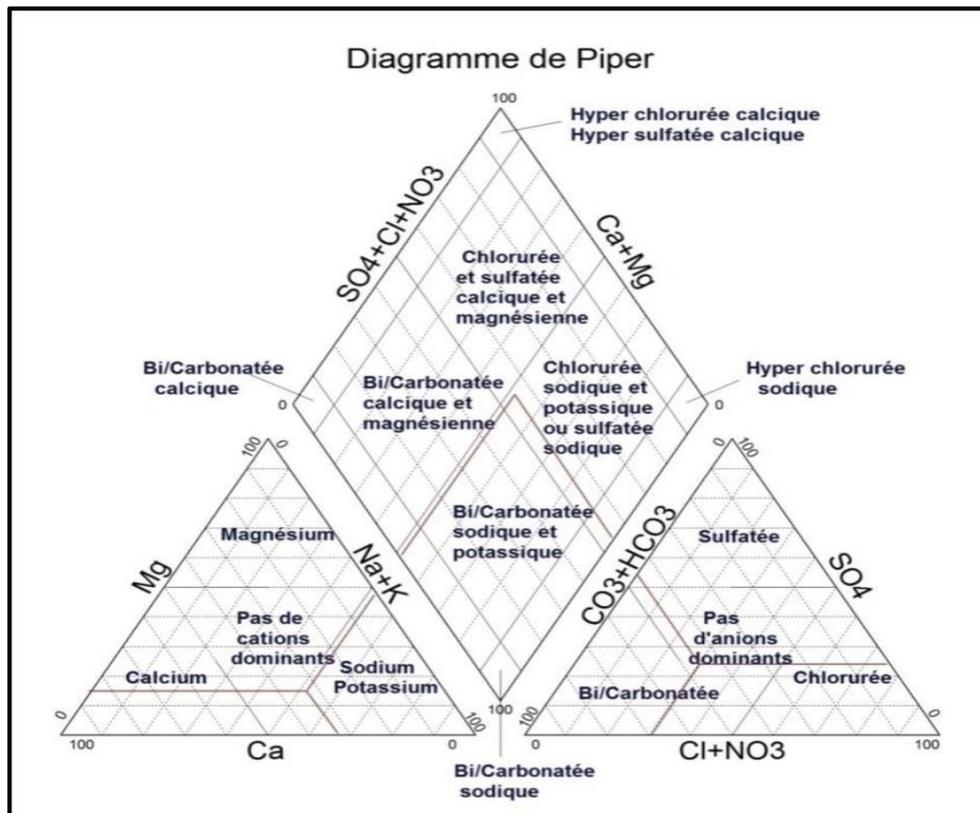


Figure N° 25 : Diagramme de Piper

➤ **Le diagramme semi-logarithmique Schoëller-Berkaloff**

Le diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkaloff (Figure N°24) permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques. L'allure du graphique obtenu permet de visualiser le faciès de l'eau et facilite sa comparaison. Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. Il est ainsi possible de visualiser à la fois le faciès chimique, comme pour le diagramme de Piper, mais aussi la minéralisation de l'eau (sa charge dissoute), ce qui est appréciable (Gouaidia, 2008).

Diagramme de Chadha

Pour mieux comprendre le processus hydrochimique des eaux souterraines, il vaut la peine de se référer à (Chadha, 1999), qui a présenté une illustration très claire. Ce diagramme est une version modifiée du diagramme de Piper. Il a été utilisé avec succès dans diverses recherches pour détecter des processus hydrogéochimiques distincts. La catégorisation de l'eau à l'aide du diagramme de Chadha a donné quatre groupes principaux (Bradai et al., 2022).

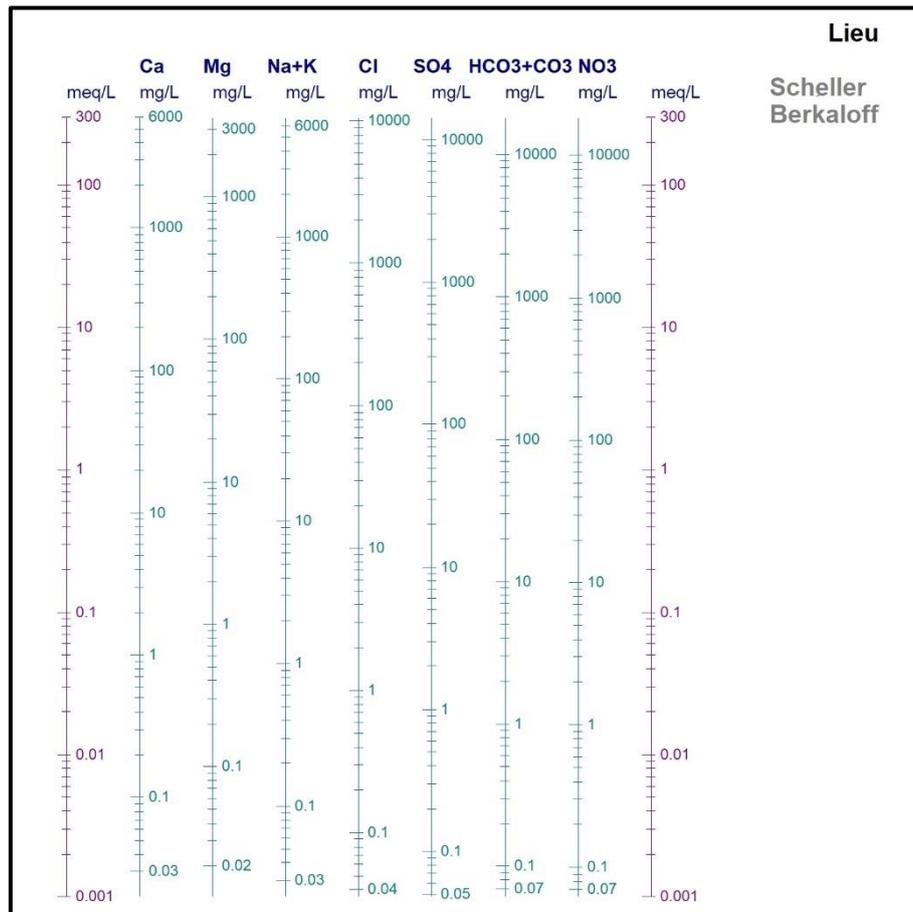


Figure N° 26 : Diagramme de Scheller Berkloff

➤ **Le diagramme de Riverside**

Ce diagramme été proposée par Richards, Il est très utile et fiable pour caractériser une eau d’irrigation. Une eau chargée en sels peut provoquer un risque pour l’irrigation. Ce risque est déterminé l’aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio SAR), Ce paramètre comme étant une détermination du pouvoir d’échange des ions Ca²⁺, Mg²⁺ , par le Na dans les argiles et les colloïdes.

Le taux de sodium absorbé par le sol (S.A.R) est donné par la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \quad (06)$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l.

En reportant sur le diagramme les conductivités électriques en (μ S/cm) à 20° C, en fonction du taux d’absorption du sodium (S.A.R).

La classification de Richards basée sur la conductivité et le S.A.R, permet de définir plusieurs classes d'eau. Présentant chacune un danger de salinisation et d'alcalinisation variable (Tableau N° 18)

Tableau N° 19 : Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R (Méthode de Richards)

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1 ^{er}	Excellente	C1S1	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2 ^{eme}	Bonne	C2S1 C1S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 ^{eme}	Admissible	C3S1 C2S3 C3S2	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée
4 ^{eme}	Médiocre	C4S1 C4S2 C3S3	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol et bien drainées
5 ^{eme}	Mauvaise	C3S4 C4S3 C4S4	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé plantes tolérantes aux sels

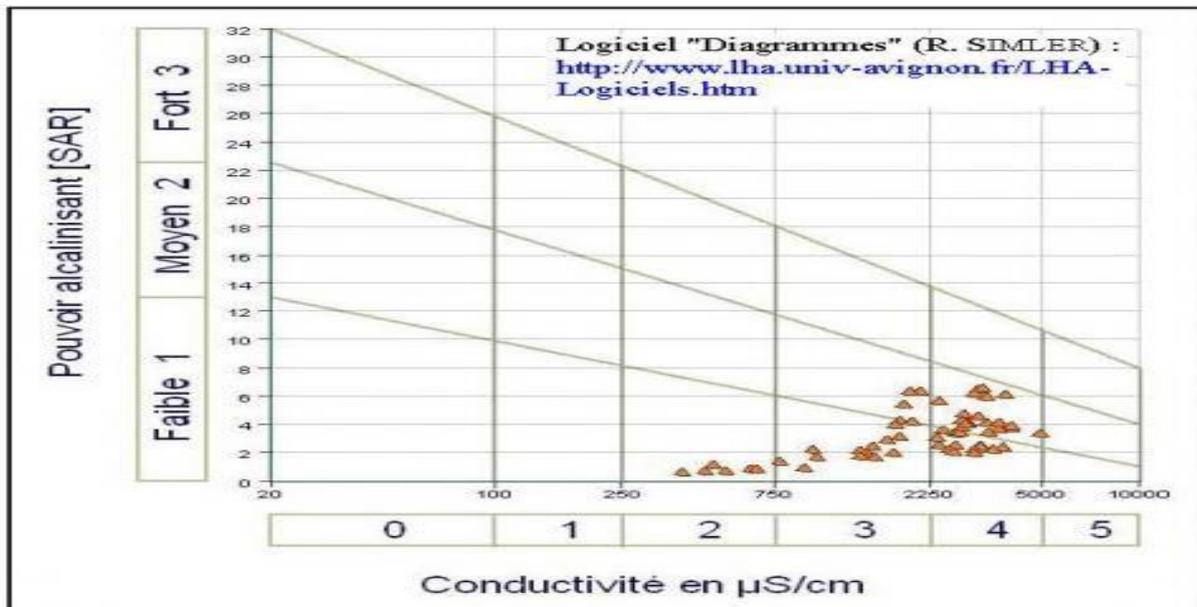


Figure N° 27 : Diagramme de RICHARDS (Riverside)

➤ Le diagramme de Wilcox

Généralement les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation.

$$N\% = (Na^{++} K^+) 100 / (Ca^{2++} Mg^{2++} Na^{++} K^+) \quad (07)$$

Le diagramme de Wilcox représente graphiquement la relation entre le risque de salinité, exprimé en termes de conductivité électrique (EC en µS/cm), et la concentration en sodium dans l'eau, mesurée sous forme de pourcentage de sodium (%Na) (Salifu et al., 2017). Ce

diagramme catégorise la pertinence de l'eau pour l'irrigation en plusieurs niveaux, allant de l'excellent au bon (I), du bon au permmissible (II), du permmissible au douteux (III), du douteux à l'inadapté (IV), et enfin inadapté (V) (Adimalla et al., 2020).

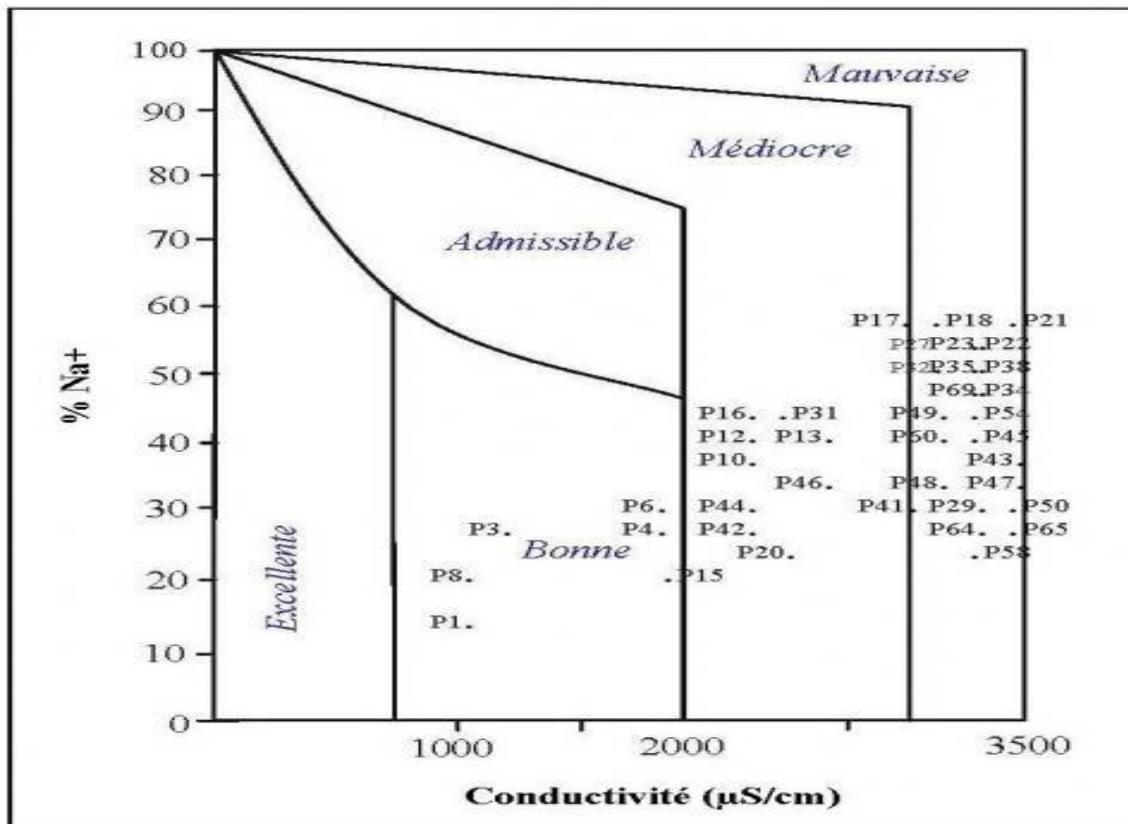


Figure N° 28 : Diagramme de Wilcox

➤ **Le diagramme de Chadha**

Les anions et cations exprimés en milliéquivalent ont été représentés graphiquement sur le diagramme proposé par Chadha (1999). Huit types d'eau pouvant être identifiés à partir du diagramme dépendent de la relation entre les alcalino-terreux (calcium et magnésium), les métaux alcalins (sodium et potassium), les anions acides faibles (carbonate et bicarbonate) et les acides forts (chlorure et sulfate). La majorité des échantillons (80 %) se trouvent dans la sixième zone, représentant par Ca-Mg-Cl-SO₄ type, où $(Ca + Mg) > (Na + K)$ et $(Cl + SO_4) > (CO_3 + HCO_3)$, alors que le reste exprimant les 2% sont situés sur la première zone.

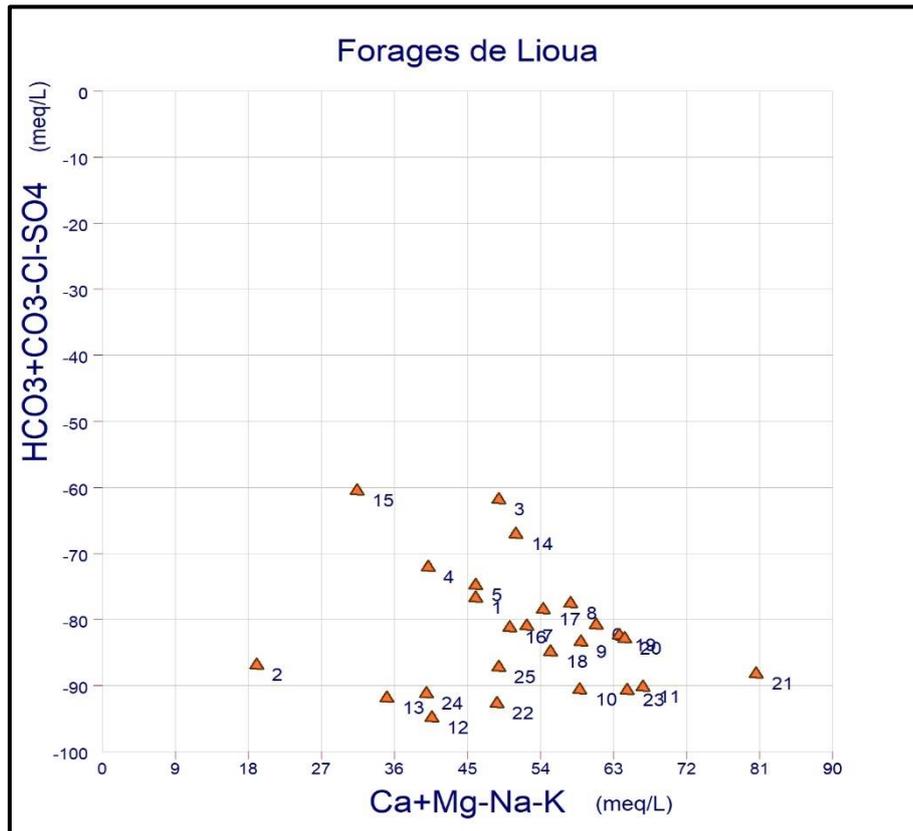


Figure N° 29 : Diagramme de Chadha

I.4 Les aptitudes des eaux d'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation est déterminée par sa composition minérale, ainsi que par ses effets sur les plantes et le sol (Adimalla et al., 2020). En général, la qualité de l'eau d'irrigation est évaluée à travers le rapport d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (%Na), L'indice de perméabilité (IP), le rapport de Kelly (RK) et le rapport de danger de magnésium (MHR).

Tous ces paramètres sont essentiels pour évaluer la qualité des eaux à des fins d'irrigation.

I.4.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Le Sodium Adsorption Ratio (SAR) est un indicateur crucial pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation, car il mesure la capacité des sols à absorber le sodium. Une concentration élevée de sel dans l'eau peut entraîner la salinisation des sols, tandis qu'une concentration élevée en sodium peut favoriser l'alcalinité des sols. Le SAR permet d'évaluer le risque d'alcalinité de l'eau d'irrigation : plus la proportion de sodium est élevée, plus le risque d'alcalinité est important (Adhikary et al., 2012). Le danger lié au sodium dans l'eau d'irrigation est mesuré par la concentration relative des principaux cations, tels que Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} (Sheikhy Narany et al., 2015). Le SAR est calculé à l'aide de l'équation suivante (Hem, 1985) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} \quad (08)$$

Où toutes les concentrations ioniques sont représentées en meq/l.

Le SAR est classé en (Gugulothu et al., 2022) and (Richards L.A., 1954) :

- ✚ Faible, S1 (<10) : Peut être utilisé dans la plupart des sols avec peu de risques d'accumulation de sodium échangeable.
- ✚ Moyen, S2 (10–18) : Peut poser problème dans les sols à texture fine sans gypse, surtout en l'absence de lessivage et avec une forte capacité d'échange de cations.
- ✚ Élevé, S3 (18–28) : Les sols irrigués peuvent atteindre des niveaux de sodium échangeable proches de la toxicité, nécessitant un bon drainage, un lessivage intense et l'apport de matière organique (moins critique dans les sols riches en gypse).
- ✚ Très élevé, S4 (>28) : Ces niveaux rendent les sols inappropriés pour l'irrigation, sauf en cas de faible ou moyenne salinité ou lors de l'utilisation du gypse comme amendement du sol.

Le diagramme de salinité des États-Unis (USSS) illustre la relation entre le risque de salinité, généralement mesuré par la conductivité électrique (EC), et la teneur en sodium dans l'eau, souvent exprimée par le ratio d'absorption de sodium (SAR) en milliéquivalents par litre (meq/L) (Batarseh et al., 2021).

I.4.2 La teneur en sodium (Na%)

Le pourcentage de sodium est un autre indicateur crucial de la qualité de l'eau pour l'irrigation. Un excès de sodium réagit avec le sol, réduisant sa perméabilité et entravant la croissance des plantes (L. Wilcox, 1955). Avec une concentration élevée de Na^+ dans l'eau d'irrigation, ces ions ont tendance à remplacer les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les particules d'argile par un processus d'échange ionique. Ce phénomène diminue la capacité du sol à permettre le mouvement de l'eau, limitant ainsi la circulation de l'air et de l'eau, surtout pendant les périodes humides, et conduisant à un compactage du sol en conditions sèches (Saleh et al., 1999).

Le Na% dans l'échantillon d'eau a été calculé selon l'équation suivante :

$$Na\% = (Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+) * 100 \quad (09)$$

Où toutes les concentrations d'ions sont exprimées en meq/l. La classification de l'eau est basée sur le %Na comme suit (Khoda panah et al., 2009) :

- ✚ Excellent (<20 %) ;
- ✚ Bon (20-40 %),
- ✚ Admissible (40-60 %) ;
- ✚ Douteux (60-80 %) ;
- ✚ Inadapté (>80 %).

I.4.3 L'indice de perméabilité (PI)

L'indice de perméabilité (PI) est un indicateur permettant d'étudier la pertinence de l'eau à des fins d'irrigation. La capacité de déplacement de l'eau dans le sol (perméabilité) est influencée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation (avec une concentration élevée en sel), car elle est affectée par les ions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- du sol. La formule du PI a été développée par (Doneen, 1964) pour évaluer la capacité de déplacement de l'eau dans le sol, ainsi que la pertinence de tout type de source d'eau pour l'irrigation. Elle est formulée comme suit (toutes les concentrations ioniques sont exprimées en meq/l) :

$$\text{PI} = (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \times 100 \quad (10)$$

Selon (Doneen, 1964), le PI peut être catégorisé en trois classes :

- ✚ Classe I (> 75 %, convenable) ;
- ✚ Classe II (25-75 %, bonne) ;
- ✚ Classe III (< 25 %, inadaptée).

L'eau classée en classe I et classe II est recommandée pour l'irrigation.

I.4.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)

En général, le calcium et le magnésium maintiennent un équilibre dans la plupart des eaux. Cependant, une concentration accrue de magnésium dans l'eau peut avoir un impact négatif sur le rendement des cultures (Nagaraju et al., 2014). Le rapport de risque du magnésium (MHR) est l'un des paramètres les plus importants pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation (Awad et al., 2022). Un excès de magnésium dans le sol a un effet désastreux sur sa qualité.

- Si la valeur de risque du magnésium augmente jusqu'à 50 %, cela affecte négativement la qualité du sol, et le sol devient plus alcalin.

Cette alcalinité affecte directement les rendements des cultures (Kawagoshi et al., 2016).

Le rapport de magnésium a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{MHR} = \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}) \times 100 \quad (11)$$

II.5 analyse statistique multivariée**II.5.1 Analyse en composantes principales (ACP)**

C'est une méthode basée sur des statistiques descriptives multidimensionnelles permettant de traiter simultanément un nombre quelconque de variables quantitatives. L'objectif est de visualiser et résumer l'information contenue dans les différentes données afin d'avoir une représentation permettant plus facilement l'interprétation

➤ Principe :

Construire un système de représentation de dimension qui préserve les distances entre les individus. On peut la voir comme une compression avec perte de l'information.

La méthode permet donc de répondre aux trois questions que l'on se pose au vu d'un tableau de résultats d'analyses chimiques :

- l'observation des proximités relatives entre échantillons, on peut voir s'il existe des groupements (c'est-à-dire des familles différentes du point de vue chimique) et quelles sont les évolutions d'une famille à l'autre.
- l'observation des proximités relatives entre éléments, on peut voir s'il existe des relations (ou corrélations) entre différents éléments.
- l'observation des proximités entre éléments et échantillons, on peut voir quels éléments caractérisent quels échantillons ou quelles familles d'échantillons.

➤ Méthodologie :

La technique d'analyse en composantes principales peut être présentée de divers points de vue. Pour le statisticien classique, il s'agit de la recherche des axes principaux de l'ellipsoïde d'une distribution normale multidimensionnelle, ces axes étant estimés à partir d'un échantillon. C'est la présentation initiale de Hotelling (1933), puis celle des manuels classiques d'analyse multivariée.

Pour la factorisation classique, il s'agit d'un cas particulier de la méthode d'analyse factorielle des psychométriciens (cas de variances spécifiques nulles ou égales).

Enfin, du point de vue plus récent des analystes de données, il s'agit d'une technique de représentation des données, ayant un caractère optimal selon certains critères algébriques et géométriques, et que l'on utilise en général sans référence à des hypothèses de nature statistique ni à un modèle particulier.

Ce point de vue, fort répandu actuellement est peut-être le plus ancien. C'est celui qui avait été adopté par Pearson (1901). Bien entendu, il ne s'agissait pas de l'analyse en composantes

principales telle que nous la présentons, mais les idées essentielles de la méthode étaient déjà présentées par cet auteur.

L'analyse en composantes principales présente de nombreuses variantes selon les transformations apportées au tableau de données : le nuage des points- individus peut être centré ou non, réduit ou non. Parmi ces variantes, l'analyse en composantes principales normée (nuage centré-réduit) est certainement la plus utilisée et c'est celle-ci que nous choisissons pour présenter les principes de l'analyse.

L'analyse en composantes principales, souvent notée ACP, fait partie des techniques descriptives multidimensionnelles.

I.6 Conclusion

Pour déterminer si les eaux souterraines conviennent, il est habituel de vérifier les résultats d'analyses afin de voir les divers paramètres tels que la conductivité électrique, les concentrations en ions spécifiques tels que le sodium, le calcium et le magnésium, le pH, ainsi que la présence éventuelle de contaminants.

Au cours de ce chapitre, nous avons détaillé les méthodes utilisées pour définir les techniques de traitement et mises en œuvre aux données examinées, ainsi que les méthodes analytiques utilisées tout au long de notre étude. De plus, nous avons examiné les outils informatiques, notamment les logiciels d'hydrochimie et de statistiques, qui ont été utilisés pour l'analyse des données. Enfin, nous avons discuté pour tous les paramètres et les indices d'évaluation de la qualité des eaux souterraines, permettant de décrire les relations entre les paramètres de qualité de l'eau souterraine.

Chapitre II : Résultats et interprétation

I.1. Introduction

L'évaluation de la qualité de l'eau est essentielle pour comprendre l'état des ressources hydriques et garantir leur utilisation sûre et efficace. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'analyse de la qualité de l'eau, basée sur une série de paramètres biologiques, physiques et chimiques. Ces résultats fournissent une vue d'ensemble de la condition actuelle des sources d'eau, et mettent en évidence les aspects qui nécessitent une attention particulière pour diverses utilisations, notamment l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable, les besoins industrielles. L'objectif est de fournir des données précises et pertinentes.

II.2. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont des mesures qui décrivent les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau de 25 forages dans la zone de Lioua.

Les paramètres physico-chimiques obtenus auprès de l'ANRH de Biskra.

Tableau N° 20 : Paramètres physico-chimiques de l'eau de 25 forages-ANRH

N°	Nom du forage	T°C	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	NO3
1	GW10	16.2	7.8	2500	174	104	140	11	177	825	175	28
2	GW11	15.8	8.2	3000	270	59	272	25	122	1000	275	10
3	GW12	16	8.1	2000	216	65	118	16	238	500	217	4
4	GW13	16.4	7.7	2400	262	54	170	3	207	620	284	5
5	GW14	16.3	7.01	2740	263.4	94	174	6	219.6	980	165	10
6	GW15	15.5	7.9	2700	326	76	120	10	165	990	175	0
7	GW16	16.1	7.5	2600	350	66	156	15	177	990	250	4
8	GW17	16	7.35	2810	271.4	110.71	136	6	195.2	1000	160	0
9	GW18	16.7	8	2900	254	169	150	13	177	1220	238	45
10	GW19	15.7	7.11	4500	551.4	163.54	239	9	146	1800	385	0
11	GW20	16.5	7.9	3200	560	144	174	16	134	1650	300	5
12	GW21	16.8	7.9	3000	436	50	236	26	55	1104	388	6
13	GW22	17.1	8.1	2900	430	28	246	28	79	960	376	6
14	GW23	16.9	8	2300	284	48	124	19	226	490	305	10
15	GW24	15.5	7.43	1930	157.09	65.9	157	4	237.9	490	200	9
16	GW26	17	7.4	2010	234.23	70.21	126	12	224	1100	450	8
17	GW27	17.2	7.42	2875	301.13	65.98	134	9	234	1140	290	9
18	GW28	17.1	7.89	3045	467.33	69.44	189	6	178	1340	278	6
19	GW29	15.8	7.22	2900	480.35	57.87	140	11	154	350	667	17
20	GW30	17.2	7.53	2350	502.44	100.65	156	18	143	800	300	2
21	GW31	17	7.92	2300	467	321.45	120	5	167	1600	366	18
22	GW32	16.3	8.1	2050	278.55	365.34	340	16	107	1200	780	4
23	GW33	16.5	7.8	2480	134.76	189.23	104	10	98	1300	210	10
24	GW34	17.4	7.72	2200	303.67	97.45	220	15	48	560	200	23
25	GW35	16.4	7.21	2000	212.34	142.31	166	18	89	670	268	7

II.3 Paramètres physiques

II.3.1 La température

La température de l'eau de forage peut varier en fonction de divers facteurs, notamment la profondeur du forage, la géologie locale, le climat et d'autres conditions environnementales. En général, plus la profondeur du forage est grande, plus la température de l'eau tend à être élevée en raison de la chaleur géothermique provenant du noyau terrestre. Cependant, il existe des variations régionales et locales significatives.

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol.

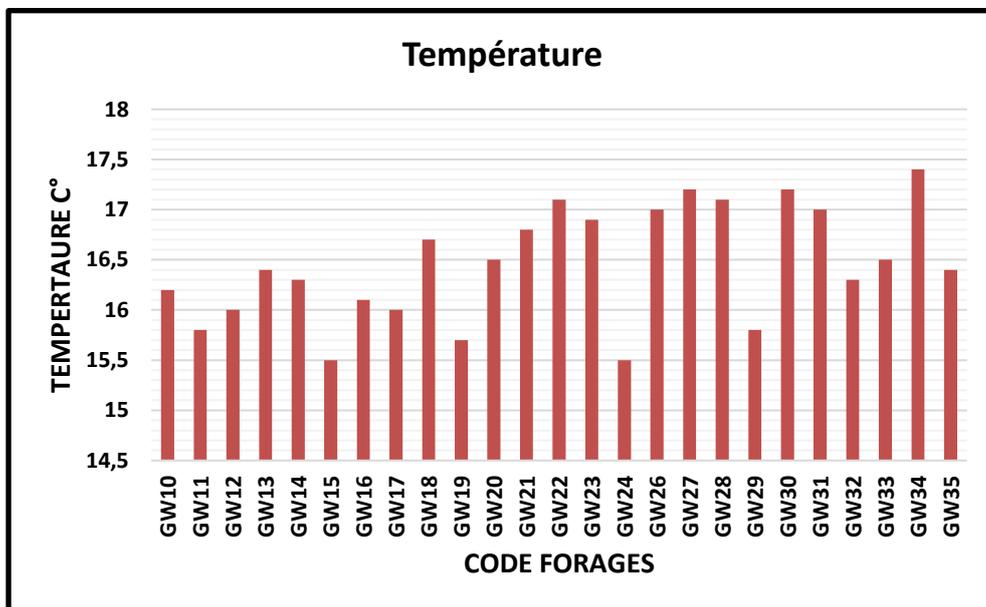


Figure N° 30 : Histogramme de la température de 25 forages.

Tableau N° 21 : Statistique de la température de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type
Température (T°)	°	15.5	17.4	16.456	0.567

- ✓ Nous observons une faible variation de température avec écart type de (0.567°C).
- ✓ Température minimum 15.5°C
- ✓ Température maximum 17.4°C
- ✓ Température moyenne 16.656°C

II.3.2 Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution. Il est défini comme le logarithme négatif de la concentration en ions hydrogène ([H+]) dans une solution.

Le pH est une échelle qui va de 0 à 14, où 7 est considéré comme neutre. Les valeurs inférieures à 7 indiquent une solution acide, tandis que les valeurs supérieures à 7 indiquent une solution basique (ou alcaline).

Il est important de noter que des changements significatifs du pH peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes vivants et les processus chimiques, ce qui rend la mesure et le contrôle du pH essentiels dans notre secteur de ressources hydraulique.

- ✓ Les valeurs des pH des 25 forages sont comprises entre 7.01 et 8.2, ceci indique que toutes les eaux de 25 forages ont des pH acceptables par rapport aux normes Algériennes (JORA 2014).

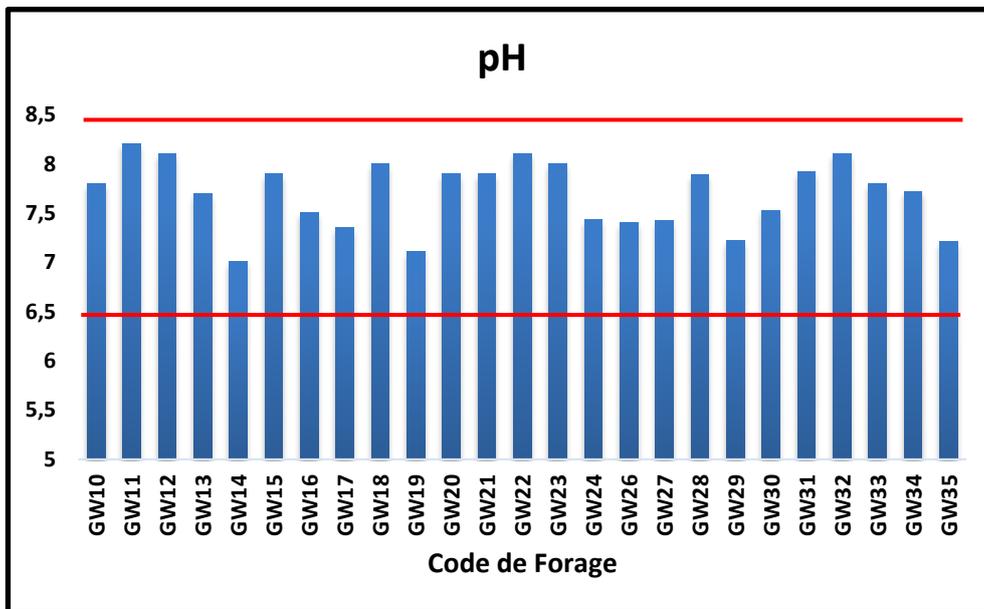


Figure N° 31 : Histogramme du pH de 25 forages.

Tableau N° 22 : Statistique du pH de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
pH	-	7.01	8.2	7.69	0.345	6.5 - 9

- ✓ Nous observons un écart type de (0.345).
- ✓ pH minimum 7.01
- ✓ pH maximum 8.2
- ✓ pH moyenne 7.69

II.3.3 Minéralisation (Conductivité électrique CE)

Dans le contexte de l'eau, la conductivité électrique est souvent utilisée comme indicateur de la concentration d'ions dissous dans l'eau. Les ions tels que le sodium, le calcium, le magnésium, le chlorure et le sulfate contribuent à la conductivité électrique de l'eau. Par conséquent, une eau avec une conductivité électrique élevée peut indiquer une concentration plus élevée en sels dissous, tandis qu'une eau avec une conductivité électrique faible peut indiquer une concentration plus faible en sels dissous.

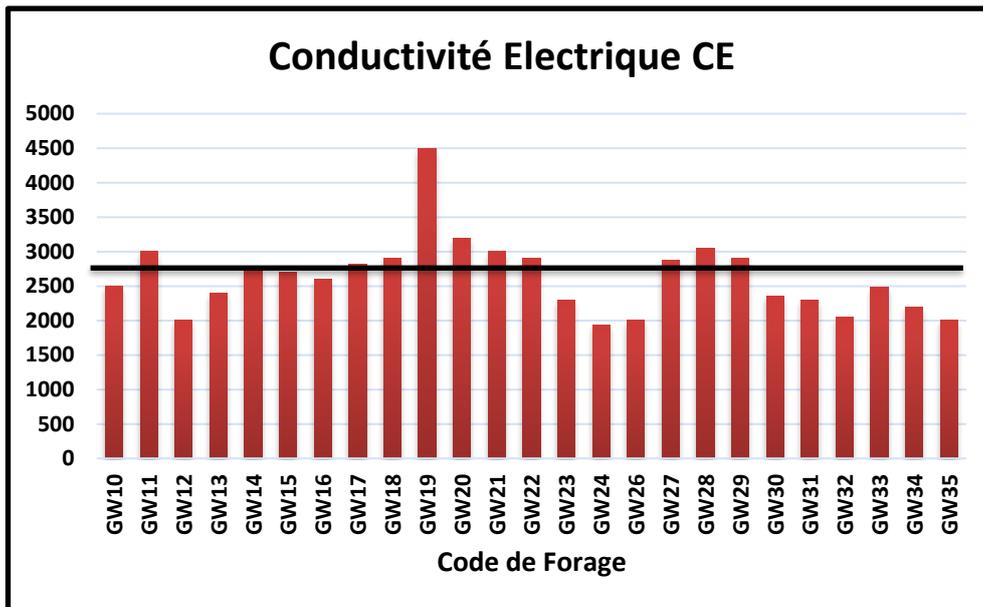


Figure N° 32 : Histogramme de la conductivité électrique de 25 forages.

- ✓ D’après la figure N° 32 les résultats obtenus de la conductivité électrique sont comme suit :
- 10 forages leurs valeurs dépassent la norme Algérienne (2800uS/cm)
- 15 forages leurs valeurs inférieurs à la norme Algérienne (2800uS/cm)

Tableau N° 23 : Statistique de la CE de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
CE	uS/cm	1930	4500	2653.75	546.76	2800

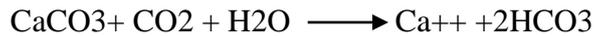
- ✓ Un grand écart type observé (546.76 uS/cm).
- ✓ Conductivité électrique minimale est (1930 uS/cm)
- ✓ Conductivité électrique maximale est (4500 uS/cm)
- ✓ Conductivité électrique moyenne est (265375 uS/cm)

II.4 Les paramètres chimiques

II.4.2 Les cations majeurs

II.4.2.1 Le Calcium (Ca²⁺)

Le calcium est l'élément présent dans la quasi-totalité des eaux, c'est un élément alcalino-terreux, un composant majeur de la dureté des eaux, sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique, selon l'équation suivante :



Il provient également des formations gypseuses (CaSO₄+2H₂O) qui sont facilement soluble. Parfois les eaux arrivent à avoir des hautes teneurs en CaSO₄ et l'augmentation du SO₄ entraîne une augmentation de Calcium (Ca²⁺).

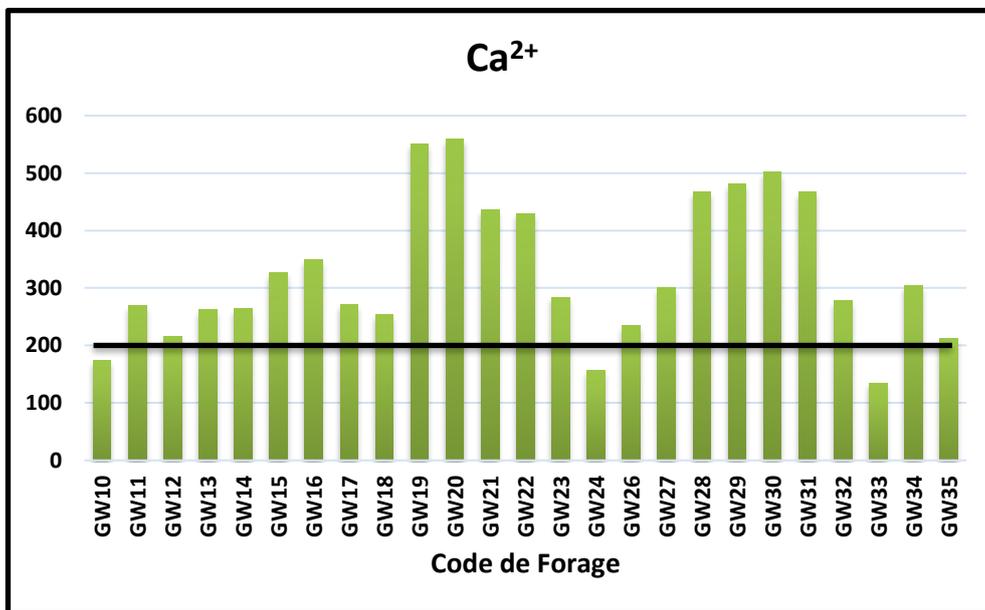


Figure N° 33: Histogramme de Calcium de 25 forages.

Tableau N° 24 : Statistique de Calcium de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Ca ²⁺	mg/L	134.76	560	327.48	124.15	200

- ✓ Nous observons que les résultats de 22 forages du Calcium dépassent la norme (200mg/L), et les résultats de 03 forages sont inférieurs à la norme.
- ✓ Un grand écart type observé (124.15 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de calcium observée est (134.76 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de calcium observée est (560 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de calcium observée est (327.48 mg/L).

II.4.2.2 Le Magnésium (Mg²⁺)

La présence de magnésium dans l'eau peut influencer sa qualité, en particulier dans le contexte de l'eau potable et de l'eau d'irrigation. Des concentrations élevées de magnésium peuvent affecter le goût de l'eau et la formation de dépôts dans les canalisations et les appareils ménagers. En agriculture, la concentration de magnésium dans l'eau d'irrigation peut avoir un impact sur la croissance des cultures et sur la qualité des sols.

Il est important de surveiller la concentration de magnésium dans l'eau, en particulier dans la région de Lioua.

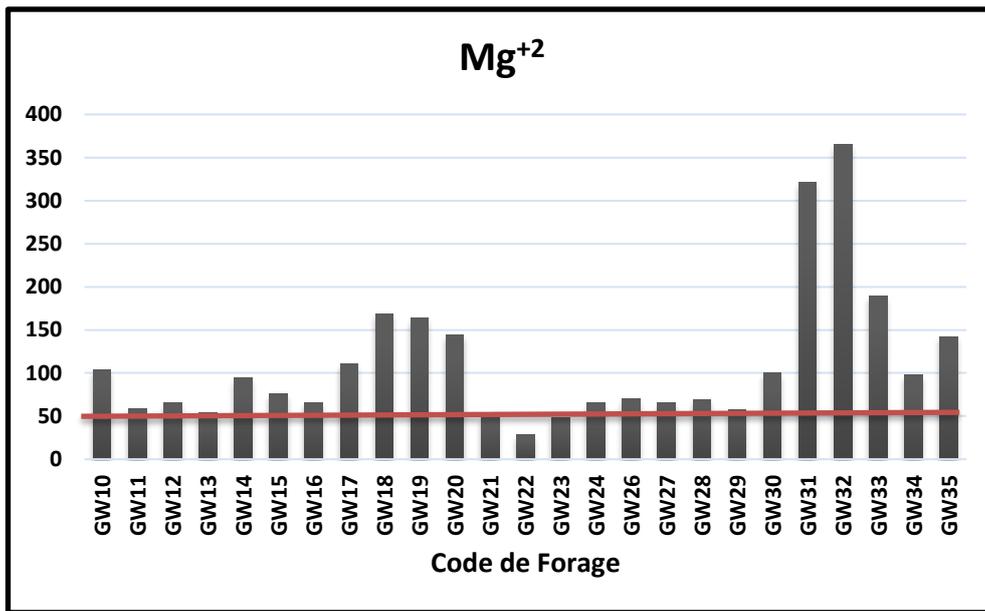


Figure N° 34 : Histogramme de Magnésium de 25 forages.

- ✓ D'après l'histogramme du Magnésium nous constatons que, le forage GW21 est conforme à la norme, deux forages (GW22 et GW23) sont inférieurs à la norme. La totalité des forages (22 forages), leur paramètre de Mg²⁺ est supérieur à la norme (50mg/L).

Tableau N° 25 : Statistique de Magnésium de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Mg ²⁺	mg/L	28	365.3	111.08	81.67	50

- ✓ Un grand écart type observé (81.67 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de magnésium observée est (28 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de magnésium observée est (365.3 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de magnésium observée est (111.08 mg/L).

II.4.2.3 Le Sodium (Na²⁺)

Lorsque du sodium est introduit dans de l'eau souterraine, plusieurs réactions peuvent se produire en fonction de divers facteurs tels que la concentration en sodium, le pH de l'eau, la présence d'autres composés chimiques.

Des concentrations élevées de sodium dans l'eau souterraine peuvent rendre l'eau impropre à la consommation en raison de son goût salé et peuvent également affecter la qualité des sols irrigués avec cette eau en raison de l'accumulation de sodium dans le sol.

En résumé, l'introduction de sodium dans l'eau souterraine peut déclencher une série de réactions chimiques et avoir des implications sur la qualité de l'eau et de l'environnement.

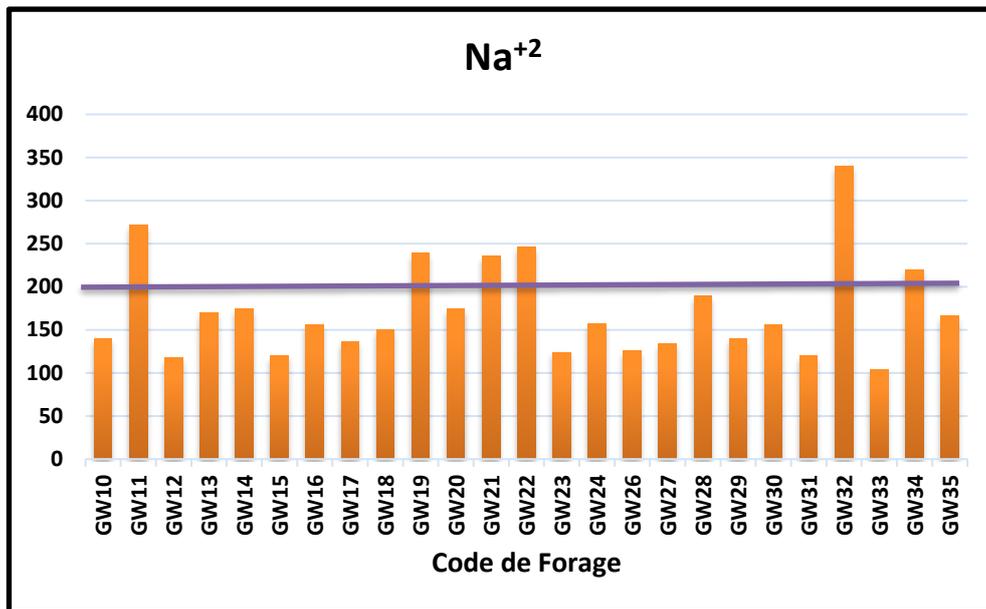


Figure N° 35 : Histogramme de Sodium de 25 forages.

- ✓ D’après l’histogramme du Sodium nous observons que, 19 forages leurs résultats sont inférieurs à la norme et 06 forages leurs résultats sont supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N° 26 : Statistique de Sodium de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Na ²⁺	mg/L	104	340	172.28	57.12	200

- ✓ Un grand écart type observé (57.12 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de sodium observée est (104 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de sodium observée est (340 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de sodium observée est (172.08 mg/L).

II.4.2.4 Le Potassium (K)

La présence de potassium dans les eaux souterraines peut avoir plusieurs sources. Le potassium est un élément chimique présent naturellement dans de nombreux minéraux, notamment les feldspaths et les micas. Lorsque l'eau souterraine circule à travers ces formations géologiques contenant des minéraux riches en potassium, elle peut dissoudre une certaine quantité de cet élément. La présence de potassium dans les eaux souterraines peut avoir des implications sur la qualité de l'eau, en particulier si les concentrations sont très élevées. Des niveaux élevés de potassium dans l'eau potable peuvent affecter son goût et sa qualité, et dans certains cas, ils peuvent présenter des risques pour la santé, notamment en provoquant des problèmes rénaux chez les personnes sensibles. Par conséquent, il est important de surveiller attentivement la qualité des eaux souterraines et de mettre en œuvre des mesures de gestion appropriées pour prévenir la contamination par le potassium et d'autres substances potentiellement nocives.

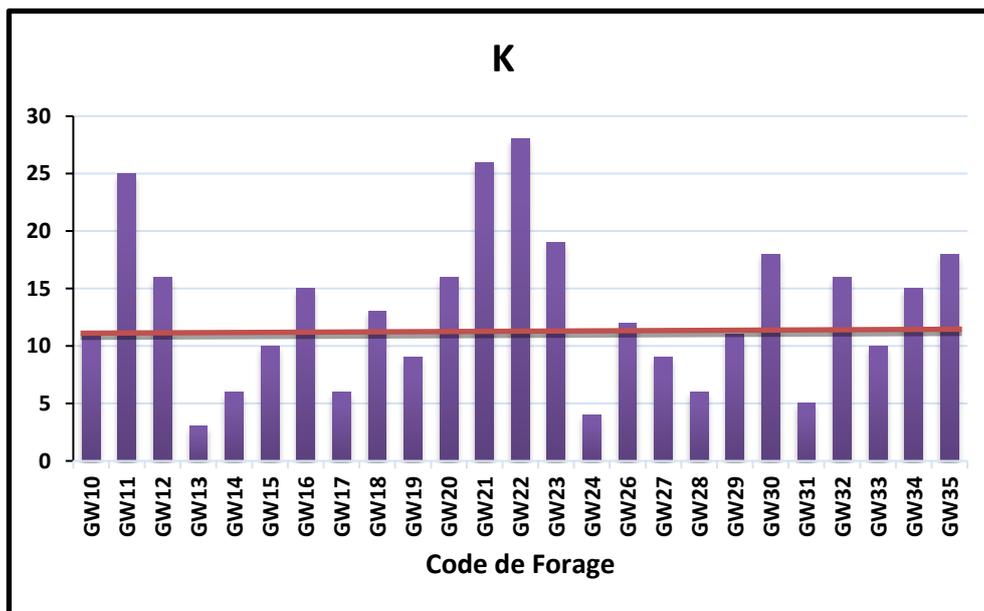


Figure N° 36 : Histogramme de Potassium de 25 forages.

- ✓ Selon l’histogramme du Potassium ont montré que, 13 forages leurs résultats sont inférieurs à la norme et 12 forages leurs résultats supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N° 27 : Statistique de Potassium de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
K	mg/L	3	28	13.08	6.80	12

- ✓ Un grand écart type observé (6.80 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de potassium observée est (03 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de potassium observée est (28 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de potassium observée est (13.08 mg/L).

II.4.3 Les anions majeurs

II.4.3.1 Bicarbonate (HCO_3^-)

La présence de bicarbonate (HCO_3^-) dans les eaux souterraines est assez courante et peut provenir de diverses sources. Le bicarbonate est souvent formé par la dissolution du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'eau, ce qui produit de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui à son tour se dissocie en ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et ions hydronium (H_3O^+).

Les eaux souterraines qui circulent à travers les roches calcaires ou dolomitiques peuvent également contenir des concentrations élevées de bicarbonate, car ces roches sont souvent composées de carbonate de calcium (CaCO_3) ou de carbonate de magnésium (MgCO_3), qui se dissolvent dans l'eau pour former des ions bicarbonate.

Les eaux souterraines riches en bicarbonate peuvent avoir un goût légèrement amer ou alcalin, mais en général, elles ne présentent pas de risques pour la santé humaine à des concentrations typiques. Cependant, des niveaux élevés de bicarbonate dans l'eau peuvent avoir des implications pour la corrosion des tuyaux et des équipements dans les systèmes de distribution d'eau.

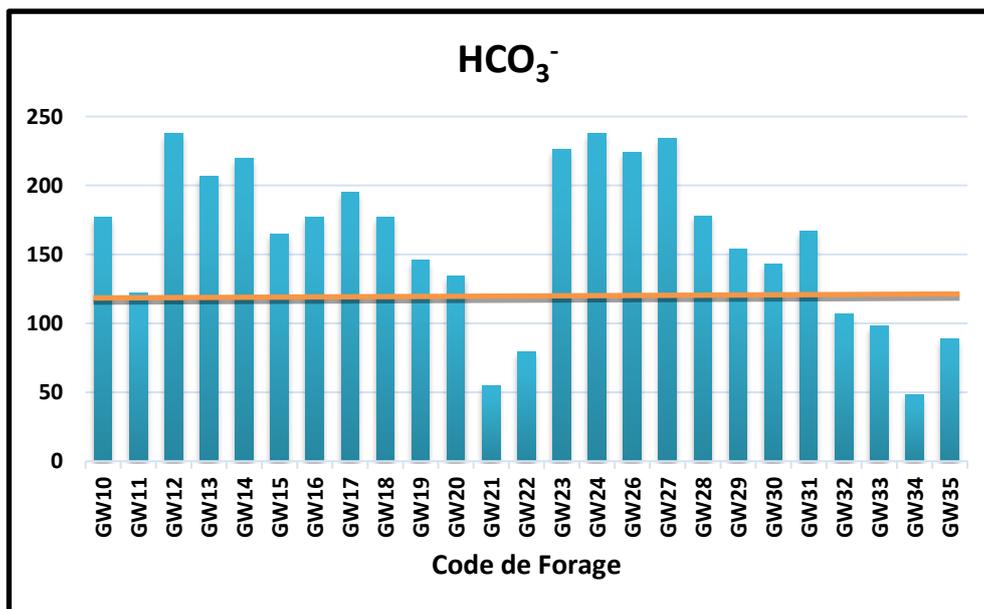


Figure N° 37 : Histogramme de Bicarbonate de 25 forages.

- ✓ Selon l'histogramme du Bicarbonate nous observons que, 06 forages leurs résultats sont inférieurs à la norme et 19 forages leurs résultats sont supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N° 28 : Statistique de Bicarbonate de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
HCO ₃ ⁻	mg/L	48	238	159.91	57.30	120

- ✓ Un grand écart type observé (57.30 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de bicarbonate observée est (48 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de bicarbonate observée est (238 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de bicarbonate observée est (57.30 mg/L).

II.4.3.2 Sulfate (SO₄²⁻)

Le sulfate est un composé chimique commun dans l'eau souterraine. Il provient généralement de la dissolution des minéraux contenant du soufre, tels que la gypse (sulfate de calcium) et la pyrite (sulfure de fer). L'eau souterraine peut également accumuler du sulfate provenant de sources anthropiques telles que les activités minières, agricoles et industrielles. La présence de sulfate dans l'eau souterraine peut avoir plusieurs implications.

À des concentrations élevées, il peut affecter la qualité de l'eau potable, provoquer des goûts et des odeurs indésirables, et avoir des effets laxatifs sur les personnes qui la consomment. De plus, les sulfates peuvent réagir avec d'autres composés dans l'eau pour former des sulfures, ce qui peut entraîner des problèmes d'odeur, de corrosion et de précipitation dans les systèmes de distribution d'eau.

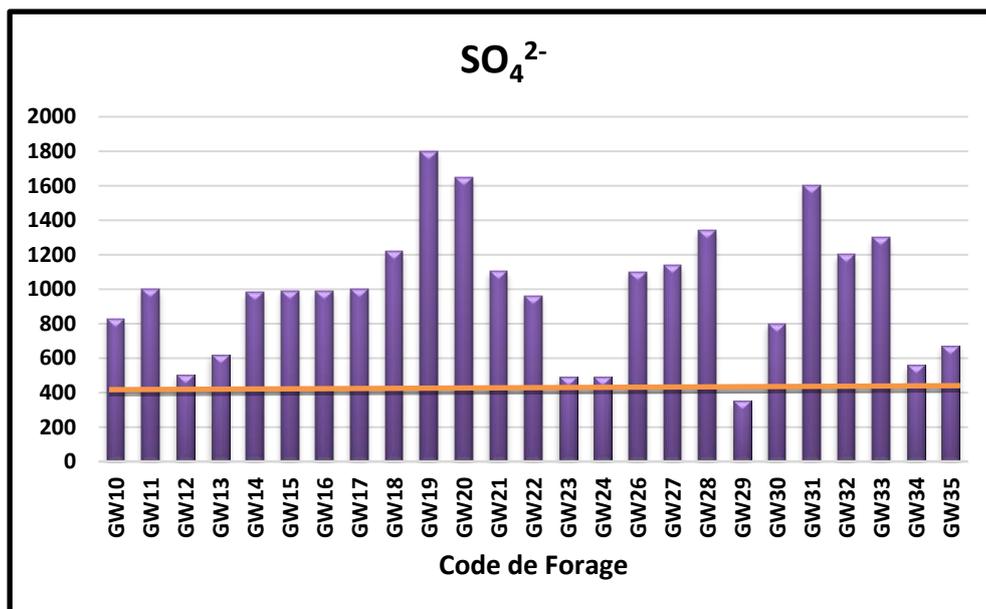


Figure N° 38 : Histogramme de Sulfate de 25 forages.

- ✓ D’après l’histogramme du Sulfate un seul résultat de forage GW 29 est inférieur à la norme et les résultats de 24 forages sont supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N° 29 : Statistique de Sulfate de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
SO ₄ ²⁻	mg/L	350	1800	987.16	379.98	400

- ✓ Un grand écart type observé (379.98 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de sulfate observée est (350 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de sulfate observée est (1800 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de sulfate observée est (987.16 mg/L).

II.4.3.3 Chlorure (Cl⁻)

Le chlorure dans l'eau souterraine peut provenir de diverses sources naturelles et anthropiques. Les principales sources naturelles de chlorure dans les eaux souterraines comprennent les dépôts de sel, les intrusions marines, et la dissolution de minéraux contenant du chlorure tels que l'halite. Les activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie et le déglacage des routes peuvent également contribuer à l'augmentation des niveaux de chlorure dans les eaux souterraines. La présence de chlorure dans l'eau souterraine peut avoir des implications importantes pour la qualité de l'eau, notamment en ce qui concerne son utilisation pour la consommation humaine et l'irrigation. Des niveaux élevés de chlorure dans l'eau peuvent rendre l'eau non potable en raison de son goût salé et de son effet laxatif. De plus, le chlorure peut avoir des effets néfastes sur la croissance des plantes lorsqu'il est utilisé pour l'irrigation, en particulier dans les cultures sensibles au sel.

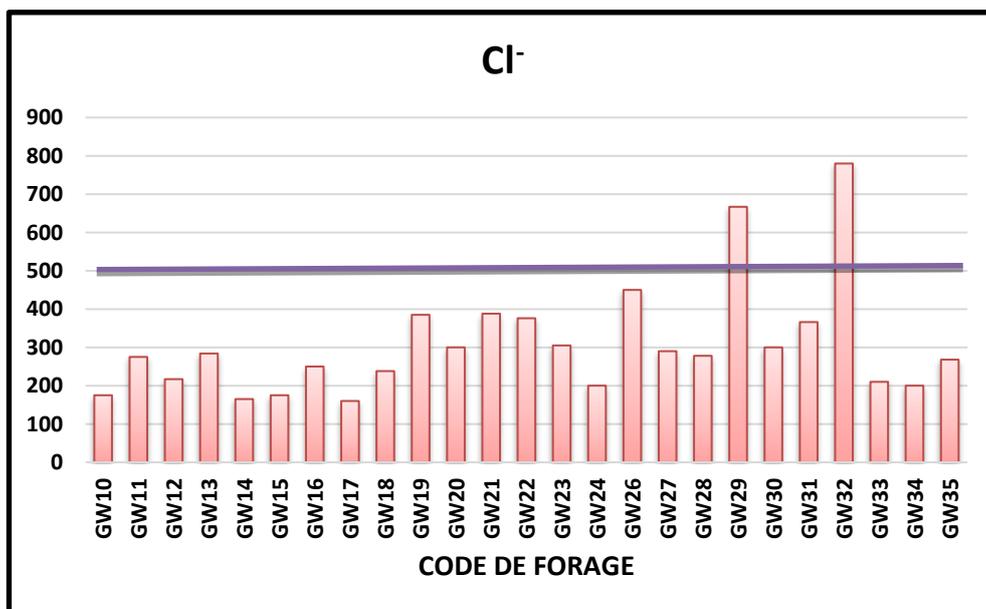


Figure N° 39 : Histogramme de Chlorure de 25 forages.

- ✓ Selon l’histogramme de Chlorure nous observons que, 23 forages leurs résultats sont inférieurs à la norme et 02 forages leurs résultats sont supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N° 30 : Statistique de Chlorure de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Cl ⁻	mg/L	160	780	309.75	147.76	500

- ✓ Un grand écart type observé (147.76 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de chlorure observée est (160 mg/L).
- ✓ Quantité maximale de chlorure observée est (780 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de chlorure observée est (309.75 mg/L).

II.4.3.4 Nitrate (NO₃⁻)

La présence de nitrate dans les eaux souterraines peut être un problème environnemental majeur. Les nitrates sont des composés chimiques composés d'azote et d'oxygène, et ils sont souvent utilisés comme engrais dans l'agriculture. Lorsque les engrais sont utilisés en excès ou mal gérés, les nitrates peuvent s'infiltrer dans le sol et finir par contaminer les eaux souterraines. Une concentration élevée de nitrates dans l'eau souterraine peut avoir des conséquences néfastes sur la santé humaine et écosystèmes aquatiques.

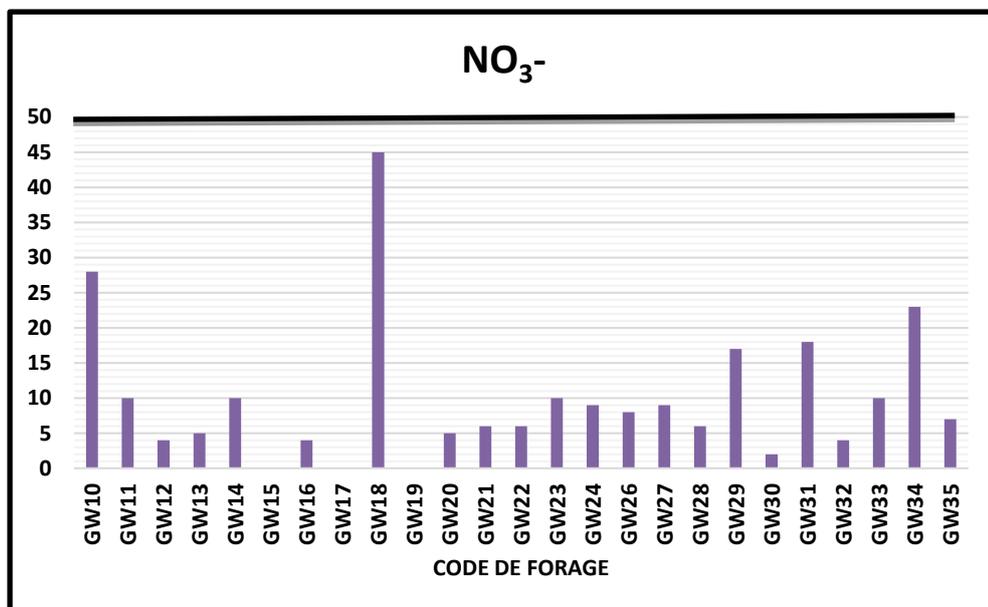


Figure N° 40 : Histogramme de Nitrate de 25 forages.

- ✓ D’après l’histogramme du Nitrate les résultats sont inférieurs à la norme Algérienne.

Tableau N° 31 : Statistique de Nitrate de 25 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
NO ₃ ⁻	mg/L	0	45	9.84	10.03	50

- ✓ Un grand écart type observé (10.03 mg/L).
- ✓ Quantité minimale de nitrate observée est (0).
- ✓ Quantité maximale de nitrate observée est (45 mg/L).
- ✓ Quantité moyenne de nitrate observée est (9.84 mg/L).

II.4.4 Analyse statistique des paramètres physico-chimique

➤ **Matrice de corrélation**

Une matrice de corrélation est simplement un tableau contenant les coefficients de corrélation pour différentes variables. La matrice montre comment toutes les paires de valeurs possibles dans un tableau sont liées les unes aux autres. Il s’agit d’un outil puissant pour résumer un grand ensemble de données et pour trouver et montrer des modèles dans les données.

Il est souvent présenté sous la forme d’un tableau, où chaque variable figure à la fois en ligne et en colonne et où le coefficient de corrélation entre chaque paire de variables est inscrit dans chaque cellule. Le coefficient de corrélation varie de -1 à +1, où -1 signifie une corrélation négative parfaite, +1 signifie une corrélation positive parfaite et 0 signifie qu’il n’y a pas de corrélation entre les variables.

Tableau N° 32 : Résultats de matrice de corrélation.

Paramètres	T°C	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
T°C	1										
pH	0,1925	1									
CE	-0,1751	-0,1636	1								
Ca	0,2006	-0,0341	0,6105	1							
Mg	0,0336	0,1391	-0,0898	0,0466	1						
Na	0,0007	0,2414	0,2560	0,2370	0,2365	1					
K	0,2213	0,4620	0,0264	0,1644	-0,1968	0,4573	1				
HCO ₃	-0,2222	-0,2370	-0,1559	-0,2742	-0,2251	-0,5567	-0,5822	1			
SO ₄	0,1209	0,0770	0,5882	0,4449	0,5152	0,1972	-0,1050	-0,1700	1		
Cl	0,0451	0,0553	0,0262	0,3468	0,3945	0,4823	0,2094	-0,2342	0,0862	1	
NO ₃	0,2220	0,1749	-0,0995	-0,2410	0,1480	-0,1504	-0,0517	-0,0304	-0,0789	-0,0971	1

➤ **Interprétation des résultats de Matrice de corrélation :**

Vu aux résultats obtenus à partir de l’utilisation de la matrice de corrélation, nous observons comme suite :

- 1- Aucune corrélation parfaite soit négative ou positive.
- 2- Des résultats modérés proches à la corrélation positive sont classés par ordre décroissant :
 - A- Corrélation entre Ca et CE (0.6105)
 - B- Corrélation entre SO₄ et CE (0.5882)
 - C- Corrélation entre SO₄ et Mg (0.5152)
- 3- Des résultats modérés proches à la corrélation négative sont classés par ordre décroissant :
 - A- Corrélation entre HCO₃ et K (- 0.5822)
 - B- Corrélation entre HCO₃ et Na (- 0.5567)

II.5 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]

L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) est une mesure utilisée pour évaluer la qualité globale de l'eau dans une région donnée (Lioua). Il combine plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques pour fournir une indication de la santé de l'écosystème aquatique et de la sécurité de l'eau pour différents usages tels que la consommation humaine, la vie aquatique, l'agriculture, etc.

Dans notre cas l'étude de qualité de l'eau de 25 forages de Lioua, les valeurs calculées à la base de 10 paramètres sont montrées comme suite :

Tableau N° 33 : Valeurs de WQI de 25 forages.

N°	Code de Forage	Résultats de WQI
1	GW10	99.732
2	GW11	130.393
3	GW12	105.972
4	GW13	68.705
5	GW14	80.861
6	GW15	90.482
7	GW16	101.614
8	GW17	82.776
9	GW18	120.355
10	GW19	102.050
11	GW20	120.994
12	GW21	129.368
13	GW22	132.647
14	GW23	112.178
15	GW24	71.566
16	GW26	94.837
17	GW27	87.432
18	GW28	83.163
19	GW29	89.978
20	GW30	114.764

21	GW31	120.434
22	GW32	153.209
23	GW33	105.671
24	GW34	106.069
25	GW35	115.709

➤ **Récapitulative de résultats de WQI**

Intervalle de WQI	Qualité d'eau	Nombre de forage	Pourcentage %	Désignation de forages	Possibilité d'utilisation et son domaine
0-25	Excellente	0	0	Néant	/
26-50	Bonne	0	0	Néant	/
51-75	Modérée	2	08 %	GW13- GW24	Eau potable avec traitement obligatoire/ Irrigation
76-100	Mauvaise	8	32 %	GW10- GW14-GW15- GW17-GW26-GW27- GW28-GW29	Une possibilité d'utilisation à l'irrigation avec des conditions fermes.
> 100	Très Mauvaise	15	60 %	GW11-GW12-GW16- GW18-GW19-GW20- GW21-GW22-GW23- GW30-GW31-GW32- GW33-GW34-GW35	Utilisation interdite (Consommation humaine ou irrigation)

Vu aux résultats englobés dans le tableau ci-dessus nous analysons et interprétons les valeurs comme suite :

1. **02** forages représentant d'un taux de **08 %** par apport à la totalité des forages, leur eau spécifiée d'une qualité modérée nécessite un traitement avant l'utilisation à la consommation humaine, et favorable pour l'utilisation à l'irrigation.
2. **08** forages représentant d'un taux de **32 %** par apport à la totalité des forages, leur eau spécifiée d'une mauvaise qualité et n'a pas autorisée à l'utilisation humaine, mais la possibilité d'utiliser à l'irrigation sous conditions.
3. **15** forages représentant d'un taux de **60 %** par apport à la totalité des forages, leur eau spécifiée avec très mauvaise qualité et n'a pas autorisée à la consommation humaine ou l'irrigation.

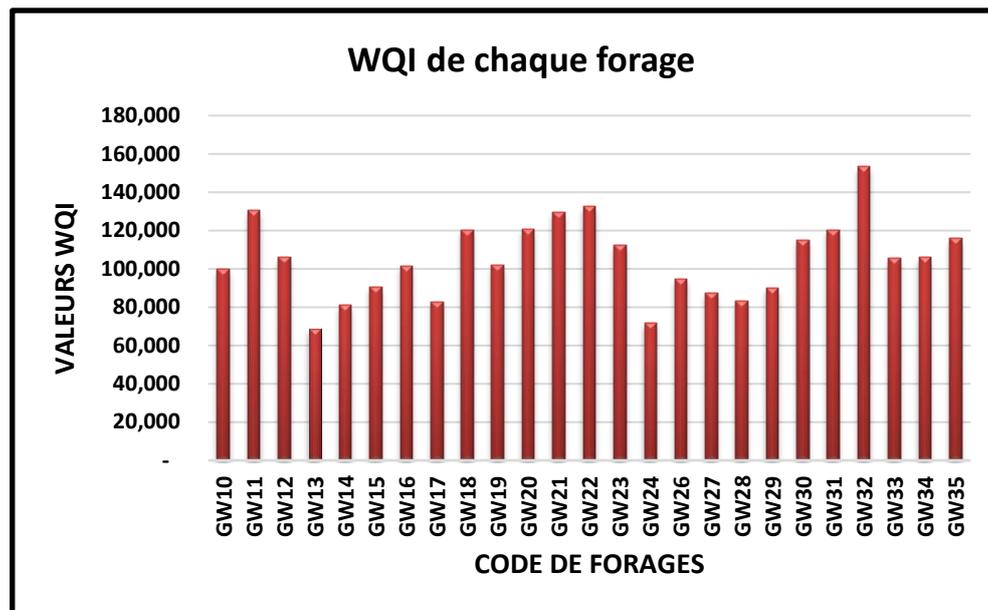


Figure N° 41 : Histogramme de WQI de 25 forages.

II.6 Classification hydro-chimique des eaux souterraines

II.6.1 Traitement des données par Diagramme

II.6.1.1 Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.)

Le Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.), développé par le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon, est un outil important pour l'analyse des données hydrochimiques. Ce logiciel, souvent appelé "Diagrammes," permet de réaliser des analyses statistiques et graphiques des données hydrochimiques, facilitant la compréhension de l'évolution géochimique des eaux souterraines.

Le logiciel "Diagrammes" est particulièrement utile pour la classification géochimique des roches carbonatées et des eaux souterraines. Il inclut des fonctionnalités pour créer des diagrammes ternaires et d'autres types de représentations graphiques, aidant ainsi les chercheurs à visualiser et interpréter les données hydrochimiques de manière plus efficace.

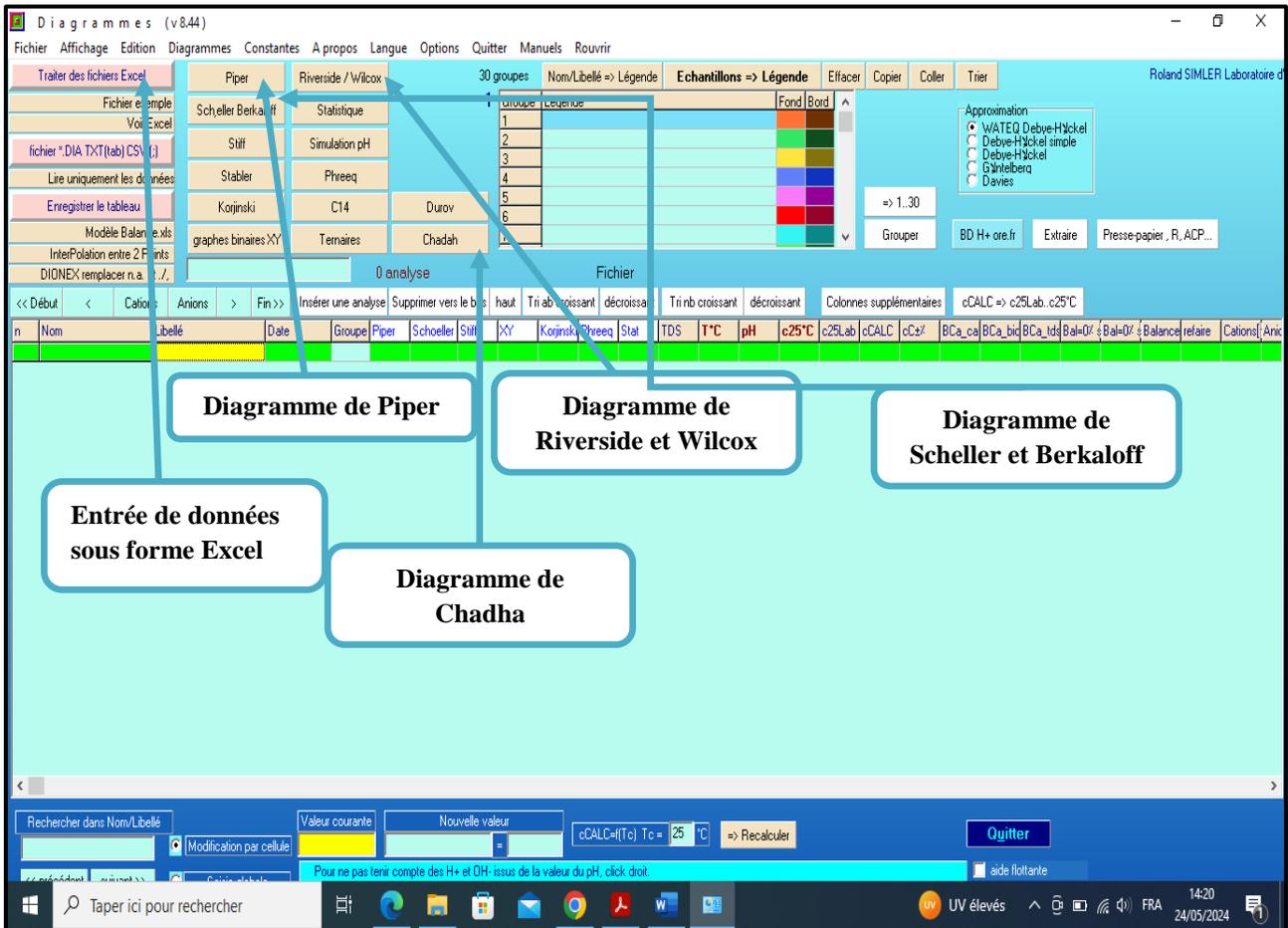


Figure N° 42 : Interface de logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.) version 8.44.

Dans notre étude nous avons utilisé le logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.) version 8.44 pour construire les diagrammes suivants :

A- Diagramme de piper

Un diagramme de Piper est un outil graphique utilisé en hydrochimie pour interpréter les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines et de surface. Il permet de représenter simultanément les concentrations des principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) dans un seul graphique composite.

Le diagramme de Piper se compose de trois parties principales :

- Deux diagrammes triangulaires : L'un pour les cations et l'autre pour les anions. Les pourcentages des cations et des anions sont projetés dans ces triangles.
- Un losange central : Il est formé en combinant les projections des points des deux triangles. Les points dans ce losange fournissent une vue d'ensemble des caractéristiques chimiques de l'eau analysée.

Un avantage du diagramme de Piper est qu'il permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements par famille présentant des faciès

similaires. Ce point peut s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre du suivi qualité d'une eau dans le temps, pour lequel on dispose plusieurs analyses physicochimiques.

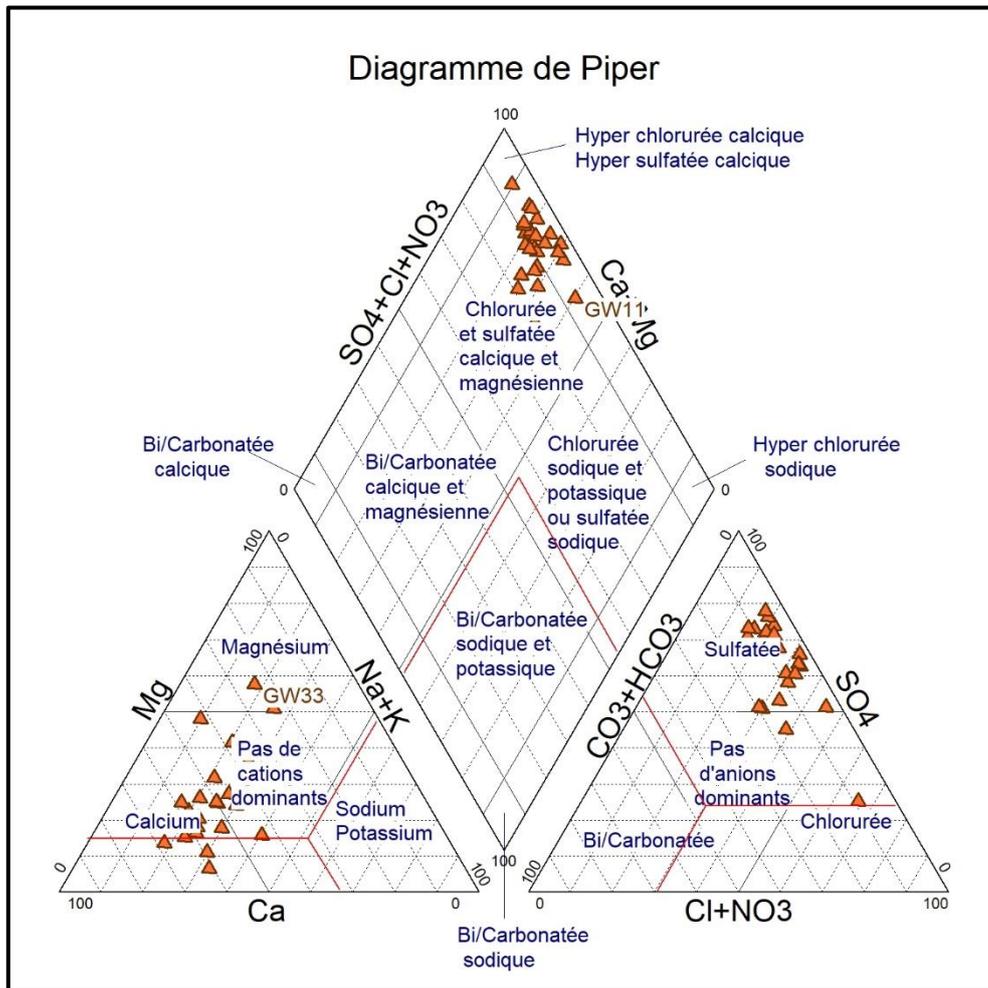


Figure N° 43 : Diagramme de Piper pour 25 forages de Lioua.

➤ **Interprétation des résultats de diagramme de Piper :**

La figure N° 41 montre les faciès chimiques des valeurs analysés dans les 25 forages de Lioua selon le diagramme de Piper qui présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

Nous observons que l'ensemble de l'eau souterraine de 25 forages étudiés leurs faciès est caractérisé par :

- ❖ Les cations dominants sont les calcium et magnésium : $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^{+}$
- ❖ Les anions dominants sont les sulfates et chlorure : $rSO_4^{-} > rCl^{-} > rNO_3^{-}$

B- Diagramme de Scheller et Berkaloff.

Le diagramme de Scheller et Berkaloff, également connu sous le nom de diagramme de Schoeller, est un outil couramment utilisé en hydrochimie pour représenter et comparer les concentrations de différents ions dans des échantillons d'eau. Ce diagramme semi-logarithmique permet de visualiser les faciès géochimiques des eaux et de comparer simultanément plusieurs échantillons.

Il est également utilisé pour comparer les résultats des analyses hydrochimiques avec des normes de qualité de l'eau et pour identifier des tendances spatio-temporelles dans les données.

Le diagramme de Scheller et Berkaloff est un outil essentiel pour les hydrogéologues et les chimistes de l'eau, offrant une représentation claire et comparative des compositions ioniques des eaux naturelles.

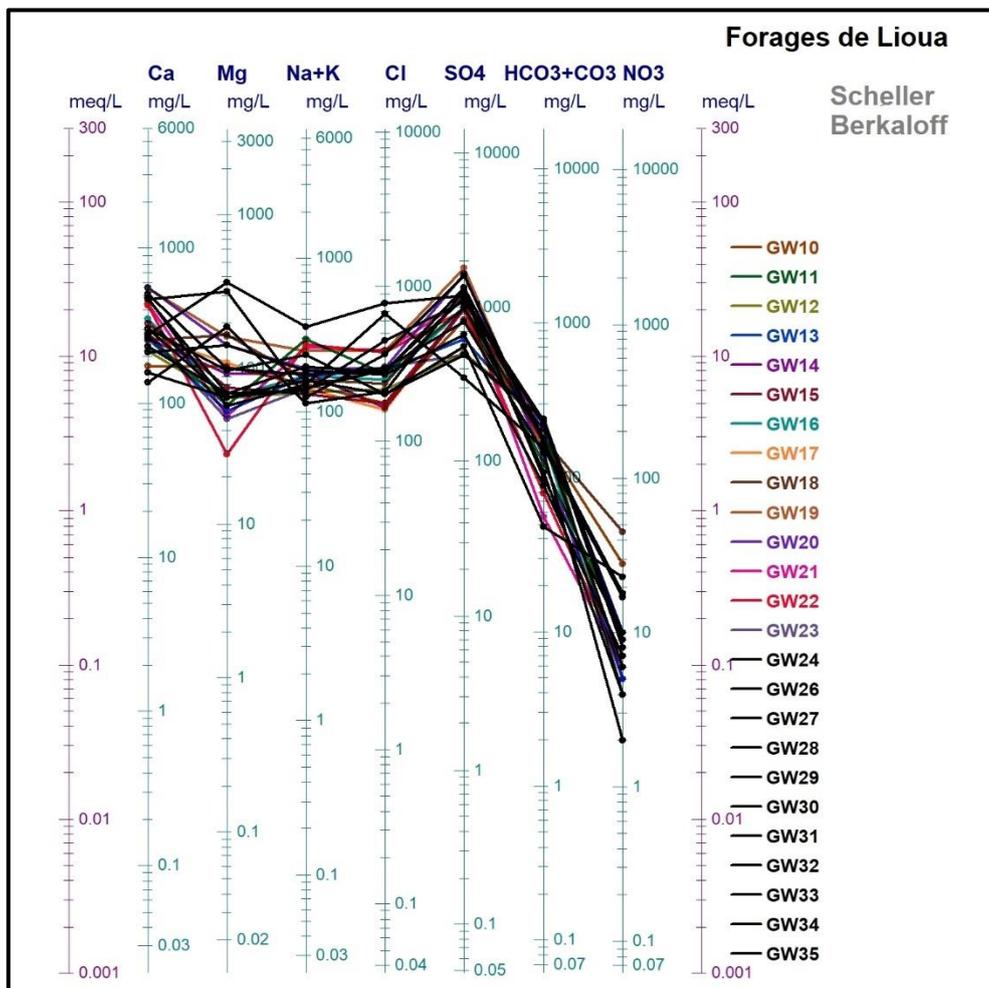


Figure N° 44 : Diagramme de Scheller et Berkaloff pour 25 forages de Lioua.

➤ **Interprétation des résultats de diagramme de Scheller et Berkloff :**

Ce digramme à échelle logarithmique, permet de distinguer deux faciès chimiques qui confirme ce qu'on a déjà trouvés sur le diagramme de Piper.

Les éléments dominants : SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Alors que Les faciès chimiques sont de type :

- ❖ Chloruré sodique.
- ❖ Sulfaté calcique magnésique.

C- Diagramme de Riverside.

Le diagramme de Riverside est un outil essentiel pour les gestionnaires de ressources en eau, les agronomes et les ingénieurs en irrigation. Il permet une évaluation rapide de la qualité de l'eau d'irrigation et aide à prévenir les problèmes liés à la salinité et à la sodicité des sols, assurant ainsi une agriculture durable et une gestion efficace des ressources en eau.

Les valeurs du S.A.R sont reportées en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau sur le diagramme de Riverside. Ce diagramme est constitué par des classes qui permettent la détermination de la qualité des eaux pour l'irrigation. Il est modifié pour être utilisé d'une manière plus générale par l'addition de la classe C5 pour tenir compte des eaux sahariennes très salines qui sont supérieures à 5000 $\mu S/cm$.

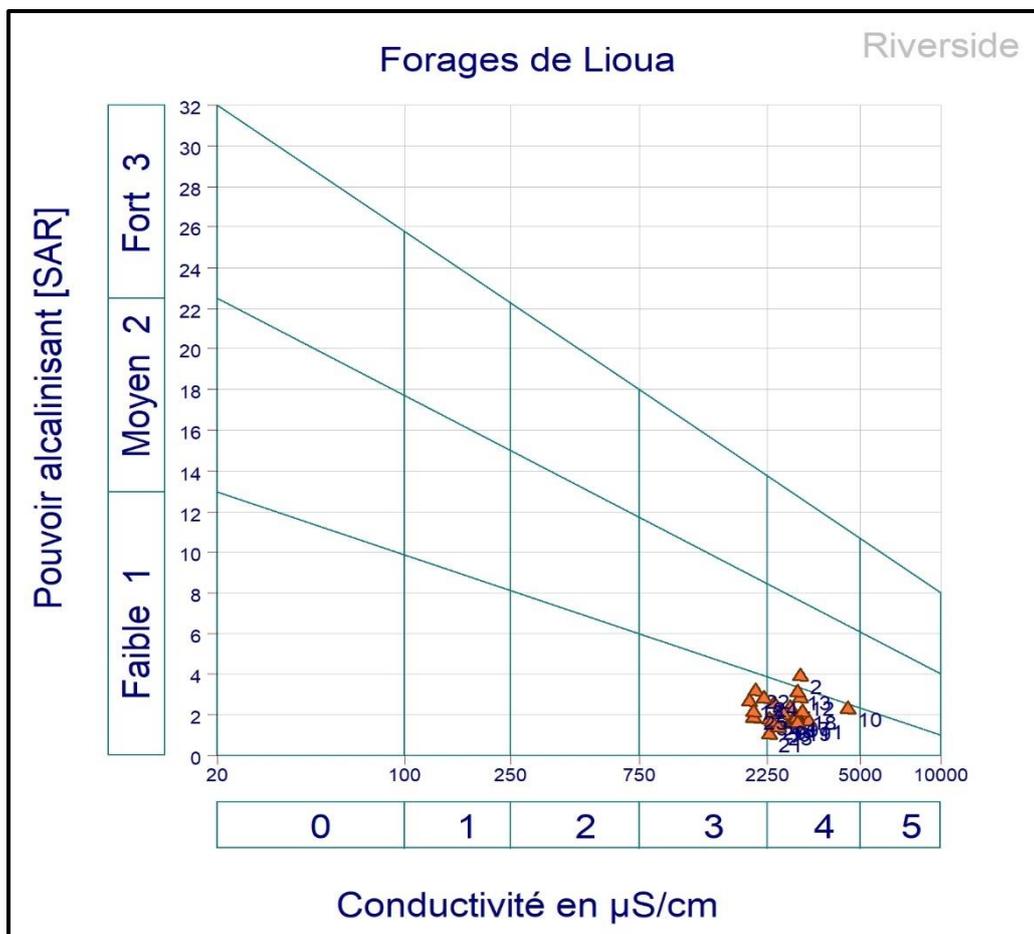


Figure N° 45 : Diagramme de Riverside pour les 25 forages de Lioua

Tableau N° 34 : Les classes issues du diagramme de RIVERSIDE (CLEMANT et GALAND, 1979).

	Classes CE (µS/cm)				
	C1 0 - 250	C2 250 - 750	C3 750-2250	C4 2250 - 5000	C5 5000 - 10000
S1 0 - 10	C1S1	C2S1	C3S1	C4S1	C5S1
S2 10 - 18	C1S2	C2S2	C3S2	C4S2	C5S2
S3 18 - 26	C1S3	C2S3	C3S3	C4S3	C5S3
S4 > 26	C1S4	C2S4	C3S4	C4S4	C5S4

Tableau N° 35 : Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE

Interprétation des Classes	
	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité très mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
	Eau déconseillée pour l'irrigation.

➤ **Interprétation des résultats de diagramme de Riverside :**

Les classes de l'eau de 25 forages d'après le diagramme de Riverside, on peut résumer deux types de classes :

1. La classe C4S1 qui représente de 19 forages, une eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.

2. La classe C3S1, qui représente de 05 forages, une eau de qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.

D- Diagramme de Wilcox.

Ce diagramme est basé sur les valeurs du rapport d'absorption en sodium (S.A.R) et de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau, définissant en cinq classes la qualité d'eau (excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise).

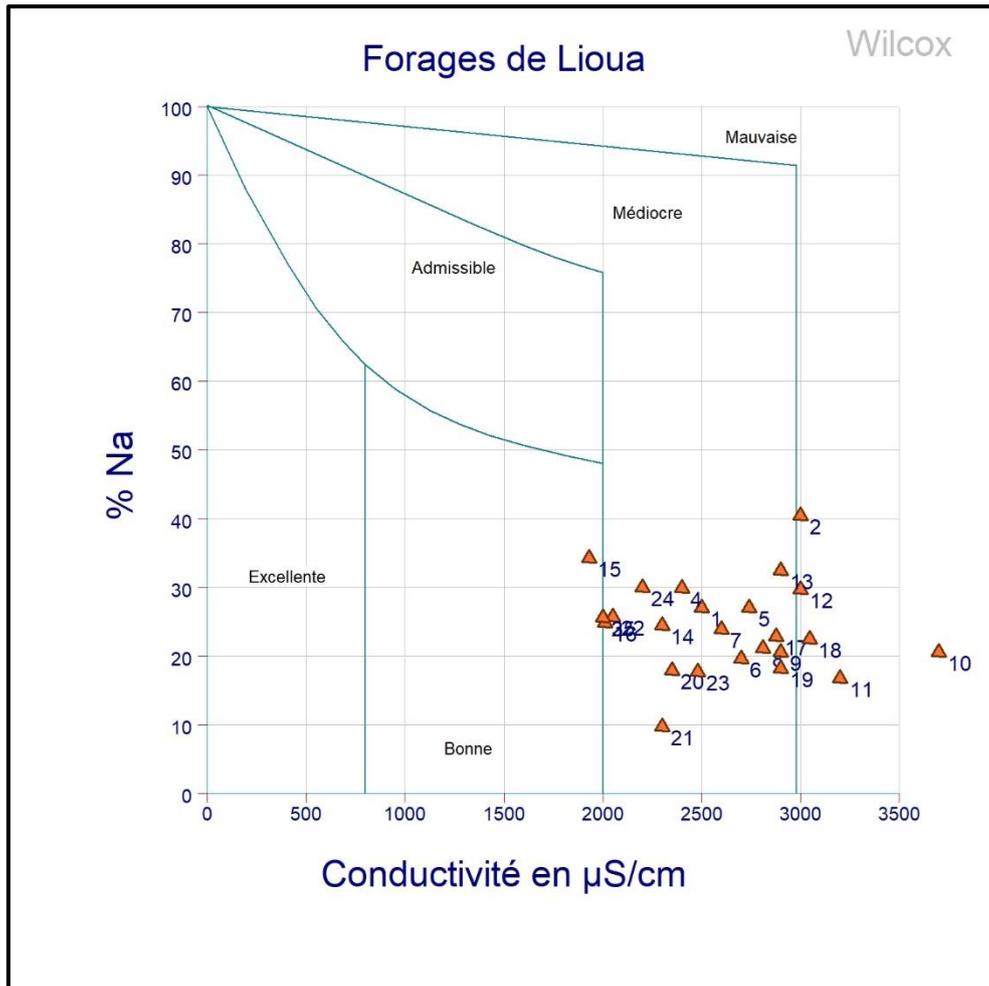


Figure N° 46 : Diagramme de Wilcox pour 25 forages de Lioua

➤ **Interprétation des résultats de diagramme de Wilcox :**

Les classes de l'eau de 25 forages d'après le diagramme de Wilcox, on peut résumer quatre types de classes :

1. Un forage avec eau de bonne qualité pour l'irrigation (GW15).
2. 19 forages avec eau médiocre qualité pour l'irrigation.
3. 04 forages avec eau de mauvaise qualité pour l'irrigation.
4. Un forage hors la classification de Wilcox.

E- Diagramme de Chadha.

Le diagramme de Chadha est un outil graphique utilisé pour représenter la qualité de l'eau. Il est utilisé pour évaluer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation. Le diagramme de Chadha permet de classer l'eau en différentes catégories en fonction de sa composition en sels solubles.

Le diagramme de Chadha est un outil pratique pour évaluer rapidement la qualité de l'eau en termes de son impact potentiel sur les sols et les cultures lorsqu'elle est utilisée pour l'irrigation

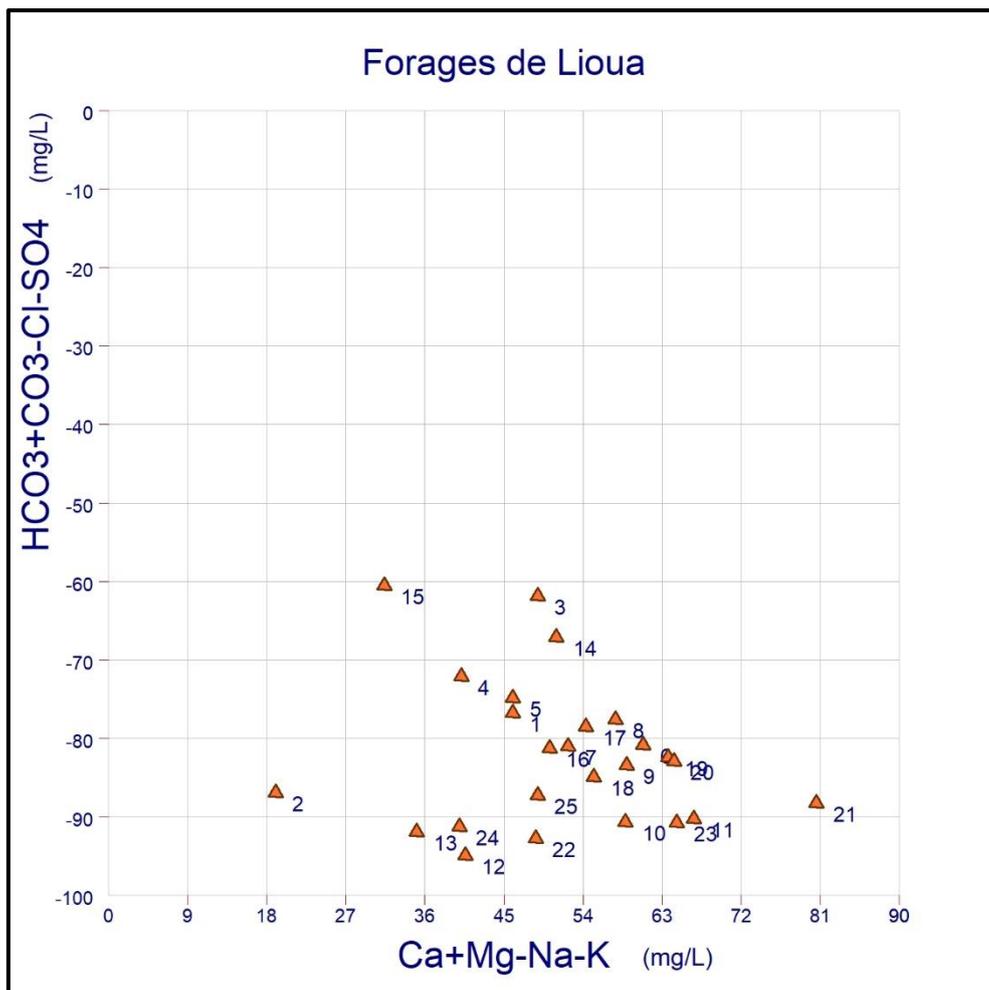


Figure N° 47 : Diagramme de Chadha pour 25 forages de Lioua

➤ **Interprétation des résultats de diagramme de Chadha:**

La projection des résultats des analyses sur le diagramme de Chadha, montre que Les alcalino-terreux dépassent les alcalins et les acides forts dépassent les acides faibles (type Ca – Mg – Cl, eaux de type Cl à dominante de Ca – Mg ou de type Ca – Mg à dominante de Cl) ce résultat confirme celui obtenu par le Diagramme de Piper.

II.7 Les aptitudes des eaux d'irrigation

II.7.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Le Taux d'Adsorption du Sodium (SAR) est une mesure utilisée en agriculture et en hydrologie pour évaluer le potentiel de salinité et de sodicité de l'eau d'irrigation ou du sol. Il est défini comme le rapport molaire de la concentration de sodium (Na^+), exprimée en milliéquivalents par litre (meq/L), à la racine carrée de la somme des concentrations de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}), également exprimées en milliéquivalents par litre :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (12)$$

Le SAR est utilisé pour évaluer le potentiel de l'eau d'irrigation à induire des problèmes de sodicité dans les sols. Les valeurs élevées de SAR indiquent un risque accru de sodicité du sol, ce qui peut entraîner une mauvaise structure du sol, une perméabilité réduite, une infiltration d'eau limitée et une diminution de la productivité agricole.

Tableau N° 36 : Résultats des SAR de 25 forages

ID	Code	SAR	<10	10-18	18-28	>28
1	GW10	16,793		+		
2	GW11	29,992				+
3	GW12	14,079		+		
4	GW13	19,126			+	
5	GW14	18,408			+	
6	GW15	11,970		+		
7	GW16	15,297		+		
8	GW17	13,915		+		
9	GW18	14,586		+		
10	GW19	17,877		+		
11	GW20	13,116		+		
12	GW21	21,410			+	
13	GW22	22,990			+	
14	GW23	13,611		+		
15	GW24	21,027			+	
16	GW26	14,443		+		
17	GW27	13,987		+		
18	GW28	16,315		+		
19	GW29	12,069		+		
20	GW30	12,705		+		
21	GW31	8,547	+			
22	GW32	26,798			+	
23	GW33	11,556		+		
24	GW34	21,969			+	
25	GW35	17,629		+		

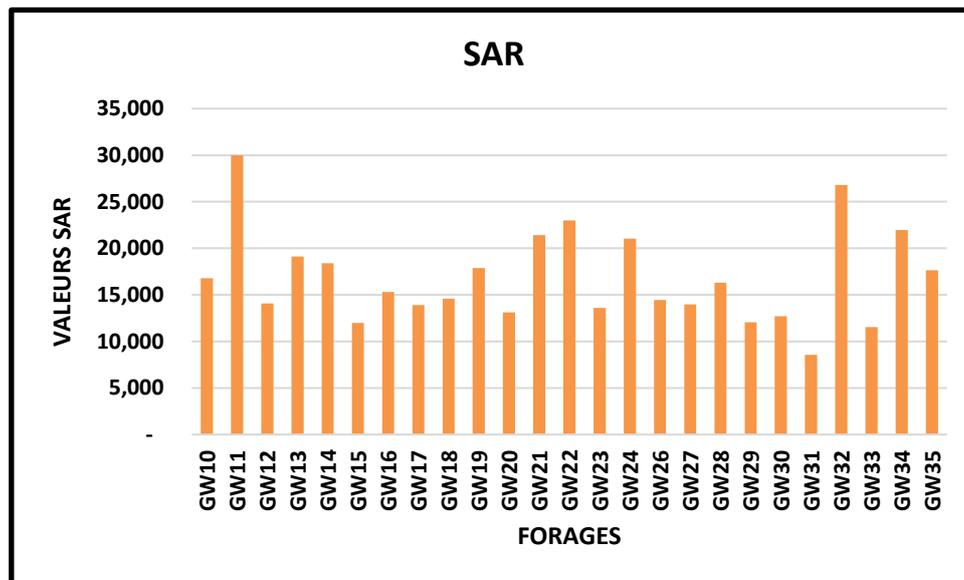


Figure N° 48 : Histogramme de SAR pour 25 forages.

➤ **Interprétation des résultats du SAR :**

1. Forage GW 31 de faible SAR < 10 (S01) : Peut être utilisé dans la plupart des sols avec peu de risques d'accumulation de sodium échangeable.
2. 16 forages de moyen SAR 10-18 (S02) : Peut poser problème dans les sols à texture fine sans gypse, surtout en l'absence de lessivage et avec une forte capacité d'échange de cations.
3. 07 forages de son SAR élevé 18-28 (S03) : Les sols irrigués peuvent atteindre des niveaux de sodium échangeable proches de la toxicité, nécessitant un bon drainage, un lessivage intense et l'apport de matière organique (moins critique dans les sols riches en gypse).
4. Forage GW 35 son SAR très élevé > 28 (S04) : Ces niveaux rendent les sols inappropriés pour l'irrigation, sauf en cas de faible ou moyenne salinité ou lors de l'utilisation du gypse comme amendement du sol.

II.7.2 La teneur en sodium (Na%)

La teneur en sodium (Na%) est une mesure utilisée pour évaluer la quantité de sodium présente dans une substance, généralement de l'eau ou des sols. Dans le contexte de l'analyse de l'eau, la teneur en sodium représente la proportion de sodium (Na^+) dans l'eau par rapport à d'autres cations, tels que le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}).

La teneur en sodium est souvent exprimée en pourcentage du poids total des cations présents dans l'eau. Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Na\% = (Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+) * 100 \quad (13)$$

Tableau N° 37 : Résultats des Na% de 25 forages

ID	Code	Na%	<20	20-40	40-60	60-80	>80
1	GW10	35,198		+			
2	GW11	47,444			+		
3	GW12	32,289		+			
4	GW13	35,378		+			
5	GW14	33,495		+			
6	GW15	24,436		+			
7	GW16	29,131		+			
8	GW17	27,094		+			
9	GW18	27,816		+			
10	GW19	25,754		+			
11	GW20	21,253		+			
12	GW21	35,027		+			
13	GW22	37,432		+			
14	GW23	30,105		+			
15	GW24	41,928			+		
16	GW26	31,191		+			
17	GW27	28,033		+			
18	GW28	26,648		+			
19	GW29	21,909		+			
20	GW30	22,391		+			
21	GW31	13,684	+				
22	GW32	35,604		+			
23	GW33	26,028		+			
24	GW34	36,943		+			
25	GW35	34,159		+			

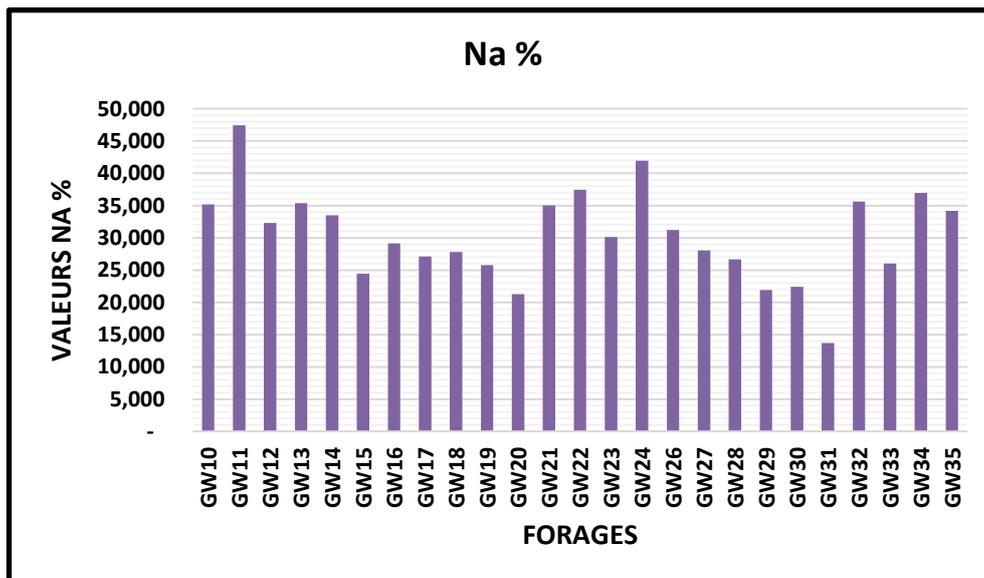


Figure N° 49 : Histogramme des Na% de 25 forages

➤ **Interprétation des résultats des Na% :**

- 1- Forage GW 31 de Na% < 20 : excellente qualité d'eau pour l'irrigation.
- 2- 22 forages de Na% entre 20-40 : une bonne qualité d'eau pour l'irrigation.
- 3- 02 forages de Na% entre 40-60 : une d'eau de qualité admissible pour l'irrigation.

II.7.3 L'indice de perméabilité (PI)

L'indice de perméabilité est un autre paramètre utilisé pour déterminer l'aptitude des eaux naturelles à l'irrigation. Cet indice est proposé par Doneen (1964) pour évaluer l'influence probable de la qualité des eaux sur les propriétés physiques des sols, car l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation a eu un effet profond sur la perméabilité du sol, elle est influencée par le total des sels dissous, la teneur en sodium et la teneur en bicarbonate (Donnen, 1964)

L'IP se calcule en utilisant l'équation : $IP = (Na + \sqrt{HCO_3^-} / Ca^{++} Mg^{+2} + Na) * 100$ (14)

Tableau N° 38 : Résultats des PI de 25 forages

ID	Code	PI	<25	25-75	>75
1	GW10	112,950			+
2	GW11	164,742			+
3	GW12	118,861			+
4	GW13	136,709			+
5	GW14	122,384			+
6	GW15	110,945			+
7	GW16	121,635			+
8	GW17	106,619			+
9	GW18	95,508			+
10	GW19	110,555			+
11	GW20	104,261			+
12	GW21	138,272			+
13	GW22	147,598			+
14	GW23	122,892			+
15	GW24	140,854			+
16	GW26	118,325			+
17	GW27	118,529			+
18	GW28	122,274			+
19	GW29	115,260			+
20	GW30	109,178			+
21	GW31	74,450		+	
22	GW32	96,065			+
23	GW33	73,694		+	
24	GW34	130,552			+
25	GW35	106,680			+

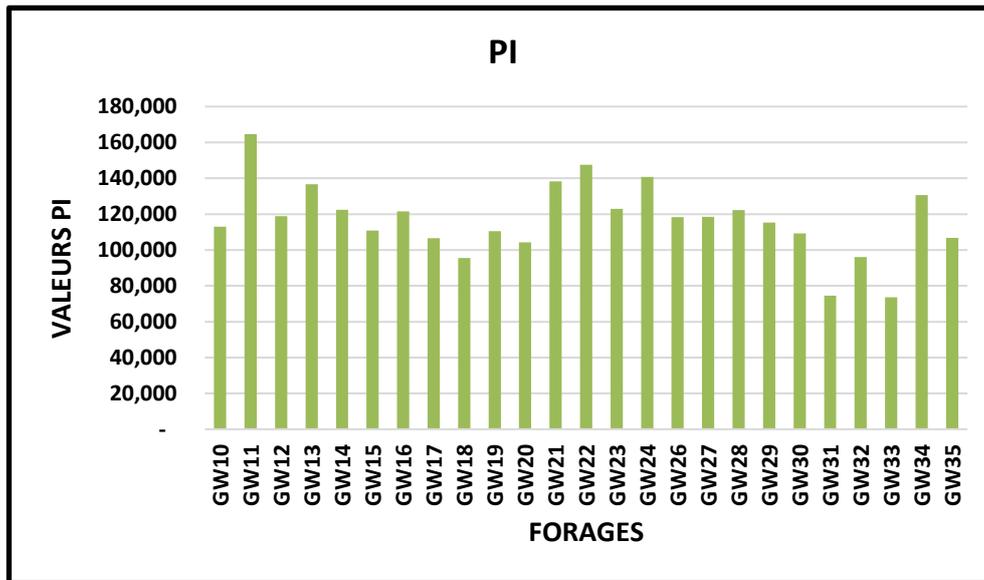


Figure N° 50 : Histogramme des PI de 25 forages

➤ **Interprétation des résultats des PI :**

- 1- Forage GW 31 et GW 33 le PI entre 25-75 : indique une bonne qualité d'eau pour l'irrigation.
- 2- 23 Forages le PI > 75 : indique une convenable qualité d'eau pour l'irrigation.

II.7.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)

Le Ratio de Risque du Magnésium (MHR) est une mesure utilisée en agronomie pour évaluer le risque potentiel de magnésium pour les plantes, en particulier dans le contexte de l'irrigation. Il est calculé en comparant la concentration de magnésium (Mg^{2+}) à la somme des concentrations de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) dans l'eau d'irrigation.

Le MHR est calculé à l'aide de la formule suivante : $MHR = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Ca^{2+}) \times 100$ (15)

Tableau N° 39 : Résultats des MHR de 25 forages

ID	Code	MHR	<50	>50
1	GW10	37,410	+	
2	GW11	17,933	+	
3	GW12	23,132	+	
4	GW13	17,089	+	
5	GW14	26,301	+	
6	GW15	18,905	+	
7	GW16	15,865	+	
8	GW17	28,973	+	
9	GW18	39,953	+	
10	GW19	22,875	+	
11	GW20	20,455	+	

12	GW21	10,288	+	
13	GW22	6,114	+	
14	GW23	14,458	+	
15	GW24	29,553	+	
16	GW26	23,062	+	
17	GW27	17,973	+	
18	GW28	12,937	+	
19	GW29	10,752	+	
20	GW30	16,689	+	
21	GW31	40,770	+	
22	GW32	56,740		+
23	GW33	58,406		+
24	GW34	24,294	+	
25	GW35	40,127	+	

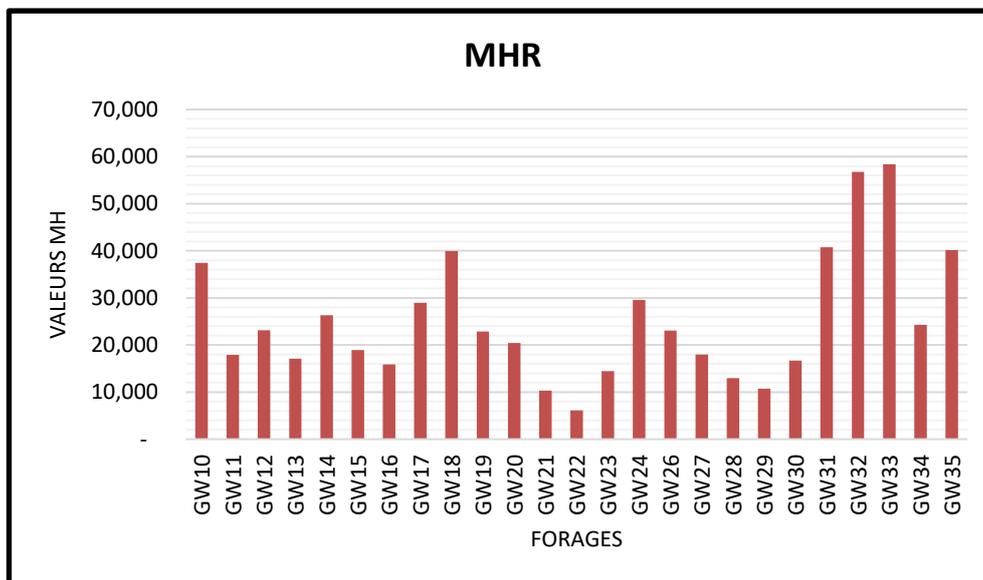


Figure N° 51 : Histogramme des MHR de 25 forages

➤ **Interprétation des résultats de MHR :**

- 1- Forage GW 32 et GW 33 le MHR >50 : le type d'eau affecte négativement la qualité du sol, et le sol devient plus alcalin.
- 2- 23 Forages le MHR <50 : le type d'eau au sol devient moins alcalin.

II.8 Analyse en composantes principales (ACP)

Dans notre étude, nous avons utilisé l'analyse en composantes principales (ACP) pour explorer les relations complexes entre divers paramètres hydrogéochimiques et leurs sources potentielles. Au sein de cette investigation, nous avons mené un examen approfondi de deux composantes principales, à savoir PC1 et PC2. Cette approche analytique a été appliquée aux

données dérivées de 25 forages et a inclus dix paramètres hydrogéochimiques, à savoir pH, EC, NO₃⁻, Cl⁻, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, et HCO₃.

La Figure N° 50 présente une représentation graphique de la projection des deux scores des composantes principales (PC1 vs. PC2) pour les ensembles de données dans un diagramme de dispersion en 2D.

L'utilisation de cette technique statistique multivariée (analyse en composantes principales) pour l'interprétation des données semble une solution intéressante pour une meilleure compréhension de la qualité des eaux étudiées (Adimalla, 2019).

Les graphiques issus de l'analyse factorielle, mettent en évidence des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles.

PCA1 représente 31,85 % de la variance totale et la variance cumulée est de 46,68 %. Cette dernière est principalement composée de Na (0,476), Cl (0,402), K (0,367), SO₄ (0,296) et Ca (0,285).

PCA 2 élucide 14,83 % de la variance totale, affichant des chargements substantiels pour Mg (0,573) et SO₄ (0,569). L'abondance accrue des ions magnésium (Mg) peut être attribuée à diverses sources, principalement issues de la dissolution du gypse et de la pollution anthropique.

La présence de SO₄²⁻ est principalement due à une utilisation non réglementée d'engrais et d'amendements du sol. De plus, les ions sulfate proviennent en partie de la dissolution du gypse ainsi que de l'introduction de polluants d'origine humaine dans le milieu hydrogéochimique, contribuant à leur prévalence globale (Subba Rao *et al.*, (2012). (Yang et al., 2016).

Tableau N° 40 : Variance totale expliquée

Facteur de la charge	Valeur propre	Variabilité (%)	Cumulé (%)
1	3,18	31,9%	31,9%
2	1,48	14,8%	46,7%
3	1,36	13,6%	60,3%
4	1,20	12,0%	72,3%
5	0,88	8,8%	81,1%
6	0,64	6,4%	87,5%
7	0,51	5,1%	92,6%
8	0,33	3,3%	95,9%
9	0,28	2,8%	98,7%
10	0,13	1,3%	100,0%

Nous apporterons une attention importante aux variables ayant une forte contribution positive ou négative à l'axe factoriel, ce qui facilitera la compréhension de la source de variabilité expliquée par les axes (Tableau N° 40).

Tableau N° 41 : Contributions des variables

Paramètres	Coefficients de PC1	Coefficients de PC2
pH	0,20	-0,06
CE	0,26	-0,28
Ca	0,29	0,16
Mg	0,10	0,57
Na	0,48	-0,11
K	0,37	-0,43
HCO3	-0,38	-0,13
SO4	0,30	0,57
Cl	0,40	-0,13
NO3	-0,21	-0,10

Les graphiques issus de l'analyse factorielle, mettent en évidence des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles. L'axe I exprime 31,9 % de la variance et oppose le calcium aux bicarbonates, et aux nitrates. Il traduit la minéralisation des eaux (Figure N° 50). Enfin, les sulfates et le magnésium sont étroitement liées et évoluent dans le même sens et se différencient sur l'axe II, qui est exprimé (14,8 %) de la variance.

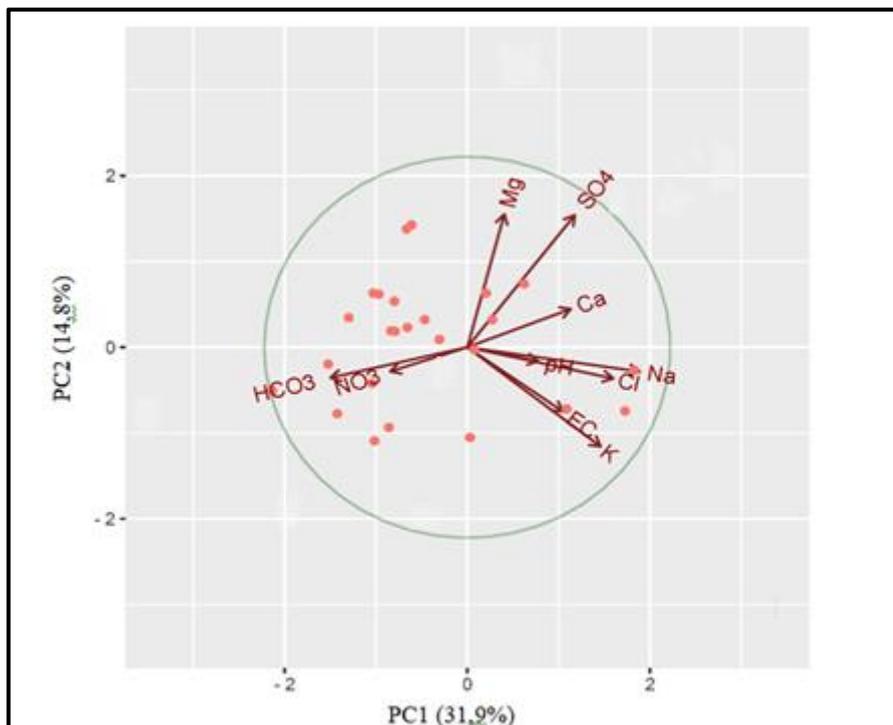


Figure N° 52 : Projection des variables sur le premier plan factoriel

II.9 Conclusion

L'étude de la qualité des eaux de 25 forages de la région de Lioua, comparée aux normes algériennes a montré une forte salinité avec une mauvaise qualité pour la consommation humaine et médiocre à mauvaise qualité pour l'irrigation.

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (IQE) des 25 forages, indiquent que la majorité des eaux des 25 forages se caractérisent par une mauvaise qualité d'eau par rapport à la classification du WQI qui ne peuvent être utilisés à la consommation humaine sans un préalable traitement.

L'analyse des indices de l'aptitude de l'eau à l'irrigation montre que la majorité des forages étudiés ont des conductivités élevées, indiquant une minéralisation importante, avec des ions dominants tels que les chlorures, les sulfates, le calcium et le magnésium.

En général, les paramètres physico-chimiques des eaux de la région étudiée se sont avérés mauvaises et médiocres, avec des valeurs non conformes aux normes Algérienne.

L'application de la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP) a mis en évidence des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles. L'axe I exprime 31,9 % de la variance et oppose le calcium aux bicarbonates, et aux nitrates. Il traduit la minéralisation des eaux. Enfin, les sulfates et le magnésium sont étroitement liés et évoluent dans le même sens et se différencient sur l'axe II, qui est exprimé (14,8 %) de la variance.

Le traitement initial et préparatoire des eaux est essentiel pour améliorer leur qualité selon les normes, afin de répondre aux attentes des consommateurs et des pouvoirs publics en matière de protection de la santé humaine et l'environnement.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La gestion des eaux souterraines représente un défi crucial pour la durabilité environnementale, économique et sociale. Ces ressources, souvent invisibles mais essentielles. Cependant, leur surexploitation, la contamination et les impacts du changement climatique menacent leur qualité et leur disponibilité.

La qualité de l'eau des forages est un enjeu majeur pour la santé publique, l'agriculture, et l'industrie. Les forages, souvent utilisés pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation, doivent fournir une eau de qualité optimale pour garantir la sécurité sanitaire et l'efficacité des activités économiques.

L'évaluation de la qualité de l'eau demeure à l'heure actuelle un impératif pour rassurer la durabilité et la protection de l'écosystème de la zone d'étude. L'évaluation de la qualité des eaux de 25 forages sis à Lioua on fait l'objet d'une étude.

Les résultats obtenus ont montré que, l'indice de qualité d'eau (IQE), les eaux de deux forages examinés ont une qualité modérée qui nécessite un traitement avant toute consommation humaine, mais elles sont acceptables dans l'irrigation. Les eaux de huit forages sont de mauvaise qualité, mais elles sont acceptables dans l'irrigation sous des conditions. Par contre les eaux des quinze derniers forages sont de très mauvaise qualité et ne peuvent pas être utilisés dans l'irrigation.

D'après le diagramme de Piper, le faciès chimique des eaux des 25 forages chloruré sulfaté, magnésienne et calcique, avec des tendances dont les cations dominants sont les calcium et magnésium, et les anions dominants sont les sulfates et chlorure.

Selon l'analyse du diagramme de Scheller et Berkloff, deux faciès chimiques sont confirmés déjà trouvés par le diagramme de Piper, chloruré sodique et Sulfaté calcique magnésique.

A partir de l'analyse du diagramme de Riverside nous distinguons deux classes :

1. La classe C4S1 qui représente de 19 forages, une eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
2. La classe C3S1, qui représente de 05 forages, une eau de qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.

Selon l'analyse du diagramme de Wilcox, ont classes les valeurs des 25 forages de Lioua en quatre classes :

1. Un forage avec eau de bonne qualité pour l'irrigation (GW15).

2. 19 forages avec eau médiocre qualité pour l'irrigation.
3. 04 forages avec eau de mauvaise qualité pour l'irrigation
4. Un forage hors la classification de Wilcox

Selon l'analyse par le diagramme de Chadha montre que Les alcalino-terreux dépassent les alcalins et les acides forts dépassent les acides faibles (type Ca – Mg – Cl, eaux de type Cl à dominante de Ca – Mg ou de type Ca – Mg à dominante de Cl), ce qui explique que ce résultat obtenu est le même que celui du diagramme de Piper.

Les indices d'aptitudes de l'eau à l'irrigation, à savoir : le rapport d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (Na%), l'indice de perméabilité (IP) et le rapport de danger de magnésium (MHR), ont montrés que :

- Le SAR : 02 forages avec un taux de SAR acceptable, 16 forages avec taux moyen de SAR et 07 avec des valeurs élevées de SAR, indiquent un risque accru de sodicité du sol, ce qui peut entraîner une mauvaise structure du sol, une perméabilité réduite, une infiltration d'eau limitée et une diminution de la productivité agricole.
- Le Na% : La majorité des valeurs de taux de sodium des 25 forages sont acceptables pour l'irrigation.
- Le PI : les résultats obtenus de l'indice de perméabilité, des eaux des 25 forages sont acceptables à être utiliser dans l'irrigation.
- Le MHR : les résultats obtenus des eaux de 23 forages sont acceptables à utiliser dans l'irrigation et deux forages leur type d'eau affecte négativement la qualité du sol et ce dernier devient plus alcalin.

Les graphiques des résultats de l'analyse statistique multivariée avec l'utilisation de la technique d'analyse en composantes principales (ACP), mettent en évidence des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles. L'axe I 'exprime 31,9 % de la variance et oppose le calcium aux bicarbonates, et aux nitrates. Il est traduit la minéralisation des eaux. Enfin, les sulfates et le magnésium sont étroitement liées et évoluent dans le même sens et se différencient sur l'axe II, qui est exprimé (14,8 %) de la variance, cette interprétation donne une approche apparente comment les relations compliquées entre divers et plusieurs paramètres de l'eau.

L'étude de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines pour 25 forages de la région de Lioua comparée aux normes Algérienne montre que les eaux sont fortement salinées et ne sont pas destinées à l'utilisation humaine, dans ce cas, les eaux souterraines de la zone étudiée vis-à-vis à leurs charges physico-chimiques, ne doivent pas être utilisées instantanément.

Conclusion Générale

Un traitement préalable et primordial à ces eaux souterraines devrait être envisagée pour réformer leur qualité devant les normes Algériennes et répondre aux attentes des consommateurs et les agriculteurs.

Une évaluation régulière et rigoureuse de la qualité de l'eau des forages est essentielle pour détecter les paramètres physico-chimiques et prendre des mesures correctives.

L'utilisation des technologies modernes, telles que les capteurs en temps réel et les analyses de laboratoire avancées, permettent de surveiller efficacement les paramètres clés de la qualité de l'eau.

Pour en conclure, nous pouvons récapituler :

« L'amélioration de la qualité de l'eau souterraine est une priorité pour assurer un accès durable à une eau saine et sûre. Cela nécessite une approche intégrée, combinant une surveillance rigoureuse, une gestion préventive et une éducation communautaire. Tout en adoptant des stratégies durables et en renforçant la collaboration entre les parties prenantes. De ce fait, il est possible de garantir que les eaux souterraines restent une ressource fiable ».

Références Bibliographies

➤ Ouvrages et Articles :

- 1- ANAT, Agence Nationale d'Aménagement de territoire, Algérie., 2003 - Schéma directeur des ressources en eau. Wilaya de Biskra. Rapport de synthèse, 100 p.
- 2- ABHS, (2018). Réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (Wilaya de Biskra).
- 3- A.N.R.H, (1996), Etude des grandes unités hydrogéologiques du Sahara Septentrional.
- 4- ANRH (2011). Agence nationale des ressources hydriques. Les bassins versants de L'Algérie.
- 5- Agence Régionale de Santé d'Auvergne, (2014), La qualité de l'eau destinée à la consommation humaine en auvergne.
- 6- Ahcène, S.; Bachir, H.; Bourafai, S. Hydrochemical Characteristics of Aquifers and Their Predicted Impact on Soil Properties in Biskra Region, Algeria. *Egypt. J. Agric. Res.* 2021, 99, 205–220.
- 7- Abdel-Fattah, M.K., Mokhtar, A. & Abdo, A.I. Application of neural network and time series modeling to study the suitability of drain water quality for irrigation: a case study from Egypt. *Environ Sci Pollut Res* 28, 898–914 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10543-3>
- 8- Akhtar et al., (2021) L. Akhtar, M. Ahmad, S. Iqbal, A.A. Abdelhafez, M.T. Mehran Biochars' adsorption performance towards moxifloxacin and ofloxacin in aqueous solution: role of pyrolysis temperature and biomass type
- 9- Athamena, A. (2022); Gaagai, A.;Aouissi, H.A.; Burlakovs, J.;Bencedira, S.; Zekker, I.; Krauklis, A.E. Chemometrics of the Environment: Hydrochemical Characterization of Groundwater in Lioua Plain (North Africa) Using Time Series and Multivariate Statistical Analysis. *Sustainability* 2023, 15, 20. <https://doi.org/10.3390/su15010020>
- 10- Adimalla et al., (2020). Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: A case study from hard rock terrain of south India
- 11- Adhikary et al., (2012). Groundwater Drought Assessment for Barind Irrigation Project in Northwestern Bangladesh
- 12- Adhikary P, Chandrasekharan H, Chakraborty D, Kamble K (2010) Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach. *Environ Monit Assess* 167(1–4):599–615. doi:10.1007/s10661-009-1076-5
- 13- Awad et al., (2022), Performance Evaluation of Solar-Powered Atmospheric Water Harvesting Using Different Glazing Materials in the Tropical Built Environment : An Experimental Study.
- 14- Balamurugan.P (2020), Identifying influencing groundwater parameter on human health associate with irrigation indices using the Automatic Linear Model (ALM) in a semi-arid region in India
- 15- Batarseh et al., (2021), Assessment of groundwater quality for irrigation in the arid regions using irrigation water quality index (IWQI) and GIS-Zoning maps: Case study from Abu Dhabi Emirate, UAE
- 16- Bala.S (2021), Changement de la qualité des sols mis sous culture dans un milieu aride. Cas de la région des Ziban, Université Mohamed Khider – Biskra
- 17- Berne. F et Cordonnier. J, (1991), Traitement des eaux. Edition Tec.

- 18- Belghitim. C. B,(2013), Etude de la qualitephysico-chimique et bacteriologique des eaux souterraines de la nappe plio-quadernaire dans la région de meknès(maroc). Larhyss Journal, pp. 21-36.
- 19- Belhadi A., MEHENNI M., REGUIEG L et YEKHLEF H., 2016 — Apport de la plasticulture à la dynamique agricole de la région de Ziban (Biskra). Revue Agriculture, 1 : 93-99.
- 20- Bagnouls F. ET GAUSSEN H. (1953) : Saison sèche et indice xéothermique. Doc. Cartes prod. végét., série : génér, t. III, vol. 1, art. VIII, 47 p., 65 fig., 1 carte h. -texte, Toulouse ; et Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, t. 88, pp. 193-239. Toulouse.
- 21- Boutouga F.(2012).Ressources et essai de gestion des eaux dans le Zeb Est de Biskra.Thèse de Magister, en Ingénierie des ressources en eau. Université Badji Mokhtar-Annaba,Algérie
- 22- Bouchemal.F (2017), Diagnostic de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la région de Biskra, Université Mohamed Khider – Biskra
- 23- Bradai et al., (2022). Combined Modeling of Multivariate Analysis and Geostatistics in Assessing Groundwater Irrigation Sustenance in the Middle Cheliff Plain (North Africa).
- 24- Boukhari, (2008). Juste prix de l'eau potable pour une gestion durable des ressources en eau en Algérie-colloque international « terre & eau 2008 » Annaba, les 17 – 19 novembre 2008.
- 25- Chebbah M. 2007. Lithostratigraphie, Sédimentologie et Modèles de Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d'autre de l'Accident Sud Atlasique (Zibans, Algérie). Thèse de Doctorat en Géologie. Université Mentouri – Constantine. 479P.
- 26- Chadha, D. (1999). A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data . Hydrogeol J 7(5): 431–439.
- 27- Chelli. L, DjouhrI .N,(2013), Analyses des eaux de réseau de la ville de Béjaia et évaluation de leur pouvoir entartrant Mémoire de magister, Université A. MIRA – bejaia – 7 p.
- 28- COSANDEY, CLAUDE et al. 2003 : Les eaux courantes : Géographie et environnement. Édition Belin, Paris, 239 p.
- 29- Dajoz R. 1971. Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 434 p.
- 30- DPSB, (Fin 2022), Monographie de la wilaya de Biskra, Direction de programmation et suivi budgétaire de la wilaya de Biskra
- 31- Degremont, (2005), «Mémento technique de l'eau », Deuxième édition Tom1.
- 32- Durand J.H., 1958 — Les sols irrigables. Étude pédologique. S.E.S. 193 p.
- 33- Dubost D.,2002 - Ecologie, Aménagement et Développement des Oasis Algériennes. Edition CSTR,243p.
- 34- Doneen LD (1964) "Water Quality for Agriculture". Department of Irrigation, University of California
- 35- Djellouli Y., 1990, Flores et climats en Algérie septentrionale. Déterminismes climatiques de la répartition des plantes. Thèse Doct. Sciences, USTHB., Alger, 210

- 36- Guergazi. S, Achour. S, (2005), Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration, Larhyss Journal, 4,119-127.
- 37- Guerzou. F,(2008),Etude de la potabilité des eaux souterraines de la région de Djelfa (Aspect physico-chimique). Mémoire de Fin d'Etude en Vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Biologie. P56.
- 38- Giacobbe A. 1961. Nouvelles recherches écologiques sur l'aridité dans les pays de la méditerranée occidentale. *Naturalia Monspoliensia. Série Botanique.* Montpellier .11 :7.
- 39- Gousskov H. 1964. Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000. Biskra. Service. Géologie de l'Algérie. Alger. 13P.
- 40- Gouaidia L., (2008) : Influence de la lithologie et conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est algérien. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba: 199 p
- 41- Geological Survey. Water-Supply. Paper 2254, 263p ; Weinheim.
- 42- Gugulothu et al., (2022) Understanding the factors contributing to groundwater salinity in the coastal region of Andhra Pradesh, India
- 43- Halitim A., 1989-Sols des régions arides d'Algérie. Éd. O.P.U. Alger, 384p.
- 44- Halilet M. T., 1998- Étude expérimentale de sable additionnée d'argile. Comportement physique et organisation saline et sodique. Thèse Doctorat. I.N.A.P.G., Paris, 250 p.
- 45- Harrat et Achour, (2010), pollution physico-chimique des eaux de barrage de la région d'el tarf. Impact sur la chloration, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 47-54
- 46- Hem J D (1985). Study and interpretation of the chemical characteristic of natural water. US
- 47- Houillier. P, Blanchard. Aet Pailard .M, (2004), Métabolisme du potassium, Elsevier SAS.1 : 138-157.
- 48- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>.
- 49- Jean-Louis Ballais, (2010) “Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara algérien”, *Physio-Géo*, Volume 4 | -1, 107-127.
- 50- JORA,(2014), journal officiel de la république algérienne.
- 51- Khoda panah et al., (2009), Groundwater Quality Assessment for Different Purposes in Eshtehard District, Tehran, Iran
- 52- Kara.K (2020), Pollution de l'environnement chapitre 03, Université de Constantine.
- 53- Kelly, 1940; Paliwal & Singh, (1967), Quality of irrigation waters and their effect on soil Properties in Rajasthan a review.
- 54- Kawagoshi et al., (2016), Nitrogen removal properties in a continuous marine anammox bacteria reactor under rapid and extensive salinity changes

- 55- L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, CapNet, RAOB, et IGRAC
- 56- Manahan, S. E, (2005), Origines et quantités en eaux souterraines sur la Terre. Récupéré sur lenntech: <https://www.lenntech.fr/eaux-souterraines/origine.htm>.
- 57- Marquita K. Hill., 2004. Understanding Environmental Pollution, Cambridge
- 58- Myrand.D, (2008), Guide technique captage d'eau souterraine pour des résidences isolées- Bibliothèque et Archives nationales du Québec
- 59- Mediouni,K 1997, organisation et potentialités de la diversité biologique Algérienne
- 60- MORALES, F. J., ROMERO, C., & JIMÉNEZ-PÉREZ, S., 1996 : Fluorescence associated with Maillard reaction in milk and milk-resembling systems. Food Chemistry, 57(3), 423-428.
- 61- Nagaraju et al., (2014), Assessment of groundwater quality for irrigation: a case study from Bandalamottu lead mining area, Guntur District, Andhra Pradesh, South India
- 62- N. Adimalla and H. Qian (2019). Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India. Ecotoxicol. Environ. Saf., vol. 176, pp. 153–161.
- 63- N. Subba Rao et al., (2012). Geochemistry and quality of groundwater of Gummanampa du sub-basin, Guntur District, Andhra Pradesh, India,” Environ. Earth Sci., vol. 67, pp. 1451–1471.
- 64- OMS (2017), Directives de qualité pour l'eau de boisson: 4e éd. intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4th ed. incorporating first addendum] ISBN 978-92-4-254995-9
- 65- OMS (2011), Directives de qualité pour l'eau de boisson.
- 66- ONM, (2019), Climatologique de la station de Biskra, Service archive.
- 67- ONU, (2006). Eau, Assainissement et développement durable. Les enjeux dans les villes des pays en développement. 160 p.
- 68- Piper AM (1944) Graphical interpretation of water analysis, Transactions of the American Geophysical Union. 1944, 25: pp 914 -923
- 69- Q. Yang, Z. Li, H. Ma, L. Wang, and J. D. Martín. (2016). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic integrated geochemical methods in the Southeastern part of Ordos basin, China. Environ. Pollut., vol. 218, pp. 879–888, doi : <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.017>
- 70- Québec, P. C. (2003, juin), Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine. Récupéré sur Centre d'expertise et de référence en santé publique : <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/turbidite>.
- 71- Richards,L. A., (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric.Handbook 60, USDA, Washington D.C. 160 P.
- 72- Rodier, (2009), L'analyse de l'eau, 9ème Ed. Dunod., Paris, France.

- 73- Saleh, A., Al-Ruwaih, F. and Shehata, M. (1999) Hydrogeochemical Processes Operating within the Main Aquifers of Kuwait. *Journal of Arid Environments*, 42, 195-209. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0511>
- 74- Salifu, M., Aidoo, F., Hayford, M.S. et al. Evaluating the suitability of groundwater for irrigational purposes in some selected districts of the Upper West region of Ghana. *Appl Water Sci* 7, 653–662 (2017). <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0277-z>
- 75- Savary, (2010), Guide des analyses de la qualité de l'eau, Ed. Territorial Voiron, France.
- 76- SCI, 2006 : Environnement Canada. SCI. En ligne. <www.ec.gc.ca>. Consulté en 2006
- 77- Stewart P. 1968. Quotient pluvio-thermique et dégradation biosphérique
- 78- Stanley E .Manahan., 2005 Environmental Chemistry Eighth edition.
- 79- Tardath .Het J.P. Beaudry, (1984), « chimie des eaux, les griffons d'argile ».
- 80- Todd, D.K. (2001) Groundwater Hydrology. Wiley, 280-281.
- 81- Verhille .S, (2013), Les indicateurs microbiens dans l'évaluation de l'eau potable : interpréter les résultats de laboratoire et comprendre leur signification pour la santé publique. Centre de collaboration nationale en santé environnementale.
- 82- Walton, W.C. (1970) Groundwater Resource Evaluation. McGraw Hill Book Co., New York, 664 p.
- 83- Wilcox L V (1955). Classification and use of irrigation waters, vol 969. U.S. Department of Agriculture Circular, Washington, DC, 19 p.
- 84- WEYER, P. J., CERHAN, J. R., KROSS, B. C., HALLBERG, G. R., KANTAMNENI, J., BREUER, G., ... & LYNCH, C. F., 2001: Municipal drinking water nitrate level and cancer risk in older women: the Iowa Women's Health Study. *Epidemiology*, 12(3), 327-338.
- 85- Zakir et al., (2020). Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh
- **Site internet consulté :**
- 1- (<https://fr.oceancampus.eu/cours/7Mc/la-pollution-de-leau>)
- **Logiciels utilisés :**
- 1- EXCEL 2019
 - 2- DIAGRAMME : Version 8.44 (Roland SIMLER Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)
 - 3- XLSTAT 2019
 - 4- MAP
- **Cartes utilisées :**
- 1- Situation géographique de la commune de Lioua (Athamena, A. 2022)
 - 2- Carte pédologique de la région de Biskra (Durant, 1958).
 - 3- Carte du piémont de l'atlas saharien (Jean-Louis, B 2010)
 - 4- Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).

Références Bibliographiques

- 5- Extrait de la carte Géologique-Map de Lioua 1/200 000.
- 6- Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).
- 7- Log litho-stratigraphique synthétique de la région de Biskra (CHEBBAH, 2007)
- 8- Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011).
- 9- Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).
- 10- Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)
- 11- Coupe Hydrogéologique schématique de la région de Lioua (Ahcène, S. 2021)