



Université Mohamed khider –Biskra
Faculté d'Architecture, de l'Urbanisme,
De Génie Civil et de l'Hydraulique
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies Filière :
Hydraulique
Spécialité : **Hydraulique urbaine**

Réf :

Présenté et soutenu par :
HADJAMAR Hadil Manel

03 Juin 2025

Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines à l'aide de l'indice de qualité de l'eau (IQE). Cas de la région d'EL GHROUS, Biskra

Jury :

Mm. GUERGEZI Sadia	Pr	Université de Biskra	Président
Mm. SGHAIRI Nora	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dr. MESMOUDI Toufik	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

À mon professeur qui n'a pas été seulement le superviseur de ce mémoire, mais mon guide sur un chemin illuminé par la patience, le savoir et la noblesse... À vous, mon professeur estimé Dr. Masmoudi Toufik, Je vous exprime toute ma gratitude pour le temps que vous m'avez accordé avec tant de générosité, et pour votre patience qui a été un véritable radeau dans les moments de doute et de fatigue.

Derrière chaque remarque que vous avez formulée, se cachait une intention bienveillante, et derrière chaque correction suggérée, un souci sincère de me pousser vers le meilleur. Merci à vous, du fond du cœur.

À mon institutrice de l'école primaire, Madame Warda Bekhouche, qui a éveillé en moi la graine du rêve et tendu la première main vers la lumière du savoir.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble de mes enseignants, en particulier à Messameh Ahmed, Rezeg Assia, Seghairi

Nora, Ouamane Ahmed, Masmoudi Rachid, Labadi Abdellah, Abed Mourad, Mimeche Lelia, Abdessemes Fouzi, Zine Ali, Zouita Nadjoua, Ounoko Samira, Guergazi Saadia et Youcef Leila, dont chacun a su, à sa manière, éclairer mon parcours universitaire.

Merci d'avoir été des repères précieux et des sources d'inspiration tout au long de ce chemin exigeant,

ainsi qu'à tous ceux dont les noms ne sont pas cités ici, mais dont l'empreinte reste gravée dans mon cœur.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à la femme qui ne se répète pas deux fois dans le
temps... ma chère mère.*

Et à mon père, paix à toi, même si tu n'étais pas prophète...

*Avancer sur ce chemin pendant cinq années n'a pas été chose facile ; sans vous
deux, je me serais arrêtée depuis longtemps.*

*Vous avez été les premiers à croire en moi, alors que je pensais que cette
spécialité ne me ressemblait pas, et je croyais qu'elle ne me ressemblait pas...
pourtant, elle s'est révélée être un bien que je n'ai compris que tardivement.*

À mon âme sœur, ma sœur Chiraz,

Et à la lumière de mon âme, mon petit frère Abdallah,

Vous avez incarné l'amour non conditionnel, et l'étreinte indicible.

*Vous avez été ma force dans la faiblesse, mon appui dans les moments de recul,
et l'élan qui m'a remise debout.*

Enfin, je dédie ce travail à ma grand-mère, mes oncles maternels et ma tante

Aïcha,

qui ont toujours été un dos qui ne se brise pas,

cette aide discrète et silencieuse, d'une valeur inestimable.

Sommaire

<i>Résumé</i>	8
ملخص.....	8
<i>Abstract</i>	9
<i>Liste des tableaux</i>	10
<i>Liste des figures</i>	12
<i>Liste des abréviations</i>	14
<i>Introduction Générale</i>	15
Partie A : Littérature et revue bibliographique	16
Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution	17
I.1 Introduction	18
I.2 Caractéristiques des eaux souterraines :	18
I.2.1 Définition des eaux souterraines	18
I.2.2 Importance des eaux souterraines	19
I.3 Norme de qualité d'eau:	19
A- L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) :	19
B- Norme Algérienne (JORA 2014) :	20
I.4 Principaux paramètres de potabilité	21
I.4.1 Paramètres organoleptiques (physique)	21
I.4. 2 Paramètres bactériologiques	21
I.4.3 Paramètres physicochimiques	22
I.5 Pollution des eaux	25
I.5.1 Sources de pollution	25
I.5.2 Les principaux polluants des eaux	28
I.6 Conclusion	30
II.1. Introduction	31
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	31
II. 2. Situation géographique de la région de El Ghrous	32
II.3 Répartition de l'habitat	33

II.4 Activité d'agriculture	35
II.5 Types de Sol de la région d'étude	36
II.6 Relief	36
II.7 Hydrologie de la région	37
II.7.1 Climat	38
II.7.2 Le climat suivant les nouvelles données climatiques	43
II.8. Géologie de la zone d'étude	46
II.9 Cadre géologique générale	46
II.10. Identification des formations hydrogéologiques.	49
II.10.1 identification des différentes nappes	49
II.10.2 l'inventaire des points d'eau	51
II.10. 3 La piézométrie	52
II.11 Conclusion	53
Partie B : Etude expérimentale	54
Chapitre I : Matériels et méthodes	55
I.1 Introduction	56
I.2 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]	56
I.3 Méthodes de traitement des données	58
I.3.1 Traitement des données par Excel	58
I.3.2 Traitement des données par diagramme	58
• Le diagramme de Riverside	62
I.4 Aptitudes des eaux d'irrigation	64
I.4.1 Rapport d'adsorption du sodium (SAR)	64
I.4.2 La teneur en sodium (Na%)	65
I.4.3 L'indice de perméabilité (PI)	66
I.4.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)	66
II.5 Analyse Statistique Multivariée	66
II.5.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)	66
I.6 Conclusion	68
Chapitre II : Résultats et interprétations	69
I.1. Introduction	70
II.2. Paramètres physico-chimiques	70
II.2.1. Bilan Ionique	71
II.3 Paramètres physiques	73
II.3.1 La température	73
II.3.2 Potentiel d'hydrogène (pH)	74

II.3.3 Minéralisation (Conductivité électrique CE)	75
II.4 Les paramètres chimiques	76
II.4.2 Les Cations Majeurs	76
II.4.3 Les Anions Majeurs	81
II.4.4 Analyse statistique des paramètres physico-chimique	85
II.5 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]	86
II.6 Classification hydro-chimique des eaux souterraines	88
II.6.1 Traitement des données par Diagramme	88
II.7 Les aptitudes des eaux d'irrigation	94
II.7.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)	94
II.7.2 La teneur en sodium (Na%)	97
II.7.3 L'indice de perméabilité (PI)	98
II.7.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)	100
II.8 Analyse en composantes principales (ACP)	102
II.9 Conclusion	106
Conclusion Générale	107
Conclusion générale	108
Références Bibliographies	110

Résumé

Cette étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines dans la région d'El Ghrous, en mettant l'accent sur leur aptitude à la consommation humaine et à l'irrigation. Des échantillons ont été collectés à partir de 29 forages dans la région, dont 5 ont été exclus en raison d'un déséquilibre ionique important. Les résultats ont montré une forte minéralisation des eaux, dominée par les ions chlorure, sulfate, calcium et magnésium. Les cartes chimiques ont montré que les eaux ont été classées principalement en tant que chlorure de sodium et sulfate calcique magnésien, reflétant l'influence de la géologie locale et des interactions des eaux avec les roches salines. Selon le diagramme de Riverside, les eaux destinées à l'irrigation ont été classées dans les catégories C3S1 et C4S1, ce qui indique une qualité d'eau moyenne à mauvaise. Par conséquent, leur utilisation pour l'irrigation nécessite des mesures correctives telles que le lavage périodique et l'ajout de gypse pour améliorer les propriétés du sol, en particulier dans les sols lourds ou peu perméables. D'autres indices ont montré deux axes principaux expliquant 61,3 % de la variance : le premier est lié à la minéralisation générale (ACP) et reflète la distribution entre les eaux riches en sulfates et celles riches en bicarbonates, tandis que le deuxième axe est associé aux processus de dissolution du gypse et aux effets des activités humaines telles que l'utilisation des engrais et des eaux usées.

Dans ce contexte, l'évaluation continue de la qualité de l'eau est essentielle pour améliorer sa qualité et éliminer les problèmes de santé liés aux eaux non traitées.

Mots-clés : Ghrous, Minéralisation, eaux souterraines, Irrigation, Activités anthropiques.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة المياه الجوفية في منطقة الغروس، مع التركيز على صلاحيتها للاستهلاك البشري والري. تم جمع عينات من 29 بئرًا في المنطقة، وتم استبعاد 5 آبار بسبب اختلالات أيونية كبيرة. أظهرت النتائج وجود تمعدن مرتفع في المياه، مع هيمنة لأيونات الكلوريد والكبريتات والكالسيوم والمغنيسيوم. أظهرت الخرائط الكيميائية أن المياه تم تصنيفها بشكل أساسي إلى كلوريد صوديومي و كبريتات كالسيومية مغنيسية، مما يعكس تأثير الجيولوجيا المحلية وتفاعلات المياه مع الصخور الملحية.

C3S1 و C4S1: تم تصنيف المياه الخاصة بالري وفقًا لرسم ريفرسايد في الفئات مما يشير إلى نوعية مياه متوسطة إلى سيئة، وبالتالي فإن استخدامها للري يتطلب اتخاذ تدابير تصحيحية مثل الغسيل الدوري وإضافة الجبس لتحسين خصائص التربة، خاصة في الأراضي الثقيلة أو منخفضة النفاذية.

كما أظهرت المؤشرات الأخرى الرئيسية وجود محورين رئيسيين يفسران 61.3% من التباين: الأول يرتبط بالتمعدن العام (ACP) وأظهرت نتائج تحليل المكونات ، ويعكس التوزيع بين المياه الغنية بالكبريتات والمياه الغنية بالبيكربونات، بينما يرتبط المحور الثاني بعمليات الحل المائي للجبس وتأثيرات الأنشطة البشرية مثل استخدام الأسمدة والمياه المستعملة. في هذا السياق، إن التقييم المستمر لجودة المياه أمر ضروري لتحسين نوعيتها والتخلص من المشاكل الصحية الناتجة عن المياه غير المعالجة.

الكلمات المفتاحية : الغروس ،مياه جوفية ، التمدن، الري، الأنشطة البشرية.

Abstract

This study aims to assess the quality of groundwater in the El Ghrous area, focusing on its suitability for human consumption and irrigation. Samples were collected from 29 wells in the area Ghrous, and 5 wells were excluded due to significant ionic imbalances. The results showed high mineralization of the water, with dominance of chloride, sulfate, calcium, and magnesium ions. The chemical maps indicated that the water was primarily classified as sodium chloride and calcium magnesium sulfate, reflecting the influence of local geology and water interactions with salt rocks. For irrigation, the water was classified into C4S1 and C3S1 categories according to the Riverside diagram, indicating moderate to poor water quality. Consequently, its use for irrigation requires corrective measures such as periodic leaching and gypsum application to improve soil properties, especially in heavy or low-permeability soils. Additionally, other indicators showed the presence of two principal components explaining 61.3% of the variance in the water quality: the first related to general mineralization, reflecting the distribution between sulfate-rich and bicarbonate-rich waters, while the second axis was linked to gypsum dissolution processes and the effects of anthropogenic activities such as the use of fertilizers and wastewater. In this context, continuous water quality assessment is essential for improving its quality and addressing the health issues caused by untreated water.

Key words : Ghrous, Mineralization, groundwater, Irrigation, Human activities

Liste des tableaux

Tableau N°01: Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau Potable OMS (2006) et JORA (2014).....	1
Tableau N°02: Indicateurs microbiens courants et causes possibles de leur présence dans l'eau potable (Verhille, 2013).	1
Tableau N°03: Classification des eaux selon la dureté totale (Berne et al. 1991).....	1
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.....	1
Tableau N°05: Répartition de l'habitat (DPSB 31/12/2015).....	1
Tableau N°06: Répartition de l'habitat selon la zone D'identification (DPSB 31/12/2015).....	1
Tableau N°07: Répartition de l'habitat selon le genre (DPSB 31/12/2015).....	1
Tableau N°08: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019.....	1
Tableau N°09: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019) Source Station météorologique de Biskra 2019.....	1
Tableau N°10: 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.....	1
Tableau N°11 : Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019).....	1
Tableau N°12: Evaporation moyennes mensuelle pour la période de (2008– 2018).	1
Tableau N°13: vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019.....	1
Tableau N°14 : vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019).....	1
Tableau N°15: Températures et précipitations en (mm) Moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019).....	1
Tableau N°16: Valeurs d'indice de Climagramme d'Emberger, station de Biskra (2008, 2018). ..	1
Tableau N°17: Poids relatif des paramètres physico-chimiques.	1
Tableau N°18: Classification de l'IQE, statut, et utilisation possible de l'échantillon d'eau (Balamurugan 2020).	1

Tableau N°19: Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R (Méthode de Richards).....	1
Tableau N°20: Paramètres physico-chimiques de l'eau de 29 forages-ANRH.....	1
Tableau N°21: Balance Ionique de l'eau de 29 forages-ANRH.....	1
Tableau N°22: Forages exclus pour déséquilibre ionique significatif ($\Delta E > 5\%$).....	1
Tableau N°23: Statistique de la température de 24 forages.....	1
Tableau N°24: Statistique du pH de 24 forages.....	1
Tableau N°25: Statistique de la CE de 24 forages.....	1
Tableau N°26: Statistique de Calcium de 24 forages.....	1
Tableau N°27: Statistique de Magnésium de 24 forages.....	1
Tableau N°28: Statistique de Sodium de 24 forages.....	1
Tableau N°29: Statistique de Potassium de 24 forages.....	1
Tableau N°30: Statistique de Bicarbonate de 24 forages.....	1
Tableau N°31: Statistique de Sulfate de 24 forages.....	1
Tableau N°32: Statistique de Chlorure de 24 forages.....	1
Tableau N°33: Statistique de Nitrate de 24 forages.....	1
Tableau N°34: Résultats de matrice de corrélation.....	1
Tableau A -N° 35: Valeurs de WQI de 24 forages.....	1
Tableau B -N°36: Récapitulative de résultats de WQI.....	1
Tableau N°37: Les classes issues du diagramme de RIVERSIDE (CLEMANT et GALAND, 1979).....	1
Tableau N°38: Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE.....	1
Tableau N°39 : Résultats des SAR de 24 forages.....	1
Tableau N°40: Résultats des Na% de 24 forages.....	1
Tableau 41: Résultats des PI de 24 forages.....	1
Tableau N°42 : Résultats des MHR de 24 forages.....	1
Tableau N°43: Variance totale expliquée.....	1
Tableau N°44: Contributions des variables.....	1

Liste des figures

Figure N°01: Présentation des eaux souterraines Evasion FM. (2023).	19
Figure N°02: Principaux mécanismes de transport des contaminants Vers l'eau souterraine (ALCOR Diagnostics, Note sur la pollution des nappes phréatiques, 2025).	26
Figure N°03: Carte sur la situation géographique d'El Ghrous	33
Figure N°04: Nombre de la population par rapport à la zone d'identification	34
Figure N°05: Répartition l'habitat selon le genre	35
Figure N°06: Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).	38
Figure N°07: précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)	39
Figure N°08: La précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019) ...	39
Figure N°09: Variabilités thermique de la région de Biskra durant la période (2008-2018).	41
Figure N°10: Evaporation mensuelle pour la période de (2008– 2018).	41
Figure N°11: Courbe de la vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018).	42
Figure N°12: La vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019).	43
Figure N°13: le Diagramme Ombrothermique (Juin 2018-Mai 2019)	45
Figure N°14: Localisation de la région de Biskra sur le Climagramme d'Emberger.	46
Figure N°15: position géographique de la commune d'El Ghrous. (Google Maps, 2018).	46
Figure N°16: Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).	48
Figure N°17: Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011).	51
Figure N°18: Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).	52
Figure N°19: Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)	52
Figure N°20: Interface de commande du logiciel Diagramme	59
Figure N°21: Représentation des faciès chimiques des eaux avec Diagramme de Piper.	60
Figure N°22: Diagramme de Schoeller Berkloff.	61
Figure N°23: Diagramme de Chadha	61
Figure N°24 : Diagramme de Richards (Riverside).	63
Figure N°25 : Diagramme de Wilcox.	64
Figure N°26: Variation du déséquilibre ionique (ΔE) dans les 29 forages.	72
Figure N°27: Histogramme de la température de 24 forages.	73
Figure N°28: Histogramme du pH de 24 forages.	75
Figure N°29: Histogramme de la conductivité électrique de 24 forages.	76
Figure N°30: Histogramme de Calcium de 24 forages.	77

Figure N°31: Histogramme de Magnésium de 24 forages.	78
Figure N°32: Histogramme de Sodium de 24 forages.	79
Figure N°33: Histogramme de Potassium de 24 forages.	80
Figure N°34: Histogramme de Bicarbonate de 24 forages.	81
Figure N°35: Histogramme de Sulfate de 24 forages.	82
Figure N°36: Histogramme de Chlorure de 24 forages.	83
Figure N°37: Histogramme de Nitrate de 24 forages.	84
Figure N°38: Histogramme de WQI de 24 forages.	88
Figure N°39: Interface de logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A) version 8.44.	89
Figure N°40: Diagramme de Piper pour 24 forages de EL Ghrous.	90
Figure N°41: Diagramme de Schoeller et Berkloff pour 24 forages d'El Ghrous.	91
Figure N°42 : Diagramme de Riverside pour les 24 forages d'El Ghrous.	92
Figure N°43: Diagramme de Wilcox pour 24 forages de EL Ghrous	94
Figure N°44: Histogramme de SAR pour 24 forages.	96
Figure N°45: Histogramme des Na% de 24 forages.	98
Figure N°46: Histogramme des PI de 24 forages.	100
Figure 47: Histogramme des MHR de 24 forages.	102
Figure N°48: Projection des variables sur le premier plan factoriel.	104

Liste des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne.

APC : Assemblée Populaire Communale.

APFA : Accession à la Propriété Foncière Agricole.

CI : Consommation Intermédiaire.

DSA : Direction des Services Agricole.

GCA : Générales des Concessions Agricoles.

ITDAS : Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne.

MADRP : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et de la Pêche.

MB : Marge Brute.

MN : Marge Nette.

ONM : Office Nationale de Météorologie.

PRM : Périmètre.

PB : Produit Brute.

PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme.

PNDAR : Plan National du Développement Agricole et Rural.

PRR : Programme de Renouveau Rural.

RGPH : Recensement Générale de la Population et de l'Habitat.

SAT : Superficie Agricole Totale.

SAU : Superficie Agricole utile.

SSP : Sous Système de Production.

HHR : Human Health Risk

Introduction Générale

L'eau souterraine constitue une ressource vitale et stratégique pour les régions arides et semi-arides comme l'Algérie. Bien que l'attention soit souvent portée sur les eaux de surface, il est important de rappeler que près de 97 % de l'eau douce exploitable provient des nappes souterraines (ANRH, 2010 ; OMS, 2011). Ces eaux invisibles jouent un rôle central dans l'alimentation domestique, le développement agricole et la préservation des écosystèmes (FAO, 2012).

En Algérie, notamment dans les zones sahariennes telles que la wilaya de Biskra, les besoins hydriques sont essentiellement couverts par les eaux souterraines en raison de la faiblesse des précipitations, de la variabilité climatique et de la croissance rapide des besoins liés à l'urbanisation et à l'agriculture (Benblidia, 2005). La commune d'El Ghrous illustre bien cette dynamique, où l'agriculture, principale activité économique, repose sur l'irrigation à partir des nappes profondes.

Cependant, l'exploitation intensive de cette ressource engendre plusieurs problématiques, notamment la dégradation de la qualité chimique de l'eau, l'augmentation de la salinité, et les risques liés à sa potabilité et à son usage agricole. La présence d'ions tels que le chlorure, le sulfate, le calcium et le magnésium, ainsi que les effets des pratiques anthropiques (usage excessif d'engrais, rejet d'eaux usées), sont des facteurs clés à surveiller (JORA, 2014 ; Droubi et al., 2008).

Dans ce contexte, notre travail de recherche vise à évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région d'El Ghrous, à partir de 29 forages (dont 24 analysés), afin de déterminer leur classification hydrochimique et leur aptitude à la consommation humaine et à l'irrigation. Pour cela, des outils analytiques comme les diagrammes de Riverside (Wilcox, 1955), l'analyse en composantes principales (ACP) et les cartes thématiques ont été mobilisés. Le travail est structuré comme suit :

➤ **Partie A : Étude bibliographique**

- Chapitre I : Problématique de la qualité des eaux souterraines et formes de pollution.
- Chapitre II : Description de la zone d'étude (El Ghrous – Wilaya de Biskra).

➤ **Partie B : Étude expérimentale**

- Chapitre I : Présentation des matériaux et méthodes.
- Chapitre II : Analyse et interprétation des résultats obtenus.

Partie A : Littérature et revue bibliographique

Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution

I.1 Introduction

Dans des conditions naturelles, les eaux souterraines sont généralement potables et ne nécessitent que peu de traitement avant leur utilisation, grâce au rôle filtrant des sols et des roches de la zone non saturée qui protègent efficacement la nappe phréatique contre les contaminants de surface (OMS, 2017). Toutefois, cette protection naturelle peut être compromise par les infiltrations massives de polluants issues des pratiques agricoles modernes (comme l'usage excessif d'engrais et de pesticides), des rejets industriels, ainsi que par l'absence ou l'insuffisance d'infrastructures sanitaires adéquates (UNESCO, 2010). Une fois contaminées, les eaux souterraines sont très difficiles et coûteuses à dépolluer, et les effets de cette pollution peuvent mettre longtemps à se manifester, rendant la détection et l'intervention tardives (OMS, 2017). Cela souligne l'importance cruciale d'une gestion rigoureuse des aquifères et de la mise en place de mesures préventives visant à limiter les risques de pollution.

I.2 Caractéristiques des eaux souterraines :

I.2.1 Définition des eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent une ressource précieuse et essentielle pour l'approvisionnement en eau potable de l'humanité. Elles sont stockées dans des aquifères, formations géologiques constituées de roches poreuses ou fissurées, permettant l'accumulation de l'eau sous forme de nappes (Guergazi et Achour, 2005). Généralement, ces eaux se distinguent par une faible turbidité et une contamination bactérienne réduite grâce à la filtration naturelle du sol, ce qui les rend plus protégées que les eaux de surface. Toutefois, elles présentent souvent une dureté élevée en raison du contact prolongé avec les formations rocheuses des aquifères (Chelli et Djouhri, 2013). L'origine principale des eaux souterraines est constituée des précipitations (pluie ou neige), qui s'infiltrent dans le sol lorsque l'eau n'est pas perdue par évaporation, transpiration ou ruissellement. Sur un sol sec, cette infiltration est limitée, l'eau étant retenue sous forme de film à la surface ou dans les micropores des particules du sol (Manahan, 2005).

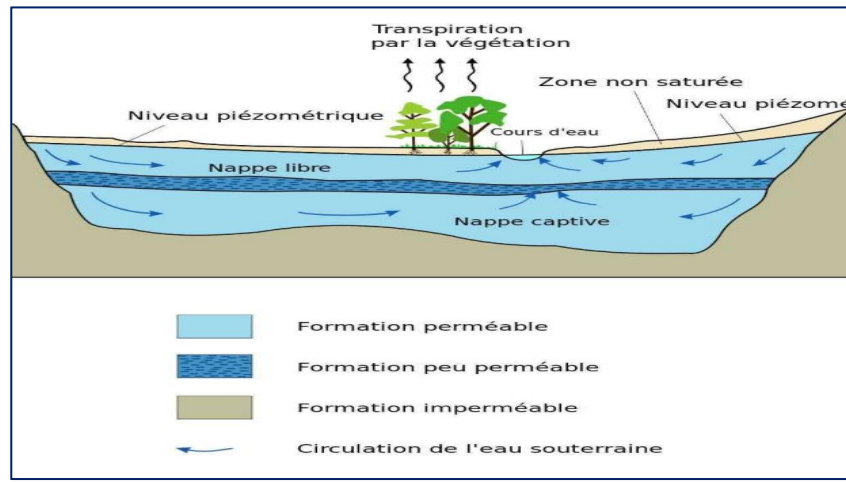


Figure N°01: Présentation des eaux souterraines Evasion FM. (2023).

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 hydro systèmes 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	750	1000
l'ion hydrogène	PH	6,5 - 9,5	6,5 - 10
Dureté	mg/l de CaCO4	800	1100
Conductivité A 20°C	µS/cm	pas de norme	2800
Ammonium	mg/l	Pas de contraintes	0,5
Potassium	mg/l	-226	-464
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	300	200
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

Les eaux naturelles, notamment les eaux de surface, sont souvent propices au développement de micro-organismes tels que les bactéries, virus et parasites, dont certains sont pathogènes. Leur présence dans l'eau potable peut résulter d'une pollution de la ressource, d'un captage mal protégé, d'un traitement inadéquat ou encore de fuites dans le réseau de distribution. Cette contamination microbiologique représente un risque pour la santé humaine, en particulier pour les groupes vulnérables comme les enfants, les personnes âgées ou immunodéprimées, comme le montre le tableau N°02.

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	Contamination fécale récente, présence possible d'organismes pathogènes.	Aucune UFC détectable dans 100 ml.
Coliformes fécaux	Traitement et désinfection inadéquats, recolonisation bactérienne ou infiltration dans le réseau de distribution	Aucune UFC détectable dans 100 ml d'eau traitée.

Coliformes totaux	Leur présence à la sortie de la station de traitement révèle une défaillance grave du système. Dans le réseau de distribution, elle indique une vulnérabilité à la contamination ou une recolonisation bactérienne, sans lien nécessaire avec une contamination fécale.	. 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)	La présence de NBH dans l'eau traitée peut révéler un dysfonctionnement du traitement ou une altération de la qualité de la source. Dans le réseau de distribution, elle peut signaler une recolonisation bactérienne.	. 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 (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 électrique de l'eau potable, exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflète sa teneur en sels minéraux dissous et permet ainsi d'évaluer son degré de minéralisation, puisque la majorité des substances dissoutes sont sous forme d'ions chargés électriquement (Tardat & Beaudry, 1984).

Selon la classification proposée par Rodier (2009), une conductivité très faible (0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$) correspond à une eau déminéralisée, tandis qu'une conductivité comprise entre 10 et 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ caractérise l'eau de pluie. Une conductivité de 80 à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indique une eau peu minéralisée, entre 300 et 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ une eau moyennement minéralisée, entre 1000 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ une eau saline, et au-delà de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, il s'agit d'eau de mer. (Tardat & Beaudry, 1984 ; Rodier, 2009).

I.4. 3. 4. La 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° 03.

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

TH en degrés français (°f)	Spécificité de l'eau
0 à 6	Eau très douce
6 à 15	Eau douce
15 à 30	Eau moyennement dure
30 à 45	Eau dure
> 45	Eau très dure

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 9,0 (JORA, 2014). Il diminue en présence de la matière organique et augmente 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/cm^3 . 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

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines nécessite de distinguer les contaminations naturelles de celles d'origine humaine. Bien que naturellement potable dans la majorité des cas, l'eau souterraine peut contenir des éléments nocifs comme l'arsenic, observé par exemple au Bangladesh. La salinisation, souvent d'origine naturelle, peut être aggravée par l'activité humaine. En Afrique, les principales menaces sont : la pollution urbaine (latrines, rejets industriels), la surexploitation à des fins agricoles provoquant la salinisation, et l'intrusion d'eau salée liée à l'abaissement du niveau des nappes, surtout en zones côtières (GW-MATE, Note 8, 2002–2006).

I.5.1 Sources de pollution

À l'échelle mondiale, les aquifères sont de plus en plus menacés par la pollution due à l'urbanisation, l'agriculture intensive, l'industrialisation et les activités minières. Les effets des polluants persistants apparaissent souvent après des années, rendant la détection tardive et les mesures de dépollution complexes, coûteuses et parfois inefficaces. La prévention reste donc la solution la plus efficace, notamment par l'intégration de la protection des eaux souterraines dans les politiques d'aménagement. La pollution survient lorsque la capacité naturelle du sol à atténuer les contaminants est dépassée. Certains sols offrent une protection grâce à la sorption ou aux processus biochimiques, mais les nappes peu profondes restent particulièrement vulnérables.

Les sources de pollution sont multiples et incluent les activités agricoles, domestiques, industrielles, médicales et le stockage de carburants, sous forme ponctuelle ou diffuse (Figure N°02 ; Tableau N°03).

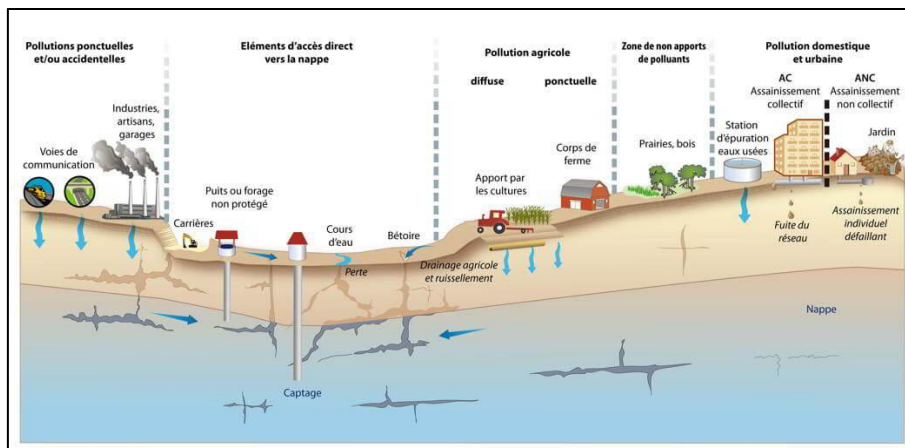


Figure N°02: Principaux mécanismes de transport des contaminants Vers l’eau souterraine (ALCOR Diagnostics, Note sur la pollution des nappes phréatiques, 2025).

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	trichloréthylène, tétrachloréthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, métaux lourds, des phénols, cyanures
Travaux de Peinture	Alkylbenzene, 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
salinité (chlorure de sodium), les hydrocarbures aromatiques	Exploration / Extraction pétrolière et gazière
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 Océan Campus)

I.5.1.2. Origine industrielle

Les industries, notamment de fabrication et du secteur tertiaire, utilisent d'importantes quantités d'eau pour le refroidissement, le nettoyage ou le traitement. La pollution des nappes survient lorsque les eaux usées sont rejetées dans l'environnement, souvent sans traitement adéquat. Certaines entreprises, non raccordées aux égouts, utilisent les eaux souterraines peu profondes et rejettent leurs effluents dans des fosses ou puits secs, risquant ainsi de contaminer les ressources potables (Degrémont, 1991).

Certaines activités, comme les stations-service, les fabricants de composants électriques ou les laboratoires photo, génèrent des déchets riches en produits chimiques toxiques. Les sources de pollution incluent le nettoyage d'équipements sur sol nu, les rejets dans les fosses septiques, ou encore le stockage de substances dangereuses sans protection. Les réservoirs de produits chimiques ou pétroliers peuvent aussi fuir suite à la corrosion ou des défauts techniques. L'exploitation minière et pétrolière représente également une source de contamination des nappes (Degrémont, 1991).

I.5.1.3 La pollution agricole

Les eaux souterraines peuvent être contaminées par plusieurs sources agricoles telles que les pesticides, les engrais, les herbicides et les déchets animaux. Cette pollution résulte notamment des débordements lors de la manipulation des produits chimiques, du lavage des équipements d'application, ou encore de l'utilisation inadéquate de ces substances (Marquita, 2004). Le manque de drainage dans certaines zones agricoles pousse les agriculteurs à installer des systèmes comme les puits de drainage, qui deviennent des voies directes de transfert des polluants vers la nappe phréatique.

Par ailleurs, le stockage de produits chimiques à proximité de points d'eau souterraine (puits, fosses) ou dans des lieux non couverts et exposés aux intempéries représente un risque important de contamination (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.5.1.5. 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 menace 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, protozoaire 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, viral ou parasitaire. (K.KARA.2020)

I.5.2.2 Les polluants chimiques

La pollution chimique des eaux résulte de la libération de certaines substances minérales toxiques dans les cours d'eaux (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 variées dans l'eau qui lui confèrent un caractère trouble (KARA.K.2020).

I.6 Conclusion

Ce premier chapitre constitue une étape fondamentale de notre travail de recherche. Il a été consacré à la présentation des principales notions liées à la qualité des eaux souterraines. Nous y avons abordé, dans un premier temps, les caractéristiques générales des eaux souterraines, avant de présenter les normes de qualité de l'eau et les principaux paramètres permettant d'évaluer sa potabilité. Par la suite, une attention particulière a été accordée à la problématique de la pollution des eaux souterraines, à travers une définition rigoureuse et une explication de ses mécanismes et sources potentielles.

L'ensemble des éléments traités dans ce chapitre vise à fournir un socle théorique solide, indispensable à la bonne compréhension de la suite du mémoire. Ce cadre conceptuel permet d'identifier les paramètres essentiels, les indicateurs pertinents, ainsi que les substances à surveiller pour une évaluation correcte de la qualité des eaux souterraines.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Afin de donner une caricature à la commune de de la région de El Ghrous, 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 de la région de El Ghrous.

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 (IQE) et une analyse multivariée, et on a intérêt de décortiquer, si nous pouvons dire cet endroit pour donner des résultats

II. 2. Situation géographique de la région de El Ghrous

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 El Ghrous :

La commune de El Ghrous se situe dans la région de Ziban, à environ 50 kilomètres à l'ouest de Biskra et à 10 kilomètres de la commune de Tolga (figure 2), avec une latitude de 34.7052, une longitude de 5.28516 et une altitude de 142 m, et qui s'étale sur une superficie de 245,30 km² (DB City, 2023).

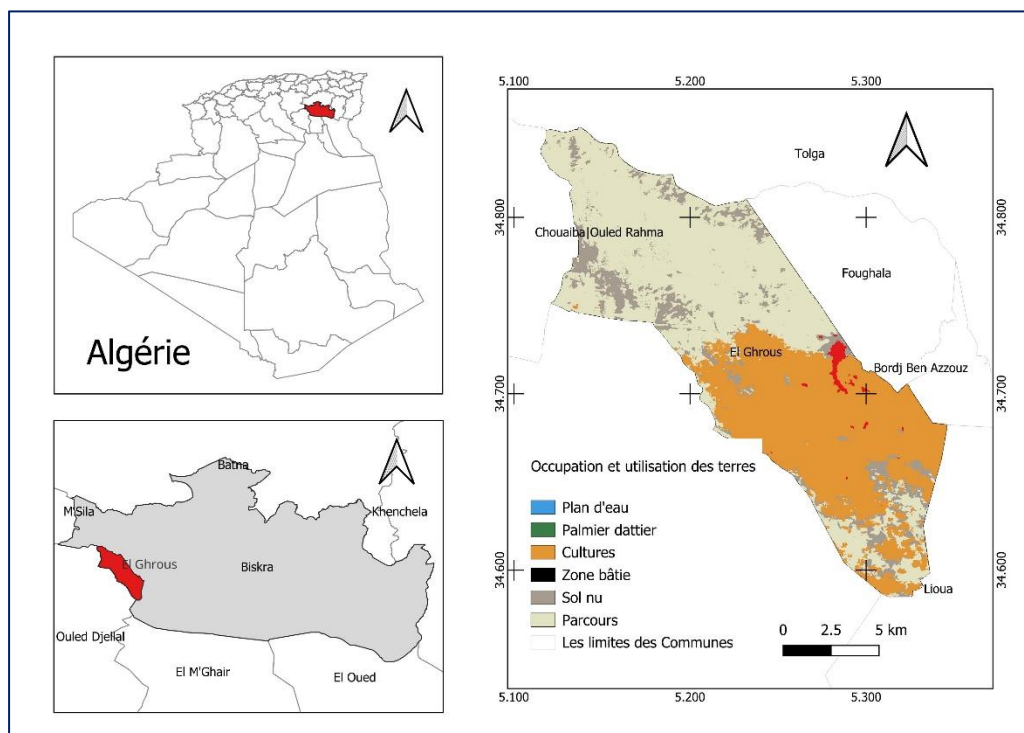


Figure N°03: Carte sur la situation géographique d'El Ghrous

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 El Ghrous 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 31 décembre 2015.

Tableau N°05: Répartition de l'habitat (DPSB 31/12/2015)

Commune	Nombre de population	Superficie Km ²	Densité C/Km ²
El Ghrous	19533	237.6	82

Tableau N°06: Répartition de l'habitat selon la zone D'identification (DPSB 31/12/2015)

Commune	Nombre de population par rapport à la zone d'identification				Total
	Groupelement centre-ville	Groupelement secondaires	Zone dispersés	Population nomade	
El Ghrous	11757	0	7776	0	19533

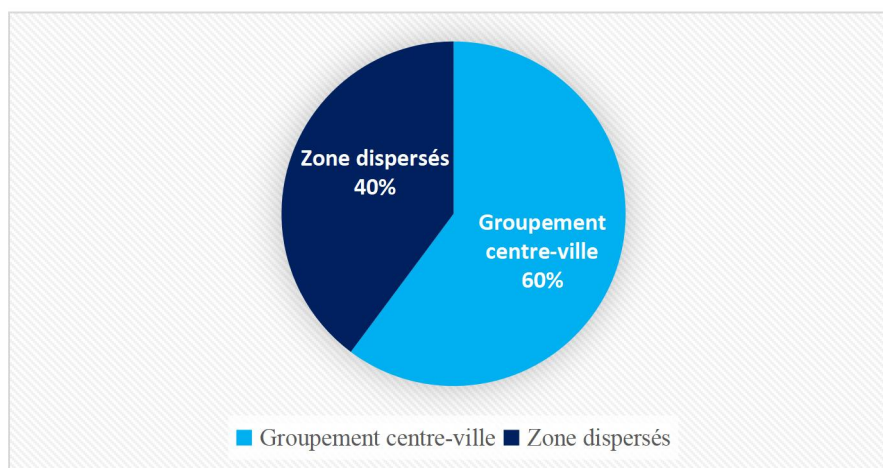
**Figure N°04:** Nombre de la population par rapport à la zone d'identification

Figure N°04 illustre la répartition de la population de la commune de El Ghrous selon deux principales zones d'identification géographique :

- Le groupelement centre-ville représente **60 %** de la population totale, ce qui reflète une concentration importante dans le centre urbain. Cela peut être lié à une meilleure disponibilité des infrastructures et des services publics (eau potable, électricité, établissements scolaires et sanitaires...).
- À l'opposé, la zone dispersée regroupe **40 %** de la population, ce qui traduit une présence significative de foyers dans des zones rurales ou éloignées. Cette configuration peut engendrer certaines difficultés en matière d'accès aux services de base, notamment en ce qui concerne l'approvisionnement en eau potable et l'assainissement.

Tableau N°07: Répartition de l'habitat selon le genre (DPSB 31/12/2015)

Commune	Répartition l'habitat selon le genre		Total
	Masculin	Féminin	
El Ghrous	9959	9574	19533

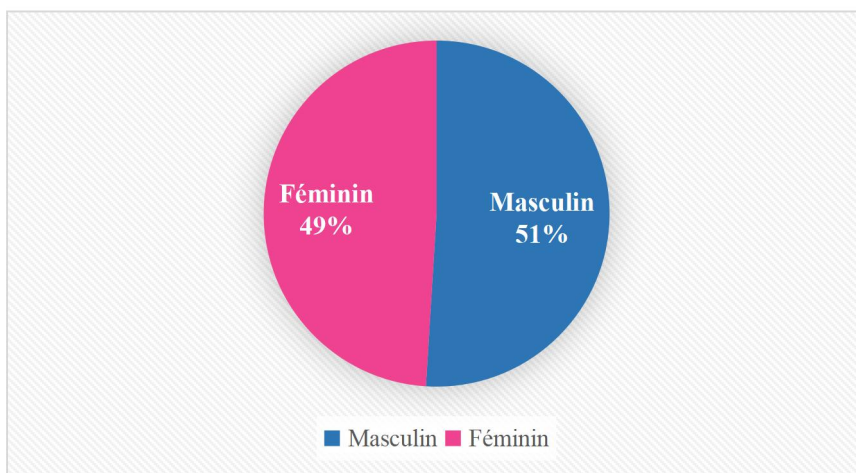


Figure N°05: Répartition l'habitat selon le genre

La figure N°05 illustre la répartition des habitants de la commune de El Ghrous selon le genre, à partir des données fournies par la Direction de la Planification et des Statistiques de la Wilaya (DPSB) en date du 31 décembre 2015.

- La population masculine représente **51 %** du total.
- La population féminine constitue **49 %**.

Cette répartition révèle un équilibre démographique quasi parfait entre les hommes et les femmes, avec une légère majorité masculine. Un tel équilibre est courant dans plusieurs communes algériennes et peut résulter de divers facteurs socio-économiques et culturels.

➤ 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 (82C/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 définit la région comme une zone rurale qui signifie 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

Ressource économique locale. La culture du palmier dattier, dont environ 70 % est constituée de la célèbre variété Deglet Nour, occupe une place centrale avec une renommée reconnue à l'échelle mondiale.

Le nombre de palmiers dépasse les quatre-vingt-dix mille, et la superficie réservée à cette culture connaît un développement important grâce au lancement répété des programmes de développement agricole de l'État (F.N.D.A, P.N.D.A.) ainsi qu'au soutien financier apporté par les banques (crédits, assurances agricoles...).

Les cultures maraîchères sous serres occupent également une place de choix dans le secteur agricole de la commune, en raison de leur forte rentabilité et de leur capacité à générer des revenus rapides, ce qui les rend de plus en plus attractives pour les agriculteurs locaux.

Malgré les efforts de l'État pour promouvoir ce secteur stratégique, notamment dans cette région saharienne, l'activité agricole à El Ghrous fait face à plusieurs difficultés qui freinent son évolution.

On peut identifier les problèmes suivants :

- Insuffisance de main-d'œuvre qualifiée.
- Problèmes de drainage des excès d'eau d'irrigation.
- Exploitation anarchique des nappes phréatiques non renouvelables
- Vétusté croissante des palmiers dattiers.
- Manque de raccordement à l'énergie électrique ou solaire, et absence de pistes agricoles adéquates.

II.5 Types de Sol de la région d'étude

Les sols de la commune d'El Ghrous présentent les caractéristiques typiques des milieux sahariens arides. Ils contiennent souvent des concentrations importantes de sels solubles, en raison de la faible pluviométrie et de l'évaporation intense, qui limitent le lessivage naturel des sels vers les couches profondes.

On distingue principalement trois types de sols dans cette région :

- Les sols peu évolués, à structure simple et à faible développement de l'horizon organique.
- Les sols calcimagnésiques, riches en carbonates de calcium et de magnésium, souvent de texture fine à moyenne.
- Les sols halomorphes, influencés par l'accumulation des sels, ce qui peut limiter la productivité agricole s'ils ne sont pas bien gérés.

La région d'El Ghrous, située dans la partie ouest des Ziban, possède généralement des sols à texture sablo-limoneuse ou sablo-argileuse. Cette texture favorise un bon drainage mais nécessite une gestion rigoureuse de l'irrigation et de la salinité pour maintenir une fertilité suffisante du sol.

II.6 Relief

La commune d'El Ghrous se situe au piémont sud de la chaîne montagneuse des Ziban (Monts du Zab), et présente une diversité de formes de relief qui s'étendent du nord au sud du territoire, réparties comme suit :

- **Une zone montagneuse**, localisée au nord-ouest de la commune, caractérisée par un relief accidenté et un accès difficile. Ces montagnes représentent les dernières extensions des monts du Zab, avec des altitudes variables.

- **Une zone de piémonts**, composée d'éboulis et de formations sableuses d'origine éolienne. Ces dunes de sable apparaissent notamment dans les zones méridionales de la commune.
- **Une zone de plaines**, couvrant plus de 50 % de la superficie totale d'El Ghrous. Cette configuration offre un terrain propice aux activités agricoles et à l'urbanisation.
- **Une zone de bas-fonds humides et de marécages temporaires**, localisée dans le sud de la commune, où l'on observe une remontée de la nappe phréatique ou une accumulation d'eau en période de pluies.

II.7 Hydrologie de la région

Dans la commune d'El Ghrous, située en zone aride, le régime hydrologique est marqué par une rareté et une irrégularité importante des précipitations. Les oueds présents dans la région ne sont pas permanents, mais ils jouent un rôle essentiel dans la recharge des nappes souterraines, notamment les nappes profondes de type inféro-flux. Ces cours d'eau temporaires présentent un régime torrentiel, avec des crues soudaines et de courte durée, souvent déclenchées par des épisodes orageux intenses.

La majorité des oueds de la région connaissent un écoulement diffus sur les versants montagneux, avant de se concentrer dans les lits principaux. L'eau de pluie qui tombe sur les hauteurs environnantes, notamment les contreforts de l'Atlas saharien et les Aurès, est acheminée vers les zones plus basses, parfois jusqu'aux sebkhas et chotts au sud.

Une part importante de cette eau s'évapore rapidement sous l'effet des températures élevées et du vent, tandis qu'une autre fraction pénètre le sol pour alimenter les aquifères. Le comportement hydrologique des oueds, notamment la vitesse d'écoulement et l'ampleur des crues, dépend fortement de la pente topographique et de la morphologie des lits fluviaux.

L'étude des profils longitudinaux des cours d'eau dans la région permet de mieux comprendre la dynamique des crues, les risques d'érosion, ainsi que les modalités de recharge des nappes, éléments essentiels pour une gestion durable des ressources hydriques locales.

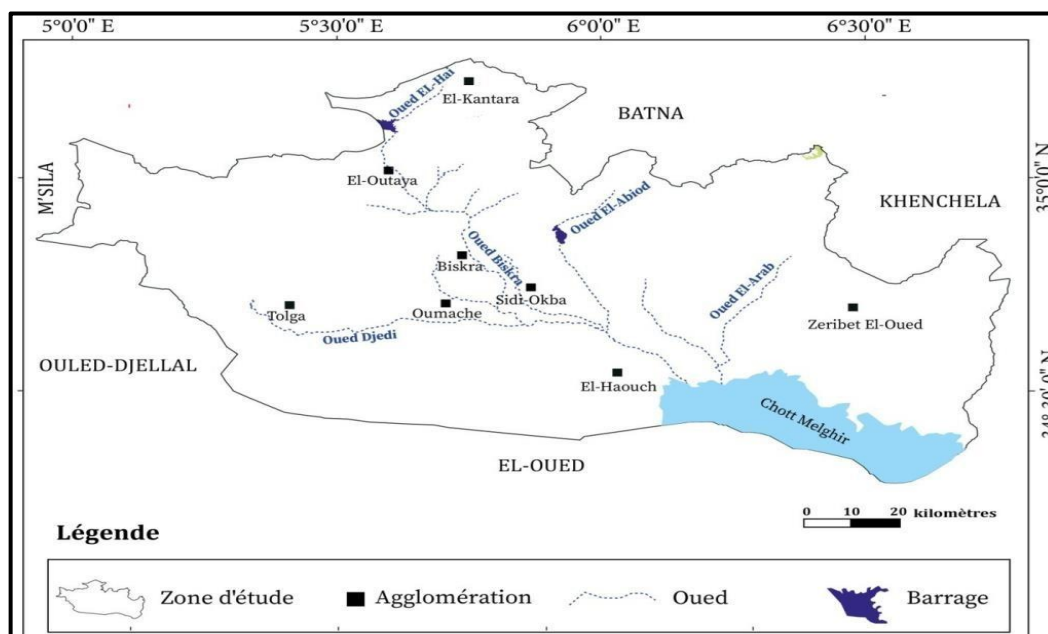


Figure N°06: Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).

II.7.1 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.7.1.1 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°08: 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	AOUT	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

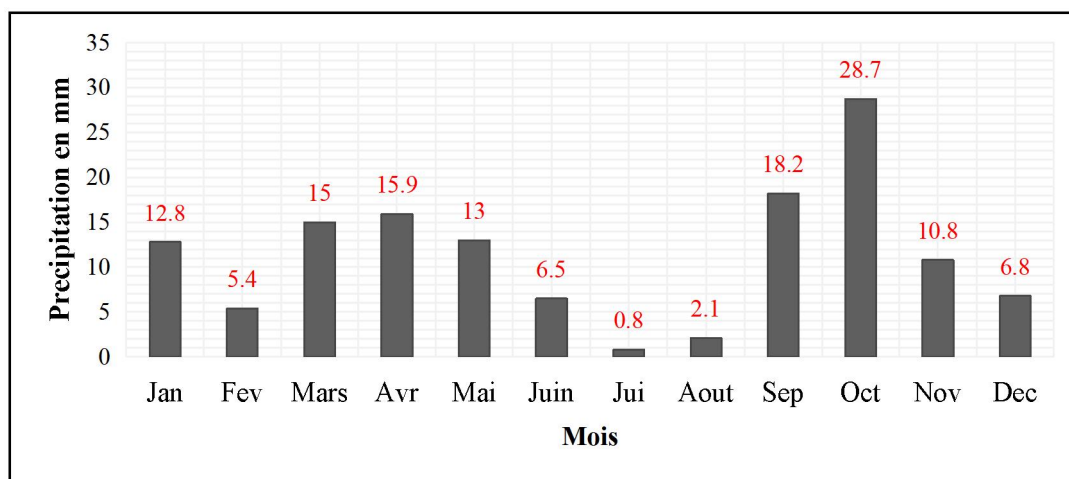


Figure N°07: précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)

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 N°09: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019) Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JUIN	JUI	AOUT	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.

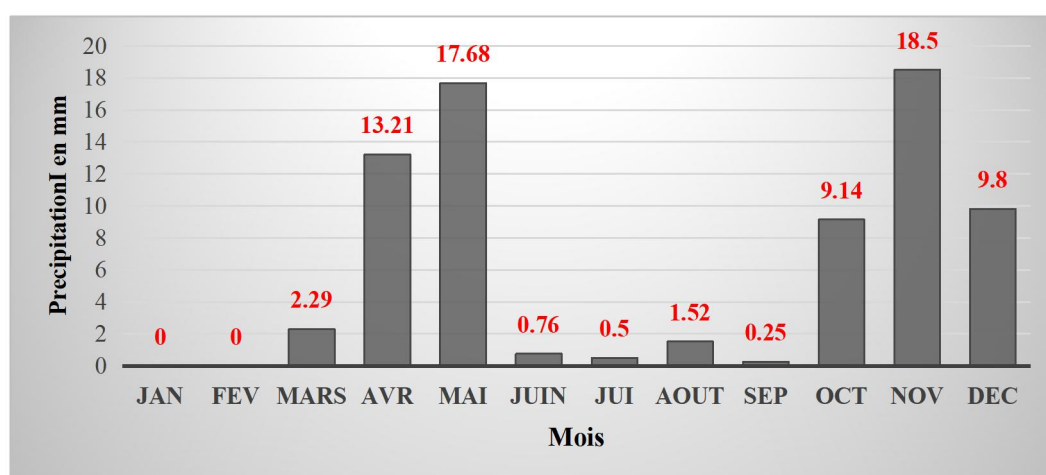


Figure N°08: La précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019)

II.7.1.2 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°10: 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	AOUT	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°11 : 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.

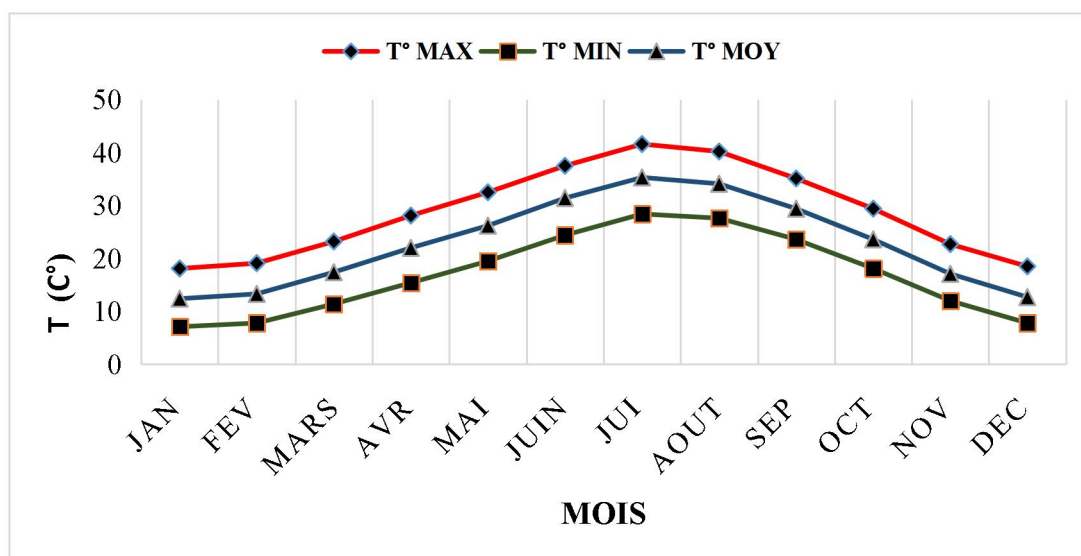


Figure N°09: Variabilités thermique de la région de Biskra durant la période (2008-2018).

II.7.1.3 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°12: Evaporation moyennes mensuelle pour la période de (2008– 2018).

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

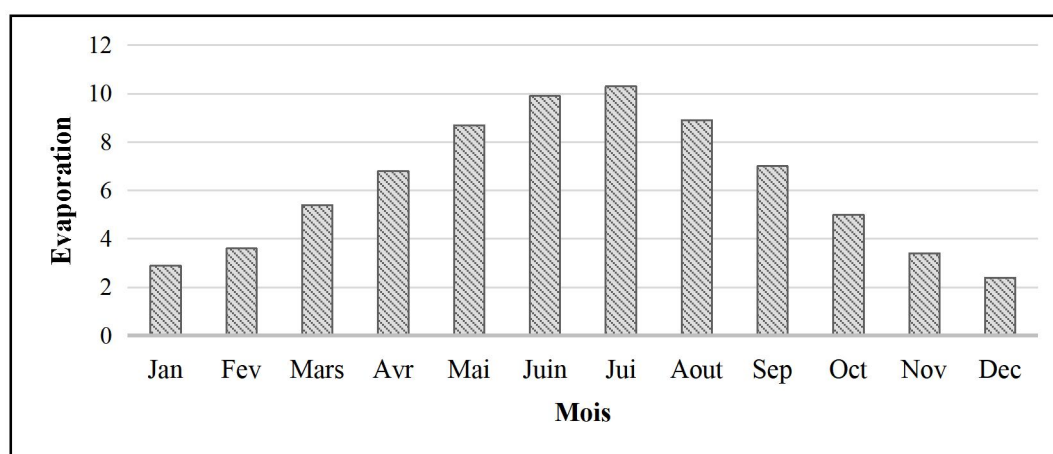


Figure N°10: Evaporation mensuelle pour la période de (2008– 2018).

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.7.1.4. 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°13: 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

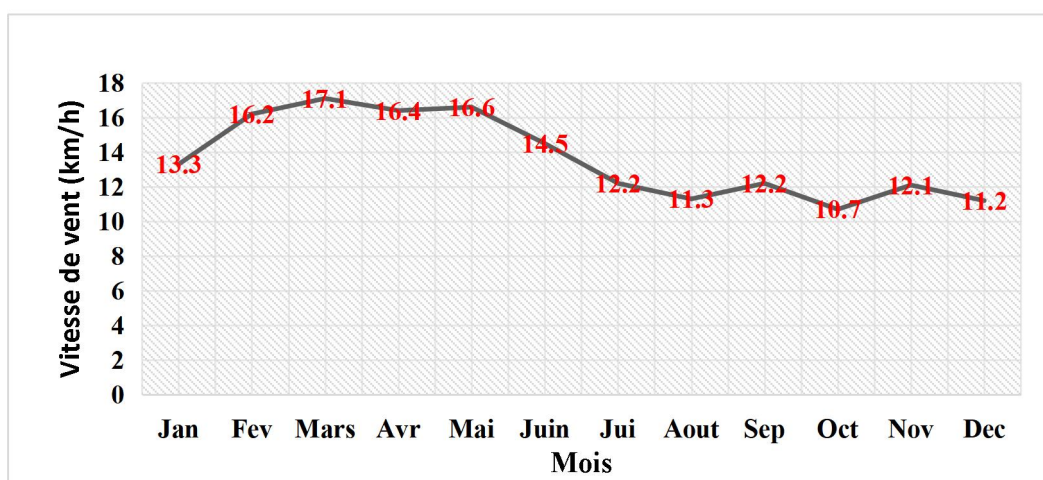


Figure N°11: Courbe de la vitesse de vent enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018).

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°14 : 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

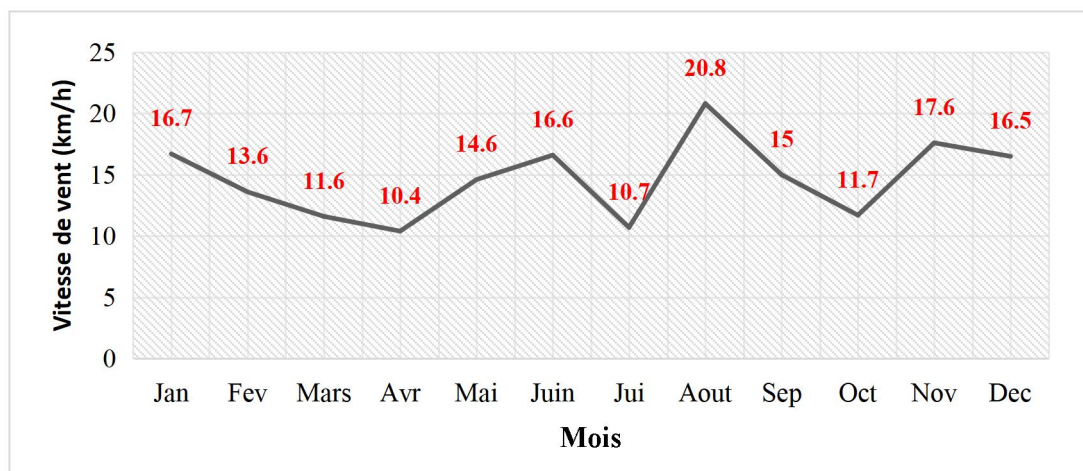


Figure N°12: La vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019).

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.7.2 Le climat suivant les nouvelles données climatiques

II.7.2.1 Identification de la période sèche

La période de sécheresse dans la région des el Ghrous située dans la wilaya de Biskra en Algérie, constitue une caractéristique climatique majeure qui impacte significativement l’agriculture et la gestion des ressources en eau. Cette période, qui s’étend généralement de mai à septembre, se distingue par des précipitations très faibles et une élévation marquée des températures, affectant négativement la croissance des cultures, en particulier celles sensibles à l’humidité du sol. Selon diverses études, les changements climatiques, peuvent prolonger les périodes de sécheresse, compliquant ainsi la planification agricole et exacerbant les défis liés à la gestion des ressources hydriques. Le diagramme ombrothermique de Gaussen, développé par Bagnouls et Gaussen (1953), offre un outil méthodologique pour définir les périodes de sécheresse et d’humidité en se basant sur la relation entre les précipitations mensuelles moyennes (P) (mm) et la température mensuelle moyenne (T) 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

Tableau N°15: Températures et précipitations en (mm) Moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)

MOIS	JUIN	JUL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	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
T° C MOY	30.6	37.	31.8	30.4	22.1	16.7	13.	12.1	13.1	17.1	21.0	24.

		1					2					5
--	--	---	--	--	--	--	---	--	--	--	--	---

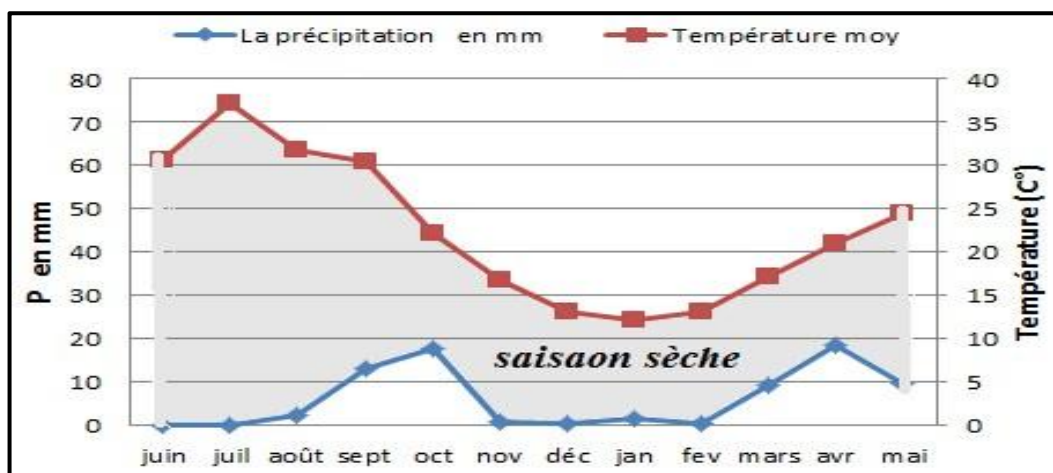


Figure N°13: le Diagramme Ombrothermique (Juin 2018-Mai 2019)

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.7.2.2 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)

Avec :

Q : quotient pluviométrique ;

P : pluviométrie annuelle en mm ;

M : moyenne des maximas du mois le plus chaud ;

m : moyenne des 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

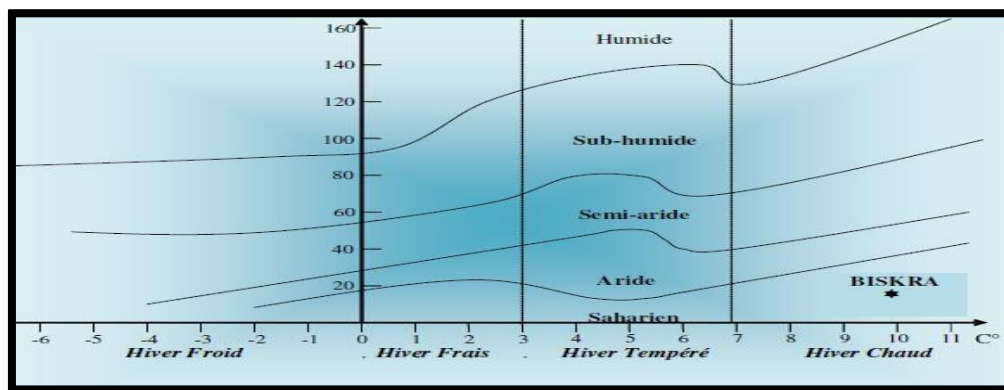


Figure N°14: Localisation de la région de Biskra sur le Climagramme d'Emberger.

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.8. 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.GOUSKO, 1964).

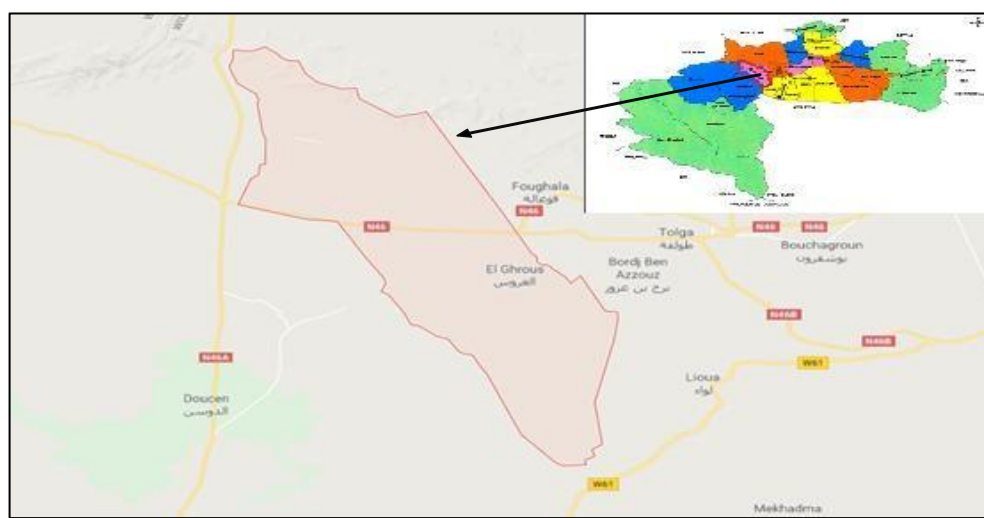


Figure N°15: position géographique de la commune d'El Ghrous. (Google Maps, 2018).

II.9 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 Chaïba 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-Chaïba. 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 Chaïba. 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

II.10. 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 aquifère. En se basant sur la description géologique des terrains ainsi que sur les caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation.

II.10.1 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 exploitées traditionnellement dans la région des Zibans, où elles jouent un rôle important dans l'alimentation des palmeraies, soit par des sources naturelles, soit par des puits traditionnels. Elles se situent principalement dans les alluvions des oueds, notamment celles d'Oued Biskra en amont de la ville et d'Oued Djedi.

▪ La nappe des alluvions d'Oued Biskra :

Cette nappe se localise dans les accumulations alluvionnaires et est essentiellement alimentée par l'infiltration des eaux des oueds (inféro-flux). Elle constitue la principale ressource en eau pour les régions de Ouled Djellal, Sidi Khaled et la ville de Biskra, caractérisée par une faible profondeur et une bonne qualité chimique, ce qui justifie son utilisation pour l'alimentation en eau potable.

Cette nappe constitue la ressource principale des régions de Ouled Djellal, Sidi Khaled et de la ville de Biskra. Elle est fortement sollicitée en raison de sa faible profondeur et de la bonne qualité chimique de ses eaux. Sa profondeur varie entre 20 et 150 mètres avec un débit oscillant entre 5 et 20 litres par seconde.

Le Quaternaire dans la région se subdivise en trois niveaux distincts :

- Les alluvions anciennes, composées de galets et de formations conglomératiques au pied des versants calcaires miocènes, qui bordent toute la dépression des Zibans.
- Les alluvions des terrasses moyennes de l'Oued Biskra, constituées d'un assemblage de cailloutis, graviers et sables, situées à une altitude inférieure à celle des alluvions anciennes.

- Les alluvions récentes formant les basses terrasses de l'Oued Biskra, composées de gros galets, graviers et sables issus de l'érosion par ruissellement sur les massifs calcaires et dunes adjacentes, présentant un intérêt agricole et hydrogéologique important.

Les limites géographiques de la nappe correspondent à l'actuel remblaiement des terrasses des oueds. La surface piézométrique est en moyenne à 3 mètres sous le niveau du sol, mais peut descendre plus profondément en période sèche, en raison du pompage intensif et de l'évaporation superficielle.

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

▪ **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 d'alternance d'argile, sable et cailloutis du Mio-pliocène.
- Exploitée principalement dans la partie Est de Biskra, notamment à M'Zirâa.
- Profondeur variant entre 100 et 300 mètres, débit moyen de 15 l/s.
- Très hétérogène avec des couches de perméabilités différentes.
- Se divise en deux aquifères à l'Est : profond (Pontien) et moyennement profond (Mio-pliocène).

▪ **La nappe profonde du continental intercalaire :**

- Aussi appelée « albienne », elle est formée principalement de grès et de marnes d'âge Albien et Barrémien.
- Son exploitation est coûteuse en raison de sa grande profondeur (> 2000 m) et de la température élevée de l'eau (> 60 °C).
- Exploitée dans la région de Biskra par 19 forages, avec des sources hydrothermales comme Hammam Essalhine.
- Son extension géographique couvre une vaste zone du Bas Sahara, limitée par l'oued Saoura à l'Ouest, l'Atlas Saharien au Nord, le Sud tunisien à l'Est, et le Sud-Ouest Libyen.
- Le système hydrologique présente un écoulement majoritairement Nord-Sud, avec des exutoires naturels vers l'Est (cuvette de Taoudeni) et l'Ouest (nappe côtière tunisienne).

- **La nappe des calcaires éocènes inférieurs :**

- **Localisation et composition :** La nappe des calcaires éocènes inférieurs se trouve dans des calcaires marins de l'Éocène inférieur, prolongés latéralement par des calcaires du Crétacé supérieur. Elle affleure dans les contreforts de l'Atlas au nord du Bas-Sahara.

- **Nappe de Tolga :** Constituée principalement de calcaires fissurés d'Éocène inférieur, c'est la nappe la plus exploitée dans les palmeraies des Zibans. Sa profondeur varie de 100 m (Tolga) à 500 m (Lioua), avec des débits allant de 10 à 30 l/s.

- **Contact hydraulique :** Il existe un contact hydraulique entre la nappe de l'Éocène inférieur et celle du Sénonien supérieur sous-jacent, parfois séparées par une fine couche de marne.

- **Aquifères associés :** Au nord et nord-est de Biskra, on trouve un aquifère important du Maastrichtien et du Campanien (200 à 900 m de profondeur) avec une bonne qualité d'eau. La nappe du Turonien est également présente mais non exploitée.

- **Caractéristiques hydrogéologiques :** Ces calcaires sont fissurés par des contraintes tectoniques et les eaux atmosphériques, formant un excellent réservoir avec bonne perméabilité. Leur couverture imperméable favorise leur fonctionnement captif et artésien sur certaines zones.

II.10.2 l'inventaire des points d'eau

Les forages qui ont été recensés au niveau de la plaine alluviale de la région de Lioua, n'exploitent que les eaux de la nappe Moi-Pliocène. Les puits sont peu profonds, et ont été creusés dans les formations du Moi-Pliocène, ils sont utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) et l'irrigation des terres agricoles. La profondeur des forages dépasse 70 m à 900 m. A partir des données recueillies de la DRE et l'ANRH de Biskra, nous avons matérialisé l'ensemble des points d'eau (puits et forages) sur la carte d'inventaire (Figure N°. 18). (Boutouga Fateh,2012)

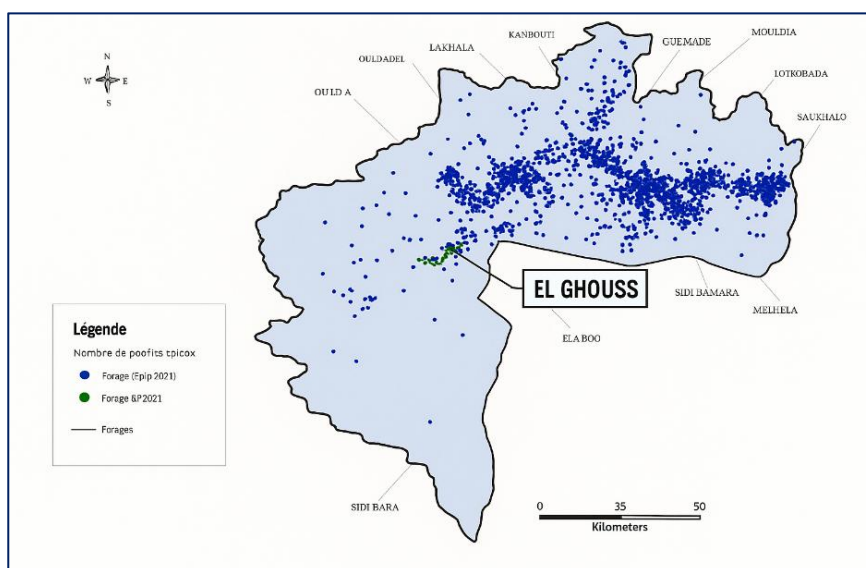


Figure N°17: Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011).

II.10. 3 La piézométrie

L'analyse des mesures piézométriques dans la région de El Ghrous, en Algérie, révèle une dynamique complexe des eaux souterraines influencée par la topographie et les conditions géologiques. Le flux d'eau s'oriente principalement du nord vers le sud, avec des gradients hydrauliques élevés dans les zones de relief marqué où les fractures facilitent l'écoulement, tandis que les zones planes présentent des gradients faibles, traduisant un écoulement plus lent. La convergence des lignes de courant vers les dépressions indique des zones d'accumulation des eaux souterraines. Cette dynamique impacte la qualité de l'eau en raison de la minéralisation et des influences anthropiques, soulignant ainsi l'importance d'une gestion intégrée des ressources en eau pour assurer leur durabilité, comme confirmé par d'autres études en Afrique du Nord.

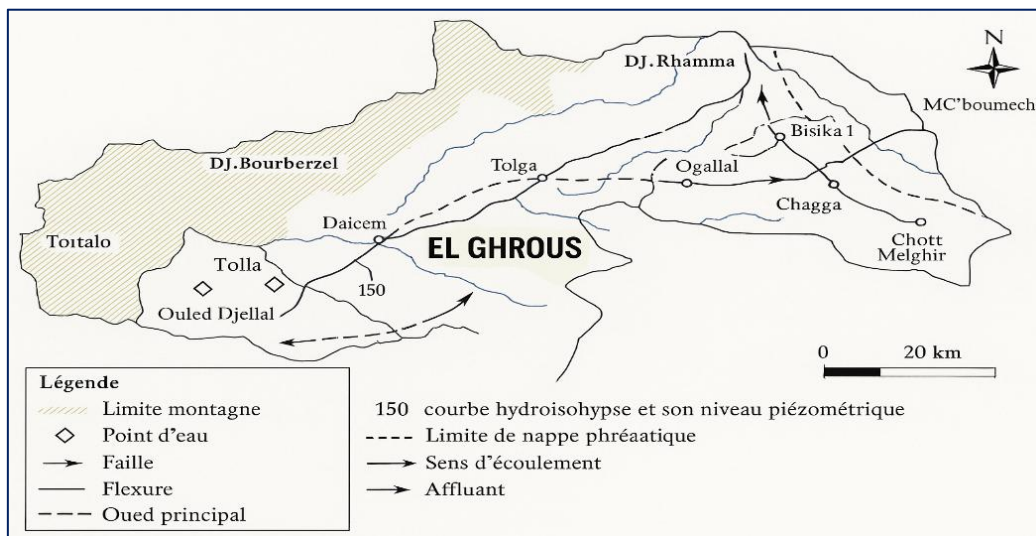


Figure N°18: Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).

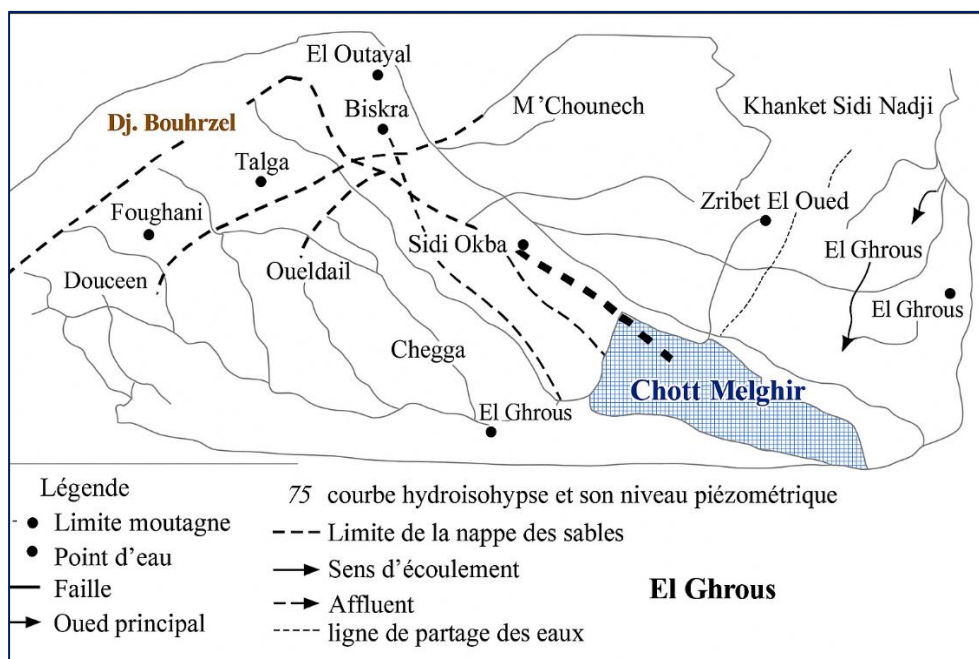


Figure N°19: Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)

II.11 Conclusion

La région d'El Ghrous, située dans la wilaya de Biskra en Algérie, présente des caractéristiques climatiques et socioéconomiques typiques des zones sahariennes, marquées par des défis et des opportunités spécifiques. Selon le Climagramme d'Emberger, elle appartient à l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud, caractérisé par un climat hyperaride, des précipitations faibles et irrégulières, ainsi que des températures extrêmement élevées. Bien que sporadiques, les précipitations estivales peuvent être intenses, limitant ainsi le développement du couvert végétal et compliquant les activités agricoles dans un contexte de rareté des ressources en eau.

Malgré ces contraintes climatiques, El Ghrous dispose d'un potentiel naturel et socioéconomique considérable. La présence de ressources hydriques, bien que soumises à une exploitation intensive, et la densité de la population suggèrent une main-d'œuvre disponible, permettant à l'agriculture de demeurer l'activité principale. Toutefois, cette dernière fait face à plusieurs défis majeurs, notamment le drainage insuffisant des excès d'eau d'irrigation, l'exploitation excessive des nappes phréatiques non renouvelables et le vieillissement du palmier dattier, ressource clé de la région. Ces problématiques sont accentuées par des contraintes environnementales telles que la sécheresse et la dégradation de la qualité des sols et de l'eau, ainsi que par des difficultés socioéconomiques liées à l'insuffisance de main-d'œuvre qualifiée et à l'accès limité aux infrastructures énergétiques et de transport.

Le développement de cultures de primeurs, notamment la tomate, a profondément transformé l'économie locale au cours des deux dernières décennies. Cependant, cette expansion agricole soulève des préoccupations quant à la durabilité des ressources naturelles et aux impacts environnementaux, nécessitant une gestion intégrée des ressources hydriques et une adaptation des pratiques agricoles.

Ainsi, la région d'El Ghrous illustre la complexité des interactions entre conditions climatiques extrêmes, dynamiques socioéconomiques et gestion des ressources naturelles en milieu saharien. Une approche durable, fondée sur une exploitation rationnelle de l'eau et une planification agricole adaptée, s'avère essentielle pour assurer la pérennité du développement agricole et économique de la région.

Partie B : Etude expérimentale

Chapitre I : Matériels et méthodes

I.1 Introduction

Ce chapitre se concentrera sur l'exploration des méthodes utilisées pour évaluer les caractéristiques chimiques des eaux souterraines dans la région d'El Ghrous, situées à Wilaya de Biskra.

Nous vérifierons en détail les processus analytiques utilisés, mettant en évidence les techniques utilisées dans nos recherches. De plus, nous discuterons du logiciel utilisé pour analyser les données collectées, offrant ainsi un aperçu de notre méthode. Enfin, nous présenterons les principaux paramètres utilisés pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans le contexte de nos recherches, en soulignant leur importance dans la prise de décisions et la gestion durable des ressources en eau.

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 (Wi) 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 (Wi) pour chaque paramètre

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

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 (qi) 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) :

$$qi = \frac{Ci}{Si} \times 100 \quad (3)$$

Dans cette équation, qi 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).

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

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	$\geq 6,5$ 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. (Reghis ,2024)

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 affluent 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'Hydrogeologie 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° 21). (Reghis ,2024)

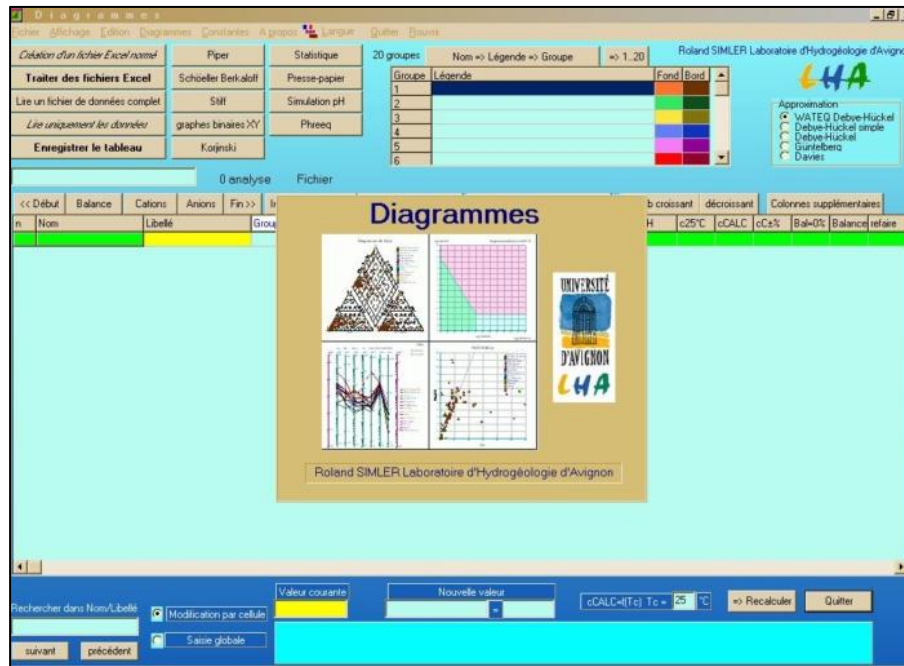


Figure N°20: Interface de commande du logiciel Diagramme

• Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est un outil graphique qui permet de classer les eaux en fonction de leur composition chimique. Il analyse les principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) et anions (Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-}), représentés dans deux triangles, dont les résultats sont combinés dans un losange central. Ce système facilite l'identification des types d'eaux et des ions dominants, tout en permettant de détecter les processus chimiques influençant la qualité de l'eau. Il est couramment utilisé pour comparer plusieurs échantillons et comprendre les relations entre eaux souterraines et de surface.

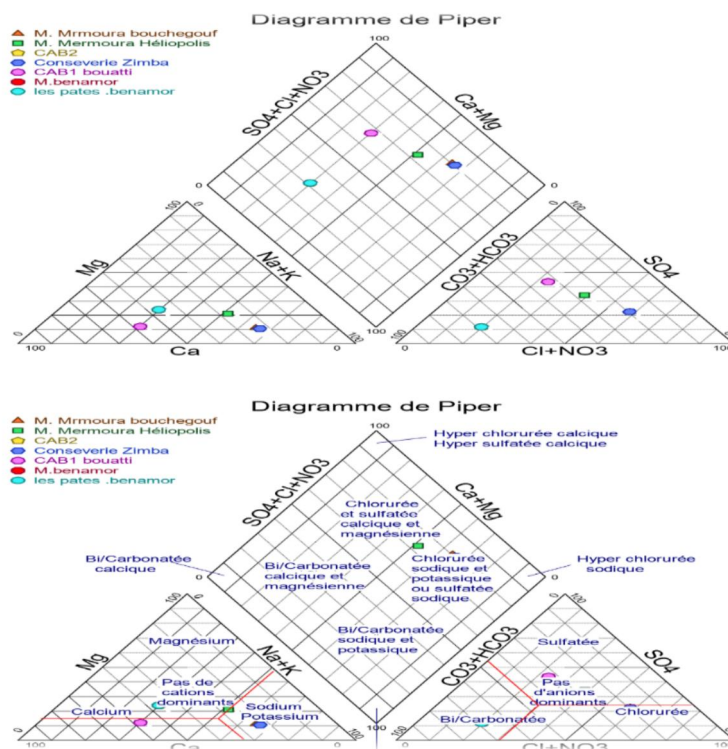


Figure N°21: Représentation des faciès chimiques des eaux avec Diagramme de Piper.

Le diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure N°22) est un outil utilisé pour représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eau. Chaque échantillon est illustré par une ligne brisée, où la concentration des éléments chimiques est affichée sur une échelle logarithmique verticale. En reliant les points correspondant aux différents ions, on obtient une courbe permettant d'analyser et de comparer la composition chimique des eaux.

Lorsque plusieurs échantillons présentent des proportions constantes entre les éléments dissous, leurs courbes restent parallèles. En revanche, lorsque les lignes se croisent, cela indique un changement de faciès chimique. Ce diagramme offre ainsi une vision simultanée du faciès chimique et du degré de minéralisation de l'eau, facilitant son interprétation (Gouaidia, 2008).

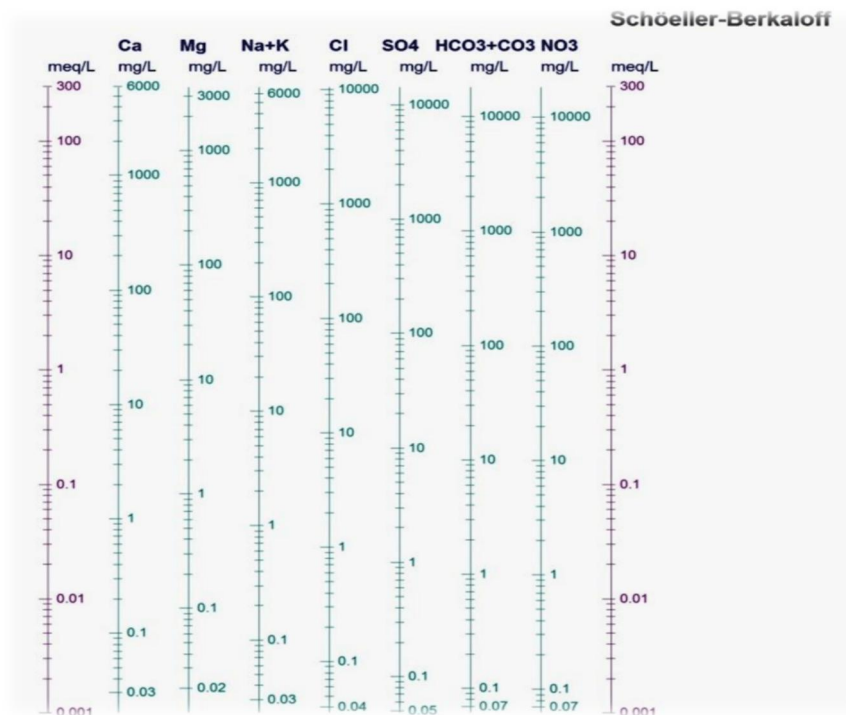


Figure N°22: Diagramme de Schoeller Berkaloff.

- **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.

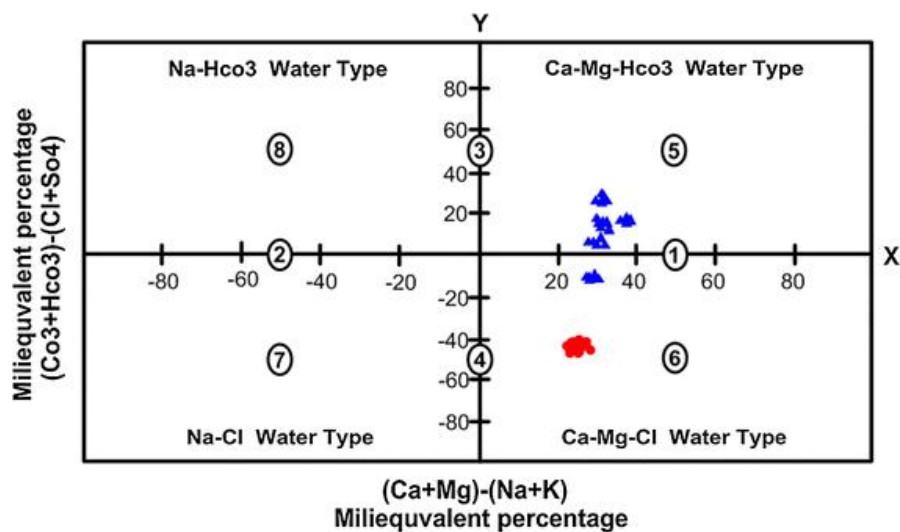


Figure N°23: Diagramme de Chadha

- **Le diagramme de Riverside**

Proposé par Richards, le diagramme de Riverside est un outil fiable pour évaluer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation. Une forte concentration en sels dissous peut poser des risques pour les cultures, notamment en influençant la structure du sol. Ce risque est évalué à l'aide du Sodium Absorption Ratio (SAR), qui mesure la capacité d'échange des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par Na^+ dans les argiles et colloïdes.

Le SAR est calculé selon la formule :

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

Dans ce diagramme, on trace la conductivité électrique (exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C) en fonction du SAR, ce qui permet de classer les eaux selon leur potentiel de salinisation et d'alcalinisation. La classification de Richards, détaillée dans le Tableau N°19, définit plusieurs classes d'eau, chacune présentant un niveau de risque pour l'irrigation.

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
1er	Excellente	C1S1	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2eme	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

- Ce tableau classe la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation agricole en fonction de leur salinité (C) et de leur teneur en sodium (S), ce qui influence leur aptitude à l'usage agricole.

- 1.Eaux excellentes (C1S1) : Utilisables sans restriction pour toutes les cultures et la plupart des sols.
- 2.Eaux bonnes (C2S1, C1S2) : Conviennent sans grande restriction, mais nécessitent une attention pour les plantes ayant une tolérance moyenne aux sels.
- 3.Eaux admissibles (C3S1, C2S3, C3S2) : Adaptées aux cultures tolérantes aux sels, mais nécessitent un bon drainage et un contrôle de la salinité.
- 4.Eaux médiocres (C4S1, C4S2, C3S3) : Fortement minéralisées, utilisables uniquement pour des cultures très résistantes aux sels et sur sol bien drainé.
- 5.Eaux mauvaises (C3S4, C4S3, C4S4) : Généralement inadaptées à l'irrigation, sauf dans des conditions spécifiques : sols très perméables, bien lessivés, et cultures tolérantes aux sels.

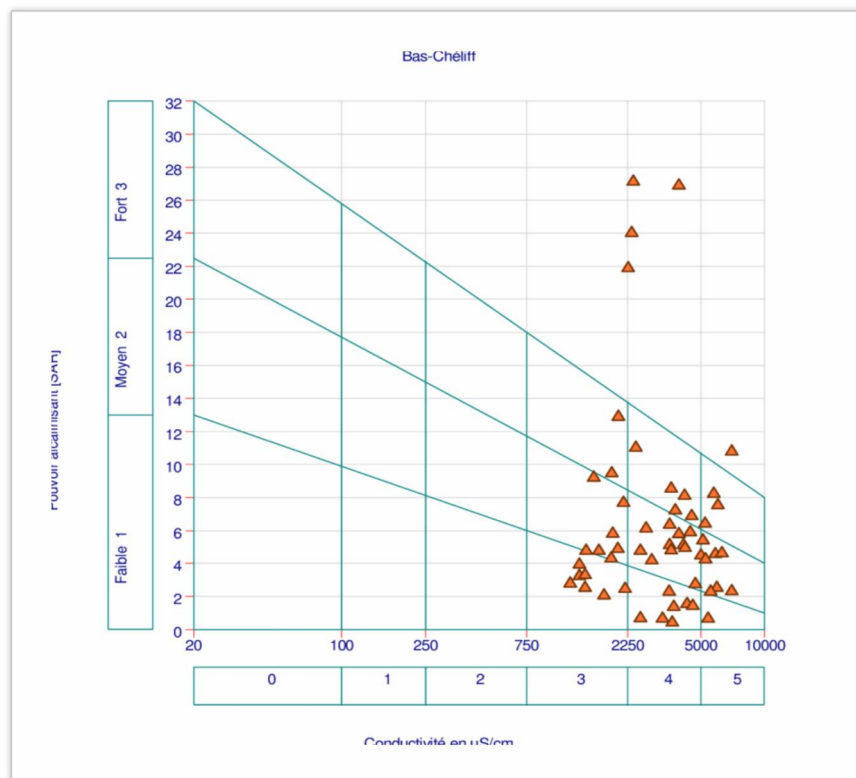


Figure N°24 : Diagramme de Richards (Riverside).

- **Le diagramme de Wilcox**

Le diagramme de Wilcox est un outil permettant d'évaluer la qualité des eaux destinées à l'irrigation. En effet, la plupart des plantes tolèrent mal les sols riches en sodium. Cette classification repose sur deux paramètres essentiels : la conductivité électrique (EC), qui reflète la salinité de l'eau, et le pourcentage de sodium (%Na) présent dans celle-ci.

La formule utilisée pour calculer le pourcentage de sodium est la suivante :

$$N\% = \frac{(Na^{+} + K^{+}) \times 100}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+})}$$

Le diagramme de Wilcox représente graphiquement la relation entre le risque de salinité (mesuré en EC, exprimé en $\mu\text{S}/\text{cm}$) et la teneur en sodium dans l'eau. Grâce à cette représentation, il est possible de classer les eaux d'irrigation selon différents niveaux d'aptitude :

1. Excellent à bon (I)
2. Bon à permis (II)
3. Permis à douteux (III)
4. Douteux à inadapté (IV)
5. Totalement inadapté (V)

Ce diagramme est donc un outil crucial pour déterminer l'impact de l'eau sur la qualité des sols agricoles et prévenir les risques de salinisation et de sodisation des terres irriguées.

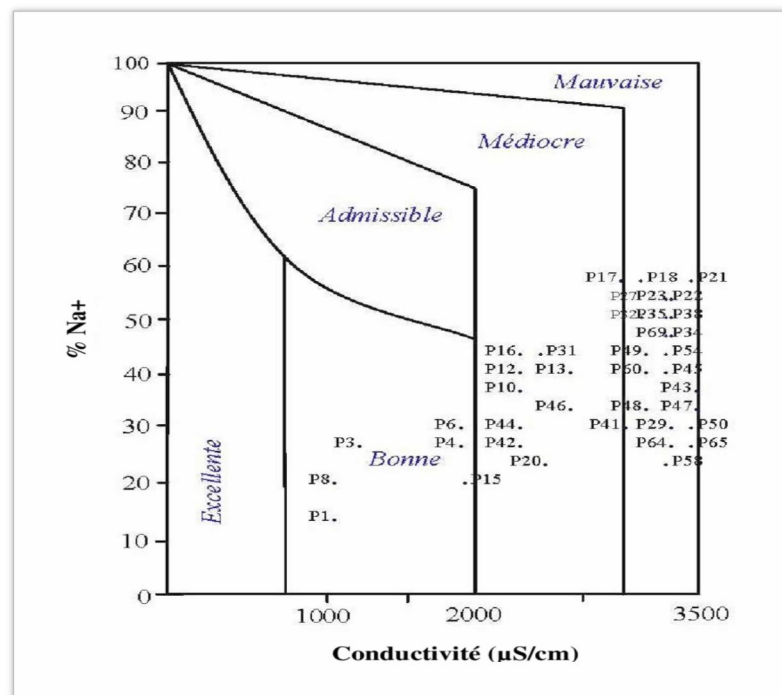


Figure N°25 : Diagramme de Wilcox.

I.4 Aptitudes des eaux d'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation dépend de sa composition chimique et de son impact sur le sol et les cultures (Adimalla et al., 2020). Elle est généralement évaluée à travers plusieurs paramètres essentiels, notamment le taux 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).

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

Le SAR est un indicateur clé pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation, car il reflète la capacité des sols à absorber le sodium. Une concentration excessive de sel dans l'eau peut entraîner la salinisation des sols, tandis qu'une teneur élevée en sodium peut accroître leur alcalinité.

(Adhikary et al., 2012). Le SAR permet donc d'estimer ce risque : plus la proportion de sodium est importante, plus l'alcalinité du sol est susceptible d'augmenter (Sheikhy Narany et al., 2015). Le SAR est calculé à l'aide de la formule suivante (Hem, 1985) :

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

La classification du SAR selon (Gugulothu et al., 2022) et (Richards, 1954) est la suivante :

- Faible (S1, <10) : Eau convenant à la plupart des sols, avec un faible risque d'accumulation de sodium échangeable.
- Moyen (S2, 10–18) : Peut poser des problèmes dans les sols fins sans gypse, surtout en l'absence de drainage et avec une capacité d'échange cationique élevée.
- Élevé (S3, 18–28) : Peut provoquer une accumulation excessive de sodium dans le sol, nécessitant un drainage efficace et un lessivage fréquent, sauf en présence de gypse.
- Très élevé (S4, >28) : Eau inadaptée à l'irrigation, sauf si la salinité est faible ou modérée, ou si des amendements comme le gypse sont appliqués.

Le diagramme de salinité des États-Unis (USSS) illustre la relation entre le risque de salinité (mesuré par la conductivité électrique, EC) et la teneur en sodium (exprimée par le SAR en meq/L) (Batarseh et al., 2021). Ce diagramme est couramment utilisé pour classer les eaux d'irrigation et évaluer leur impact potentiel sur les sols agricoles.

I.4.2 La teneur en sodium (Na%)

Le pourcentage de sodium (**Na%**) est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation. Un excès de sodium dans l'eau peut nuire à la structure du sol en réduisant sa perméabilité et en gênant la croissance des plantes (Wilcox, 1955). Lorsque la concentration en **Na⁺** est élevée, les ions sodium remplacent les ions **Ca²⁺** et **Mg²⁺** dans les particules d'argile par échange ionique, ce qui réduit la capacité du sol à absorber et à transporter l'eau. Ce phénomène entraîne une mauvaise infiltration de l'eau et un compactage du sol, surtout en période sèche (Saleh et al., 1999).

Le **%Na** est calculé selon la formule suivante :

$$Na\% = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+)} \times 100$$

Selon Khoda Panah et al. (2009), la classification de l'eau en fonction de %Na est la suivante :
 Excellente : < 20 %, Bonne : 20-40 %, Admissible : 40-60 %, Douteuse : 60-80 %, Inadaptée : > 80 %

I.4.3 L'indice de perméabilité (PI)

L'indice de perméabilité (PI) est utilisé pour évaluer la capacité de l'eau à maintenir une bonne infiltration dans le sol. À long terme, l'irrigation avec une eau riche en sels peut altérer cette perméabilité. L'effet des ions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- joue un rôle clé dans cette dynamique (Doneen, 1964).

Le PI est calculé selon l'équation suivante :

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

D'après Doneen (1964), l'eau est classée selon son indice de perméabilité en trois catégories :

- Classe I (> 75 %) : Eau convenable pour l'irrigation.
- Classe II (25-75 %) : Eau de bonne qualité.
- Classe III (< 25 %) : Eau inadaptée pour l'irrigation.

Les eaux appartenant aux Classes I et II sont recommandées pour l'irrigation.

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

En général, un équilibre entre calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) est maintenu dans les eaux naturelles. Cependant, une concentration excessive de Mg^{2+} peut affecter la structure du sol et réduire la productivité des cultures (Nagaraju et al., 2014).

Le rapport de risque du magnésium (MHR) est l'un des indicateurs clés pour évaluer l'impact du magnésium sur la qualité de l'eau d'irrigation (Awad et al., 2022). Un excès de magnésium dans le sol peut augmenter l'alcalinité, ce qui détériore la qualité du sol et réduit les rendements agricoles (Kawagoshi et al., 2016).

Le MHR est calculé selon l'équation suivante :

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

Si la valeur du MHR dépasse 50 %, la qualité du sol est compromise et il devient plus alcalin, réduisant ainsi la croissance des cultures.

II.5 Analyse Statistique Multivariée

II.5.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique multivariée qui permet de traiter simultanément plusieurs variables quantitatives. Elle vise à résumer et visualiser l'information contenue dans les données afin de faciliter leur interprétation.

➤ Principe

L'ACP consiste à représenter les données dans un espace de dimension réduite, tout en préservant au maximum les distances entre les individus. On peut la considérer comme une compression avec perte d'information : seules les dimensions les plus pertinentes sont conservées.

Elle permet ainsi de répondre aux trois questions suivantes :

1. Proximité entre échantillons : Existe-t-il des groupements d'échantillons chimiquement similaires ? Comment évoluent-ils d'une famille à l'autre ?
2. Proximité entre éléments chimiques : Certaines variables sont-elles corrélées entre elles ?
3. Proximité entre échantillons et éléments : Quels éléments caractérisent chaque échantillon ou chaque groupe d'échantillons ?

➤ Méthodologie

L'ACP peut être abordée sous plusieurs angles :

- Statistique classique : Elle permet d'identifier les axes principaux d'une distribution normale multidimensionnelle, en se basant sur l'étude de la variance des données (Hotelling, 1933).
- Analyse factorielle : C'est un cas particulier de l'analyse factorielle utilisée en psychométrie, où les variances spécifiques sont nulles ou égales.
- Analyse des données : Ici, l'ACP est vue comme une technique de représentation graphique optimale selon des critères algébriques et géométriques (Pearson, 1901). Cette approche est la plus répandue aujourd'hui.

L'ACP possède plusieurs variantes en fonction du traitement des données :

- **Centrage** (soustraction de la moyenne)
- **Réduction** (division par l'écart-type)
- **Normalisation**

L'ACP normée (centrage et réduction) est la plus couramment utilisée, car elle permet de rendre les variables comparables en éliminant l'effet des unités de mesure.

I.6 Conclusion

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines repose sur l'analyse approfondie de plusieurs paramètres physico-chimiques. Ces paramètres incluent la conductivité électrique, la concentration en ions majeurs tels que le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), ainsi que le pH et la présence éventuelle de contaminants.

Dans ce chapitre, nous avons exposé en détail les approches méthodologiques adoptées pour l'interprétation des données recueillies. Nous avons décrit les méthodes analytiques appliquées afin d'assurer une évaluation précise des échantillons étudiés. Par ailleurs, nous avons intégré l'utilisation d'outils informatiques avancés, notamment des logiciels spécialisés en hydrochimie et en analyses statistiques, pour une meilleure visualisation et interprétation des résultats.

Enfin, une attention particulière a été portée aux indices et aux critères d'évaluation de la qualité des eaux souterraines. Ces indicateurs permettent d'établir des corrélations pertinentes entre les différentes variables analysées, facilitant ainsi l'identification des processus hydro-chimiques influençant la composition des eaux étudiées.

Chapitre II : Résultats et interprétations

I.1. Introduction

L'évaluation de la qualité de l'eau constitue une étape fondamentale pour appréhender l'état des ressources hydriques et assurer leur gestion de manière sûre et durable. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats issus des analyses de la qualité de l'eau, réalisées à partir d'un ensemble de paramètres biologiques, physiques et chimiques. Ces résultats permettent d'obtenir une vue d'ensemble sur l'état actuel des différentes sources d'eau, tout en identifiant les aspects nécessitant une attention particulière selon les usages envisagés, notamment l'irrigation, l'alimentation en eau potable et les besoins industriels.

Ce travail vise à fournir des données précises et fiables, susceptibles de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau et à la mise en place de stratégies adaptées pour leur préservation.

II.2. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont des mesures qui décrivent les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau de 29 forages dans la zone de El Ghrous.

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

Tableau N°20: Paramètres physico-chimiques de l'eau de 29 forages-ANRH

N°	Libellé	Groupe	T°C	pH	c25°C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
1	Éocène inférieur	1	16,5	7,8	3000	264	151	110	12	140	1150	138	34
2	Éocène inférieur	1	16	8,4	3500	330	66	248	90	104	1020	435	3
3	Éocène inférieur	1	15,6	7,9	2840	144	263	161	4	220	1062	264	8
4	Éocène inférieur	1	16,1	8,1	2600	366	25	180	12	140	1050	155	4
5	Éocène inférieur	1	16	7,54	2006	352	95	86	8	549	386	226	22,3
6	Éocène inférieur	1	16,05	7,61	4090	219	42	77	23	256	465	156	33
7	Éocène inférieur	1	16,1	8,3	2400	190	61	176	12	220	590	280	11
8	Éocène inférieur	1	16,5	8,3	2600	338	145	82	30	146	1200	175	5
9	Éocène inférieur	1	16,2	8	5000	400	108	490	58	61	1300	975	7
10	Éocène inférieur	1	16,2	7,8	2500	174	104	140	11	177	825	175	28
11	Éocène inférieur	1	15,8	8,2	3000	270	59	272	25	122	1000	275	10
12	Coniacien-Santonien	1	16	8,1	2000	216	65	118	16	238	500	217	4
13	Éocène	1	16,4	7,7	2400	262	54	170	3	207	620	284	5

	inférieur												
14	Éocène inférieur	1	16,3	7,01	2740	263,4	94	174	6	219,6	980	165	10
15	Éocène inférieur	1	15,5	7,9	2700	326	76	120	10	165	990	175	0
16	Éocène inférieur	1	16,1	7,5	2600	350	66	156	15	177	990	250	4
17	Éocène inférieur	1	16	7,35	2810	271,4	110,71	136	6	195,2	1000	160	0
18	Éocène inférieur	1	16,7	8	2900	254	169	150	13	177	1220	238	45
19	Éocène inférieur	1	15,7	7,11	4500	551,4	163,54	239	9	146	1800	385	0
20	Éocène inférieur	1	16,5	7,9	3200	560	144	174	16	134	1650	300	5
21	Éocène inférieur	1	16,8	7,9	3000	436	50	236	26	55	1104	388	6
22	Éocène inférieur	1	17,1	8,1	2900	430	28	246	28	79	960	376	6
23	Éocène inférieur	1	16,9	8	2300	284	48	124	19	226	490	305	10
24	Éocène inférieur	1	15,5	7,43	1930	157,09	65,9	157	4	237,9	490	200	9
25	Éocène inférieur	1	17	7,4	2010	234,23	70,21	126	12	224	1100	450	8
26	Éocène inférieur	1	17,2	7,42	2875	301,13	65,98	134	9	234	1140	290	9
27	Éocène inférieur	1	17,1	7,89	3045	467,33	69,44	189	6	178	1340	278	6
28	Éocène inférieur	1	15,8	7,22	2900	480,35	57,87	140	11	154	350	667	17
29	Éocène inférieur	1	17,2	7,53	2350	502,44	100,65	156	18	143	800	300	2

II.2.1. Bilan Ionique

Tableau N°21: Balance Ionique de l'eau de 29 forages-ANRH

N°	Ca ²⁺ (meq/l)	Mg ²⁺ (meq/l)	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	SO ₄ ²⁻ (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	NO ₃ ⁻ (meq/l)	ΣCations	ΣAnions	Δ E
1	13,2	12,58	4,78	0,31	2,3	23,96	3,89	0,55	30,87	30,69	0,3
2	16,5	5,5	10,78	2,31	1,7	21,25	12,25	0,05	35,09	35,26	0,24
3	7,2	21,92	7	0,1	3,61	22,13	7,44	0,13	36,22	33,3	4,2
4	18,3	2,08	7,83	0,31	2,3	21,88	4,37	0,06	28,52	28,6	0,15
5	17,6	7,92	3,74	0,21	9	8,04	6,37	0,36	29,46	23,77	10,7
6	10,95	3,5	3,35	0,59	4,2	9,69	4,39	0,53	18,39	18,81	1,14
7	9,5	5,08	7,65	0,31	3,61	12,29	7,89	0,18	22,54	23,96	3,05
8	16,9	12,08	3,57	0,77	2,39	25	4,93	0,08	33,32	32,4	1,39
9	20	9	21,3	1,49	1	27,08	27,46	0,11	51,79	55,66	3,6

10	8,7	8,67	6,09	0,28	2,9	17,19	4,93	0,45	23,74	25,47	3,53
11	13,5	4,92	11,83	0,64	2	20,83	7,75	0,16	30,88	30,74	0,23
12	10,8	5,42	5,13	0,41	3,9	10,42	6,11	0,06	21,76	20,5	2,99
13	13,1	4,5	7,39	0,08	3,39	12,92	8	0,08	25,07	24,39	1,37
14	13,17	7,83	7,57	0,15	3,6	20,42	4,65	0,16	28,72	28,83	0,18
15	16,3	6,33	5,22	0,26	2,7	20,63	4,93	0	28,11	28,26	0,27
16	17,5	5,5	6,78	0,38	2,9	20,63	7,04	0,06	30,17	30,63	0,77
17	13,57	9,23	5,91	0,15	3,2	20,83	4,51	0	28,86	28,54	0,56
18	12,7	14,08	6,52	0,33	2,9	25,42	6,7	0,73	33,64	35,75	3,04
19	27,57	13,63	10,39	0,23	2,39	37,5	10,85	0	51,82	50,74	1,05
20	28	12	7,57	0,41	2,2	34,38	8,45	0,08	47,98	45,1	3,09
21	21,8	4,17	10,26	0,67	0,9	23	10,93	0,1	36,89	34,93	2,74
22	21,5	2,33	10,7	0,72	1,3	20	10,59	0,1	35,25	31,98	4,85
23	14,2	4	5,39	0,49	3,7	10,21	8,59	0,16	24,08	22,67	3,02
24	7,85	5,49	6,83	0,1	3,9	10,21	5,63	0,15	20,27	19,89	0,96
25	11,71	5,85	5,48	0,31	3,67	22,92	12,68	0,13	23,35	39,39	25,57
26	15,06	5,5	5,83	0,23	3,84	23,75	8,17	0,15	26,61	35,9	14,86
27	23,37	5,79	8,22	0,15	2,92	27,92	7,83	0,1	37,52	38,76	1,62
28	24,02	4,82	6,09	0,28	2,52	7,29	18,79	0,27	35,21	28,88	9,88
29	25,12	8,39	6,78	0,46	2,34	16,67	8,45	0,03	40,75	27,49	19,43

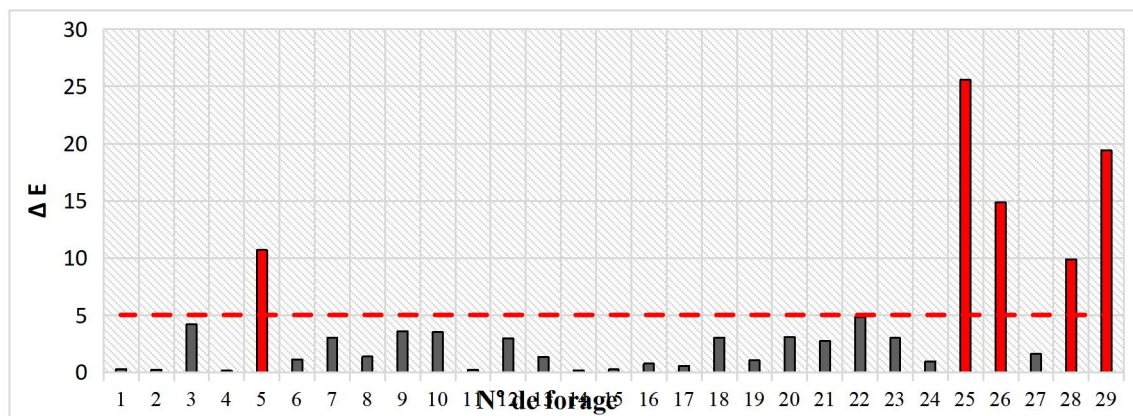


Figure N°26: Variation du déséquilibre ionique (ΔE) dans les 29 forages.

- **Vérification du bilan ionique et exclusion de certains forages**

Le bilan ionique a été calculé pour l'ensemble des forages étudiés en comparant la somme des concentrations des cations et des anions exprimés en milliéquivalents par litre (meq/L), selon la formule suivante :

$$100 \times \left(\frac{\text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\text{Cations} + \sum \text{Anions}} \right) = \Delta E$$

Un écart maximal de $\pm 5\%$ a été retenu comme seuil d'acceptabilité, conformément aux recommandations courantes en hydrochimie. La majorité des forages ont montré un bon équilibre ionique ($\Delta E \leq 5\%$), ce qui confirme la fiabilité des analyses chimiques.

Cependant, **cinq forages** (numéros **5, 25, 26, 28 et 29**) ont présenté un écart ionique supérieur à cette limite. Un tel dépassement suggère soit une erreur analytique, soit une omission d'ions dans les résultats (tels que Fe^{2+} , Mn^{2+} ou NH_4^+), compromettant ainsi la fiabilité des données.

Par conséquent, ces forages ont été exclus de l'analyse finale car jugés non exploitables dans le cadre de cette étude

Tableau N°22: Forages exclus pour déséquilibre ionique significatif ($\Delta E > 5\%$)

N° Forage	ΔE (%)	Observation
5	10,7	Déséquilibre ionique (dépassement Positif)
25	-25,57	Déséquilibre ionique (dépassement Négatif)
26	-14,86	Déséquilibre ionique (dépassement Négatif)
28	9,88	Déséquilibre ionique (dépassement Positif)
29	19,43	Déséquilibre ionique (dépassement Positif)

II.3 Paramètres physiques

II.3.1 La température

La température des eaux souterraines issues du forage dépend de plusieurs facteurs, tels que la profondeur du puits, la nature géologique des couches traversées, les conditions climatiques locales ainsi que d'autres paramètres environnementaux. En général, plus le forage est profond, plus la température de l'eau augmente, en raison du gradient géothermique terrestre. Toutefois, cette relation peut être influencée par des variations régionales et locales significatives.

La température joue un rôle fondamental dans l'intensification des réactions chimiques, la prolifération bactérienne et l'augmentation du taux d'évaporation de l'eau. Elle est également affectée par la température de l'air ambiant, les fluctuations saisonnières, les caractéristiques géologiques des formations traversées, ainsi que la profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface du sol.

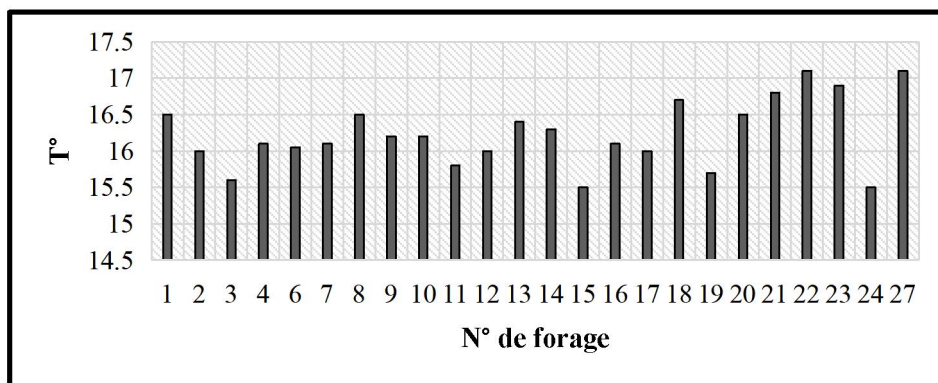


Figure N°27: Histogramme de la température de 24 forages.

Tableau N°23: Statistique de la température de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type
Température (T°)	°	15.5	17,1	16,24	0,4533

- Nous observons une faible variation de température avec écart type de (0.4533°C).
- Température minimum 15.5°C
- Température maximum 17.1°C
- Température moyenne 16.24°C

D'après la figure N° 30 les résultats obtenus de la température sont comme suit :La température des eaux souterraines varie entre 15,5°C et 17,1°C avec une moyenne de 16,24°C. Ces valeurs relativement basses restent dans les limites acceptables selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011), qui fixe une température maximale souhaitable de 25°C pour l'eau potable. Par conséquent, la température relevée dans l'ensemble des forages étudiés est considérée comme **acceptable** et ne présente aucun impact négatif sur la qualité de l'eau.

II.3.2 Potentiel d'hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène, ou pH, représente un indicateur fondamental permettant d'évaluer le caractère acide ou basique d'une solution aqueuse. Il est défini comme le logarithme décimal négatif de la concentration des ions hydrogène $[H^+]$ en solution.

L'échelle de pH s'étend de 0 à 14, avec une valeur de 7 correspondant à la neutralité. Un pH inférieur à 7 indique un milieu acide, tandis qu'un pH supérieur à 7 révèle un caractère basique ou alcalin.

La stabilité du pH joue un rôle crucial dans les systèmes biologiques et chimiques. Des variations importantes peuvent entraîner des perturbations physiologiques chez les organismes vivants, ainsi que des altérations des équilibres chimiques. Ainsi, le suivi et le contrôle rigoureux du pH s'avèrent essentiels dans le domaine de la gestion des ressources en eau.

Les valeurs des pH des 29 forages sont comprises entre 7.01 et 8.4, ceci indique que toutes les eaux de 29 forages ont des pH acceptables par rapport aux normes Algériennes (JORA 2014).

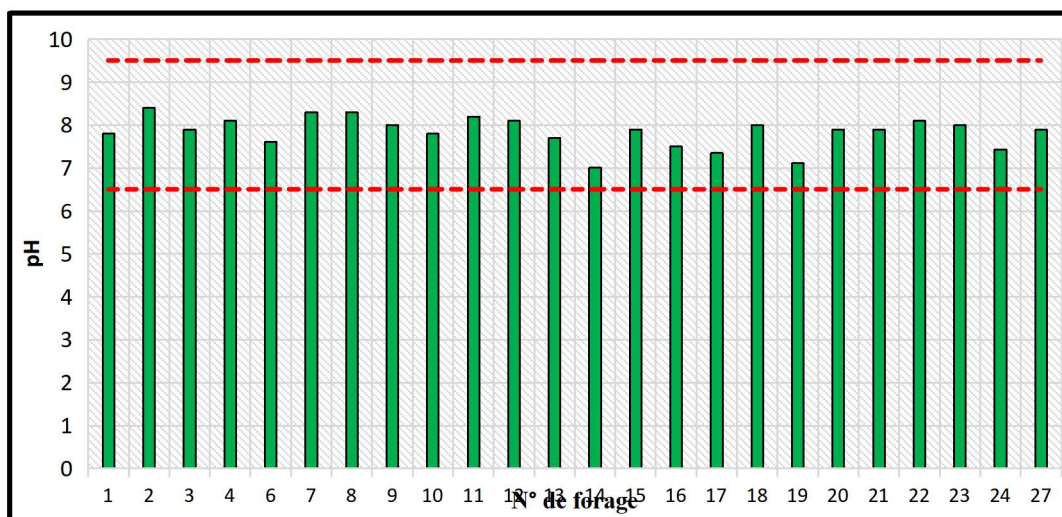


Figure N°28: Histogramme du pH de 24 forages.

Tableau N°24: Statistique du pH de 24 forages.

Paramètre	Unité	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
pH	-	7.01	8.4	7,835	0,3526	6.5 – 9.5

- Nous observons un écart type de (0.3526).
- pH minimum 7.01
- pH maximum 8.4
- pH moyenne 7.835

D'après la figure N° 30 les résultats obtenus du pH sont comme suivis : Les valeurs du pH mesurées dans les 24 forages varient entre 7,01 et 8,4, avec une moyenne de 7,835 et un écart type de 0,3526. Ces résultats indiquent que toutes les eaux analysées présentent un pH compris dans l'intervalle recommandé par la norme algérienne (JORA 2014), qui fixe les limites acceptables entre **6,5 et 9,5**. Ainsi, le pH des eaux souterraines étudiées est **acceptable**, traduisant un caractère neutre à légèrement basique, ce qui est favorable à la stabilité chimique et à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine.

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.

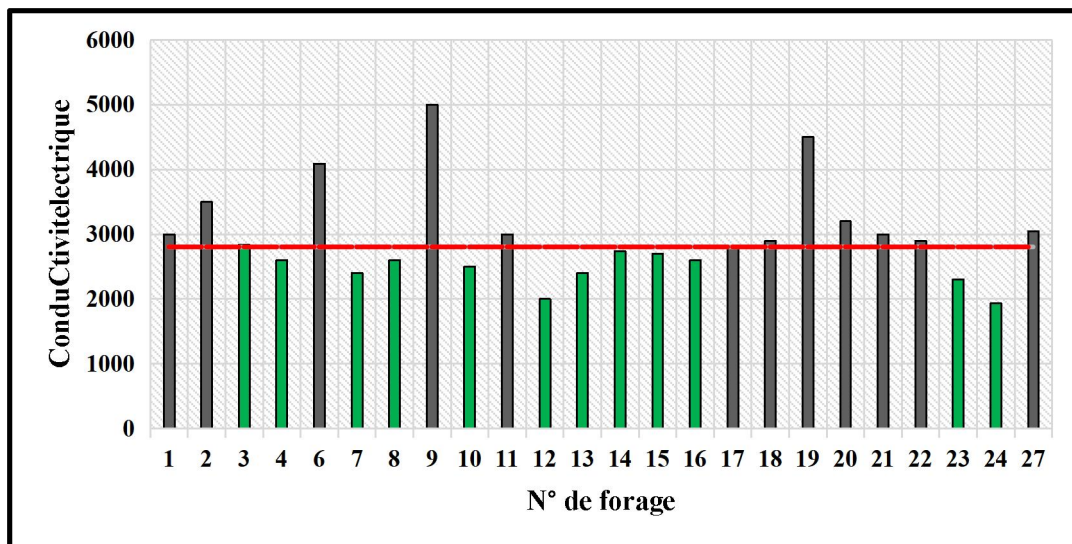


Figure N°29: Histogramme de la conductivité électrique de 24 forages.

D'après la figure N° 31 les résultats obtenus de la conductivité électrique sont comme suivis :

- 12 forages dépassent cette la valeur de la Norme (2800uS/cm), indiquant une salinité élevée probable de l'eau.
- Tandis que 12 forages présentent des valeurs inférieures ou égales à cette norme, reflétant une qualité d'eau relativement meilleure en termes de salinité.

Tableau N°25: Statistique de la CE de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
CE	uS/cm	1930	5000	2980,19	706,143	2800

- Un grand écart type observé (706.143 uS/cm).
- Conductivité électrique minimale est (1930 uS/cm)
- Conductivité électrique maximale est (5000 uS/cm)
- Conductivité électrique moyenne est (2980.19 uS/cm)

II.4 Les paramètres chimiques

II.4.2 Les Cations Majeurs

II.4.2.1 Le Calcium (Ca^{2+})

Le calcium (Ca^{2+}) est un constituant omniprésent dans la majorité des eaux naturelles. En tant qu'élément alcalino-terreux, il joue un rôle fondamental dans la détermination de la dureté de l'eau. Sa concentration dépend principalement de la nature géologique des formations traversées par l'eau souterraine.

La principale source de calcium est la dissolution des roches carbonatées, favorisée par la présence du dioxyde de carbone dans l'eau, selon la réaction chimique suivante :



Le calcium peut également provenir de la dissolution des formations gypseuses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), reconnues pour leur solubilité relativement élevée. Dans certains cas, des concentrations élevées de sulfate (SO_4^{2-}) peuvent être observées, entraînant une augmentation concomitante de la teneur en calcium dans les eaux.

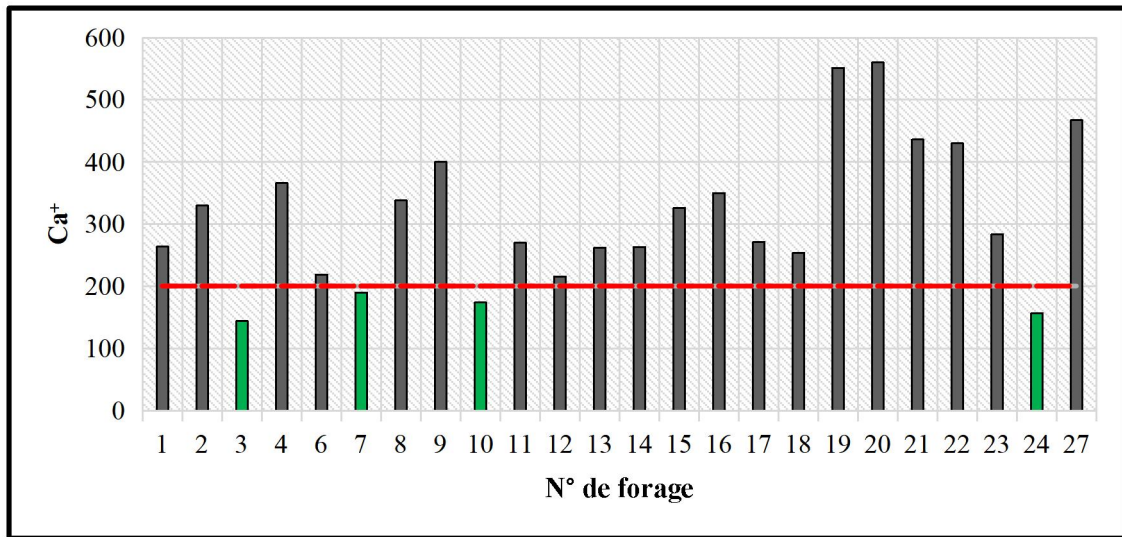


Figure N°30: Histogramme de Calcium de 24 forages.

Tableau N°26: Statistique de Calcium de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Ca ²⁺	mg/L	144	560	316,45	112,5891	200

Nous observons que les résultats de 20 forages du Calcium dépassent la norme (200mg/L), et les résultats de 04 forages sont inférieurs à la norme.

- Un grand écart type observé (112.5891mg/L).
- Quantité minimale de calcium observée est (144 mg/L).
- Quantité maximale de calcium observée est (560 mg/L).
- Quantité moyenne de calcium observée est (316.45mg/L).

II.4.2.2 Le Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium (Mg^{2+}) est un élément naturellement présent dans les eaux souterraines et superficielles, dont la concentration peut influencer plusieurs aspects de la qualité de l'eau. Dans le cadre de l'eau potable, des teneurs élevées en magnésium peuvent altérer le goût de l'eau et favoriser la formation de dépôts dans les installations hydrauliques et les appareils électroménagers.

En agriculture, la présence de magnésium en excès dans l'eau d'irrigation peut avoir des effets notables sur la croissance végétale et entraîner des déséquilibres dans la structure et la fertilité des sols. Ainsi, le suivi régulier de ce paramètre s'avère essentiel, notamment dans des zones

sensibles comme la région de El Ghrous, afin de préserver la qualité des ressources en eau et de garantir leur usage durable.

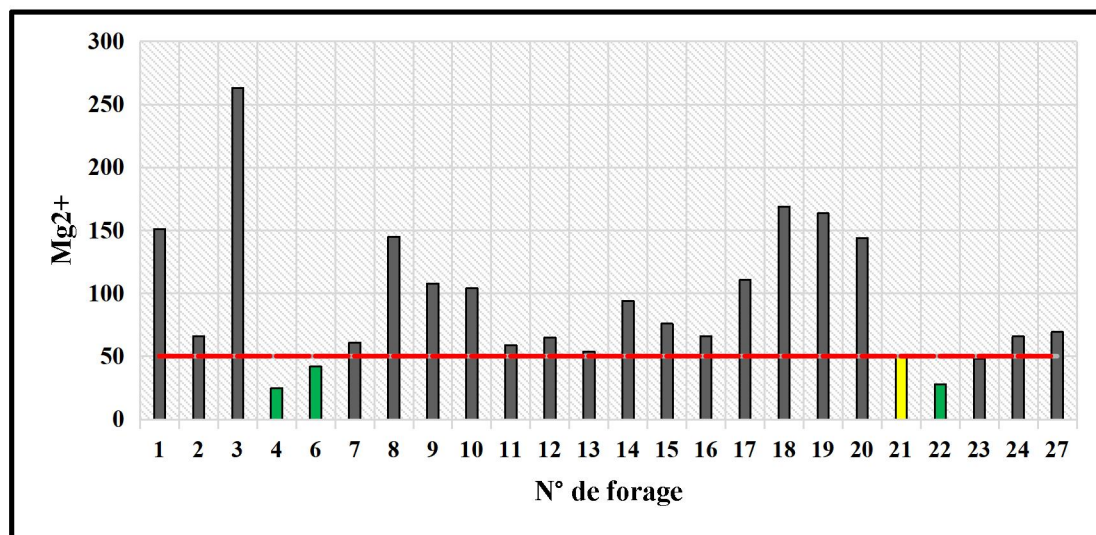


Figure N°31: Histogramme de Magnésium de 24 forages.

D'après l'histogramme du Magnésium (Mg^{2+}), nous constatons que presque la totalité des forages présentent des concentrations supérieures à la norme algérienne fixée à 50 mg/L. En effet, seuls cinq forages (4, 6, 20, 21 et 22) ont des teneurs inférieures ou égales à cette limite. Tous les autres forages dépassent cette valeur, ce qui indique une minéralisation importante en magnésium dans la majorité des eaux échantillonnées.

Tableau N°27: Statistique de Magnésium de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Mg ²⁺	mg/L	25	263	96,75	54,706	50

- Un grand écart type observé (54.706 mg/L).
- Quantité minimale de magnésium observée est (25mg/L).
- Quantité maximale de magnésium observée est (263 mg/L).
- Quantité moyenne de magnésium observée est (96.75mg/L).

II.4.2.3 Le Sodium (Na^{+})

Lorsque le sodium est présent dans les eaux souterraines, il peut entraîner diverses réactions en fonction de plusieurs paramètres, notamment sa concentration, le pH, et la présence d'autres éléments dissous.

Des teneurs élevées en sodium altèrent la potabilité de l'eau à cause d'un goût excessivement salé, et peuvent également dégrader la qualité des sols agricoles par accumulation dans la matrice du sol.

Ainsi, la présence de sodium dans les eaux souterraines constitue un facteur à surveiller, car elle

peut générer des effets physico-chimiques complexes et compromettre à la fois la qualité de l'eau et celle de l'environnement.

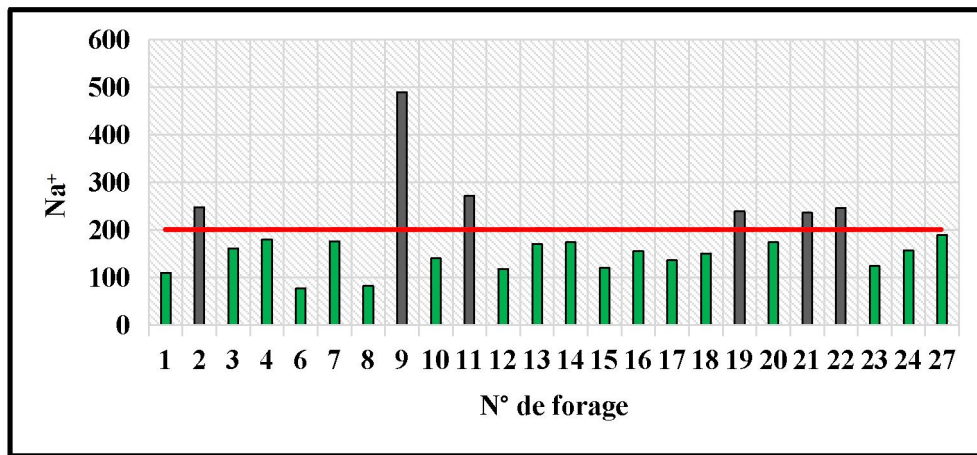


Figure N°32: Histogramme de Sodium de 24 forages.

D'après l'histogramme du Sodium (Na^+), nous constatons que 16 forages sur 24 dépassent la norme algérienne fixée à 200 mg/L. Les forages 2, 9, 11, 19, 21 et 22 présentent des teneurs particulièrement élevées en sodium. En revanche, seuls 8 forages (1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 23, 24 et 27) sont conformes à la norme. Cette situation suggère une possible contamination ou une origine géologique riche en sodium pour une grande partie des échantillons analysés.

Tableau N°28: Statistique de Sodium de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Na^+	mg/L	77	490	188,154	82,164	200

- Un grand écart type observé (82.164mg/L).
- Quantité minimale de sodium observée est (77 mg/L).
- Quantité maximale de sodium observée est (490 mg/L).
- Quantité moyenne de sodium observée est (188.154 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.

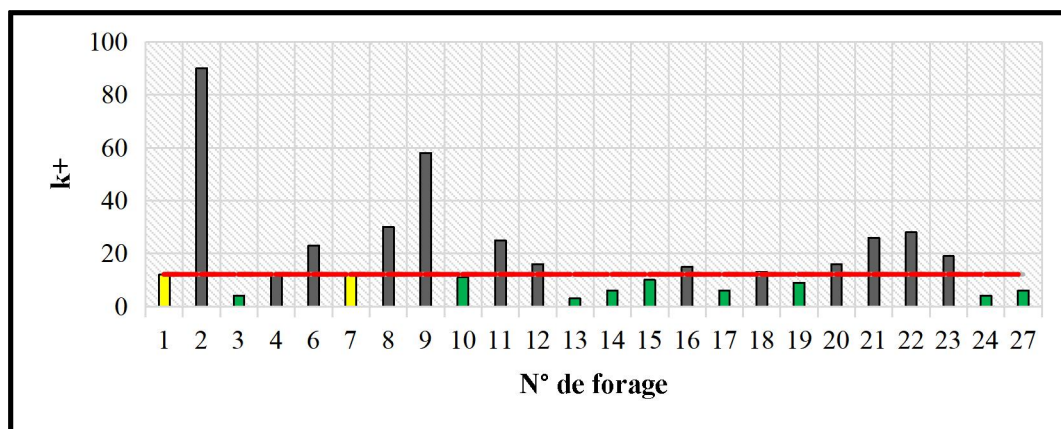


Figure N°33: Histogramme de Potassium de 24 forages.

D'après l'histogramme du potassium (K^+), nous constatons que seuls **forages (N°3, 10,13, 14,15,17,19,24 et 27)** respectent la norme algérienne fixée à **12 mg/L**.

- Le forage N°1 et 7 est conforme, étant exactement à la limite.
- En revanche, **14 forages** présentent des concentrations **supérieures à la norme**, ce qui peut refléter une contamination possible d'origine anthropique (eaux usées, engrais...) ou naturelle (origine géologique des roches traversées). Une surveillance plus approfondie est recommandée pour ces forages.

Tableau N°29: Statistique de Potassium de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
K	mg/L	3	90	21,0385	18,863	12

- Un grand écart type observé (18.863 mg/L).
- Quantité minimale de potassium observée est (03 mg/L).
- Quantité maximale de potassium observée est (90 mg/L).
- Quantité moyenne de potassium observée est (21.0385 mg/L).

II.4.3 Les Anions Majeurs

II.4.3.1 Bicarbonate (HCO_3^-)

La présence du bicarbonate (HCO_3^-) dans les eaux souterraines est fréquente et peut provenir de diverses sources. Ce composé se forme souvent lorsqu'il y a dissolution du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'eau, générant ainsi de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui se dissocie ensuite en ions bicarbonate (HCO_3^-) et hydronium (H_3O^+).

Les eaux souterraines qui circulent dans des formations calcaires ou dolomitiques peuvent contenir des quantités significatives de bicarbonate, car ces roches sont riches en carbonate de calcium (CaCO_3) ou carbonate de magnésium (MgCO_3), qui se dissolvent facilement dans l'eau pour former des ions bicarbonate.

Bien que les eaux souterraines riches en bicarbonate puissent parfois avoir un goût légèrement amer ou alcalin, elles ne posent généralement pas de risques pour la santé à des concentrations standards. Cependant, des niveaux élevés de bicarbonate peuvent entraîner des problèmes de corrosion dans les réseaux de distribution d'eau.

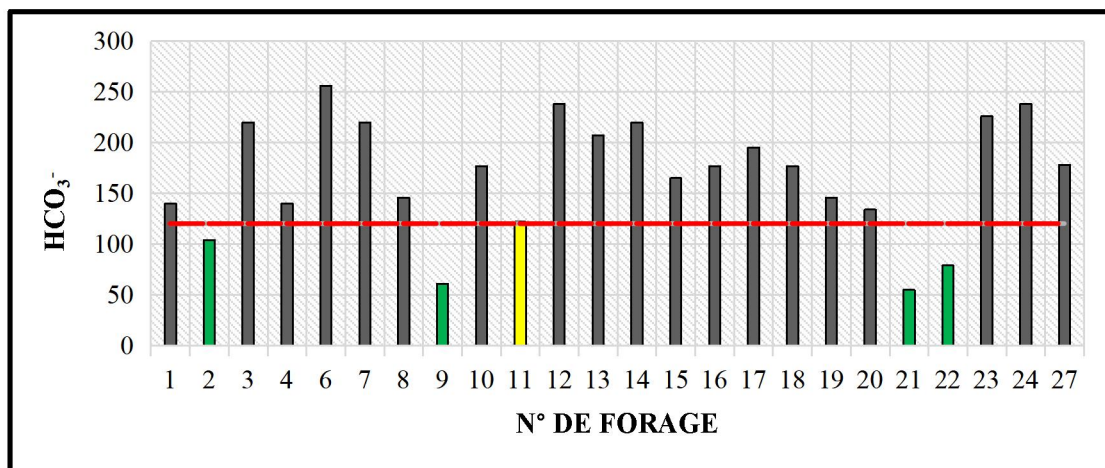


Figure N°34: Histogramme de Bicarbonate de 24 forages.

- D'après l'histogramme du bicarbonate (HCO_3^-), seuls trois forages (N° 2 ,9, 21 et 22) présentent des concentrations inférieures à la norme algérienne (120 mg/L),
- Un forage (N° 10) est légèrement conforme à la limite.
- En revanche, vingt forages dépassent cette norme, ce qui indique une forte minéralisation de l'eau, probablement liée à la dissolution des roches carbonatées dans l'aquifère. Cela peut influencer le pH et contribuer à l'alcalinité globale de l'eau.

Tableau N°30: Statistique de Bicarbonate de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
HCO ₃ -	mg/L	55	256	166,6038	55,383	120

- Un grand écart type observé (55.383 mg/L).
- Quantité minimale de bicarbonate observée est (55 mg/L).
- Quantité maximale de bicarbonate observée est (256 mg/L).
- Quantité moyenne de bicarbonate observée est (166.6038 mg/L).

II.4.3.2 Sulfate (SO_4^{2-})

Le sulfate est un composé chimique couramment retrouvé dans les eaux souterraines. Il provient principalement de la dissolution de minéraux contenant du soufre, comme le gypse (sulfate de calcium) et la pyrite (sulfure de fer). En outre, les activités humaines telles que l'exploitation minière, l'agriculture et les processus industriels peuvent également contribuer à l'accumulation de sulfate dans l'eau souterraine.

La présence de sulfate dans les eaux souterraines peut avoir plusieurs effets importants. À des concentrations élevées, il peut altérer la qualité de l'eau potable en provoquant des goûts et des odeurs désagréables. Il peut également avoir un effet laxatif sur les personnes qui consomment cette eau. Par ailleurs, les sulfates peuvent interagir avec d'autres substances présentes dans l'eau pour former des sulfures, entraînant ainsi des problèmes d'odeur, de corrosion et de précipitation dans les réseaux de distribution d'eau.

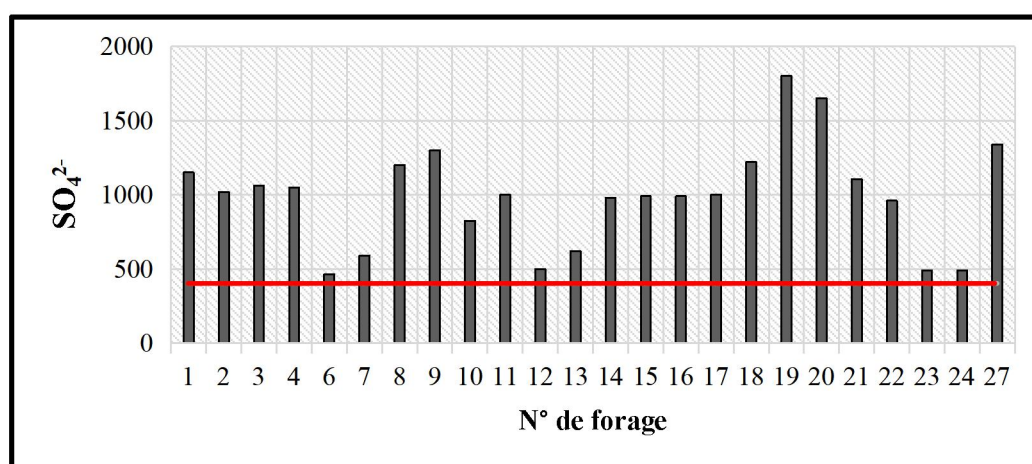


Figure N°35: Histogramme de Sulfate de 24 forages.

D'après l'historgramme des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}), tous les forages dépassent largement la norme algérienne de 400 mg/L. Cela signifie que la totalité des 24 forages est non conforme pour ce paramètre.

Tableau N°31: Statistique de Sulfate de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
SO_4^{2-}	mg/L	465	1800	1002,35	341,36	400

- Un grand écart type observé (341.36 mg/L).
- Quantité minimale de sulfate observée est (465 mg/L).

- Quantité maximale de sulfate observée est (1800 mg/L).
- Quantité moyenne de sulfate observée est (1002.35mg/L).

II.4.3.3 Chlorure (Cl⁻)

Le chlorure présent dans les eaux souterraines peut avoir des origines variées, tant naturelles qu'anthropiques. Les principales sources naturelles incluent la dissolution de dépôts salins, les intrusions marines, ainsi que les minéraux riches en chlorure comme l'halite.

Les apports d'origine humaine proviennent notamment des activités agricoles, industrielles et de l'usage de sels de voirie en période hivernale. Ces sources peuvent significativement augmenter les concentrations en chlorure dans les nappes phréatiques.

La présence de chlorure peut altérer la qualité de l'eau souterraine, particulièrement lorsqu'il s'agit d'eau destinée à la consommation ou à l'irrigation. À des concentrations élevées, le chlorure donne un goût salé désagréable à l'eau et peut provoquer un effet laxatif.

En agriculture, des teneurs excessives en chlorure peuvent nuire à certaines cultures sensibles au sel, compromettant ainsi la croissance végétale et la productivité des sols.

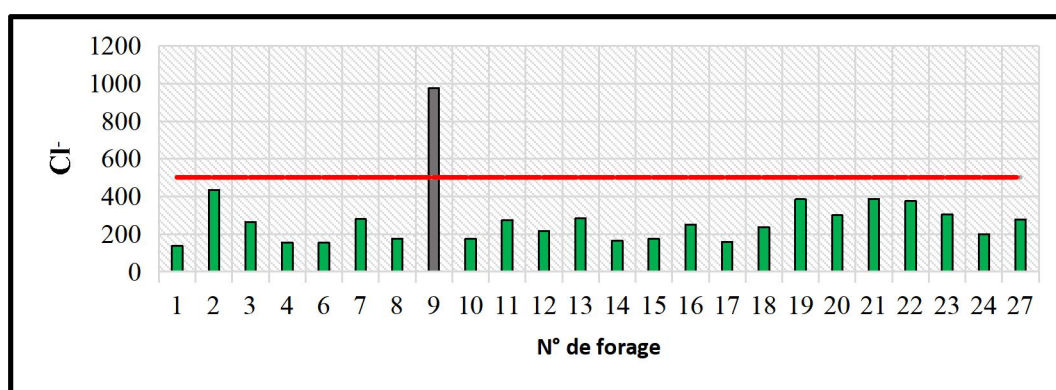


Figure N°36: Histogramme de Chlorure de 24 forages.

Selon l'histogramme de Chlorure nous observons que, 23 forages leurs résultats sont inférieurs à la norme et 01 forages leurs résultats sont supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N°32: Statistique de Chlorure de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Cl ⁻	mg/L	138	975	302,385	166,48	500

- Un grand écart type observé (166.48mg/L).
- Quantité minimale de chlorure observée est (138 mg/L).
- Quantité maximale de chlorure observée est (975 mg/L).
- Quantité moyenne de chlorure observée est (302.385mg/L).

II.4.3.4 Nitrate (NO_3^-)

La contamination des eaux souterraines par les nitrates constitue une problématique environnementale préoccupante. Les nitrates, formés d'azote et d'oxygène, sont couramment employés comme fertilisants dans le secteur agricole.

En cas d'usage excessif ou de mauvaise gestion des engrais, ces composés peuvent s'infiltrer à travers le sol et atteindre les nappes phréatiques. Cette infiltration résulte souvent du lessivage des sols par les eaux de pluie ou d'irrigation.

Des niveaux élevés de nitrates dans l'eau souterraine peuvent engendrer des risques pour la santé humaine, notamment pour les nourrissons. En outre, ils peuvent également perturber les écosystèmes aquatiques en favorisant l'eutrophisation.

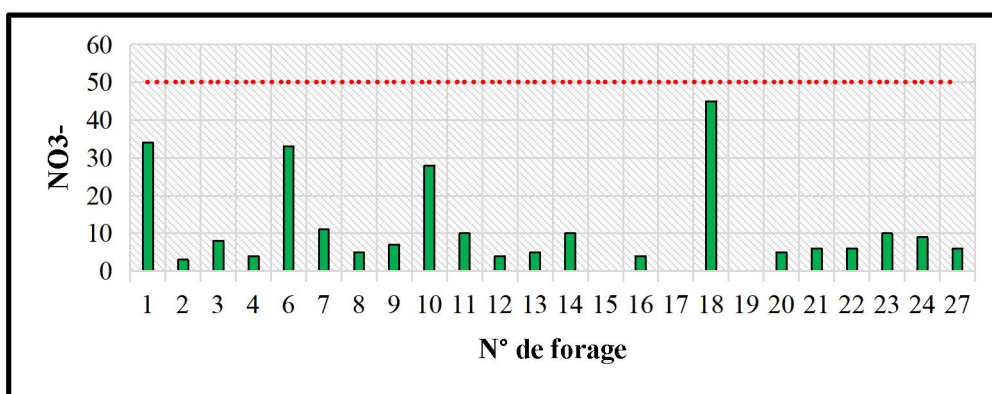


Figure N°37: Histogramme de Nitrate de 24 forages.

D'après l'histogramme du Nitrate les résultats sont inférieurs à la norme Algérienne.

Tableau N°33: Statistique de Nitrate de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
NO ₃ -	mg/L	0	45	11,46	11,62	50

➤ **Analyse des résultats :**

- **Valeur minimale (0 mg/L) :** Certains forages présentent des concentrations nulles en nitrates, ce qui indique une bonne qualité de l'eau ou l'absence de sources de contamination.
- **Valeur maximale (45 mg/L) :** Bien que cette valeur reste inférieure à la limite réglementaire de 50 mg/L, elle montre que certains forages présentent des concentrations élevées de nitrates.
- **Valeur moyenne (11,46 mg/L) :** La concentration en nitrates est généralement modérée dans la plupart des forages.
- **Écart type (11,62mg/L) :** L'écart important indique une grande variabilité dans les concentrations de nitrates entre les forages, ce qui pourrait être lié à des facteurs géographiques ou anthropiques.

II.4.4 Analyse statistique des paramètres physico-chimique

o 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°34: Résultats de matrice de corrélation.

Paramètres	T°C	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	NO3
T°C	1										
pH	0,2335	1									
CE	-0,0423	-0,1240	1								
Ca	0,3761	-0,0384	0,4952	1							
Mg	-0,2071	-0,1522	0,2066	-0,0523	1						
Na	0,0235	0,1300	0,6177	0,3902	-0,0643	1					
K	0,0588	0,5064	0,4663	0,2006	-0,1726	0,5258	1				
HCO3	-0,2944	-0,3399	-0,4647	-0,6380	0,0519	-0,6671	-0,5615	1			
SO4	0,1224	-0,1116	0,5546	0,7621	0,5156	0,3653	0,0997	-0,5926	1		
Cl	0,1073	0,1987	0,6600	0,3835	0,0049	0,9139	0,6052	-0,5813	0,2956	1	
NO3	0,2119	0,0208	0,0485	-0,4031	0,2038	-0,2687	-0,1089	0,1947	-0,1493	-0,2280	1

o Interprétation des résultats de Matrice de corrélation :

L'analyse de la matrice de corrélation entre les différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines a permis de mettre en évidence plusieurs relations significatives, positives et négatives, traduisant les interactions géochimiques ainsi que l'influence des sources de minéralisation. Parmi les corrélations positives les plus marquées, on note une forte relation entre le chlorure et le sodium (0,91), suggérant une origine commune, probablement liée à la dissolution de l'halite. Une corrélation notable a également été observée entre le sulfate et le calcium (0,76), indiquant une possible influence de la dissolution du gypse. D'autres corrélations positives ont été enregistrées entre le chlorure et la conductivité électrique (0,66), ainsi qu'entre le sodium et la conductivité électrique (0,62), ce qui reflète la contribution de ces ions à la salinité globale de l'eau. Le sulfate montre également une corrélation avec la conductivité (0,55)

et le magnésium (0,52). De plus, une relation a été notée entre le potassium et le sodium (0,53), traduisant un comportement géochimique similaire. Des corrélations positives ont également été relevées entre le potassium et le pH (0,51), entre le calcium et la conductivité électrique (0,50), ainsi qu'entre le potassium et la conductivité (0,47).

En ce qui concerne les corrélations négatives, une relation inverse marquée a été observée entre le bicarbonate et le sodium (-0,67), traduisant une opposition entre les milieux bicarbonatés et sodiques, probablement en lien avec des processus d'échange ionique ou des origines géochimiques différentes. Une corrélation négative a également été relevée entre le bicarbonate et le calcium (-0,64), ainsi qu'entre le sulfate et le bicarbonate (-0,59), ce qui reflète des conditions géochimiques contrastées. De plus, une corrélation négative a été observée entre le chlorure et le bicarbonate (-0,58), indiquant une opposition entre les eaux salines et les eaux riches en carbonates. Enfin, le bicarbonate présente une corrélation négative avec le potassium (-0,56), suggérant une dynamique géochimique distincte entre ces deux paramètres.

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

L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) représente un outil permettant d'évaluer l'état global de l'eau dans une région donnée, en l'occurrence celle de El Ghrous. Il repose sur l'intégration de plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques afin de fournir une estimation de la qualité écologique de l'eau et de sa sécurité pour divers usages tels que l'alimentation humaine, l'irrigation, ou encore la protection de la faune aquatique.

□ Dans notre cas l'étude de qualité de l'eau de 24 forages de El Ghrous, les valeurs calculées à la base de 10 paramètres sont montrées comme suite :

Tableau A -N° 35: Valeurs de WQI de 24 forages.

N°	Résultats de WQI
1	139,2508
2	474,2444
3	124,7386
4	102,4486
6	156,8415
7	106,0759
8	217,0055
9	352,9573
10	115,5334
11	170,4491
12	123,0323

13	63,8964
14	93,1008
15	103,6935
16	128,1852
17	93,6618
18	155,2944
19	144,8519
20	169,1881
21	177,5978
22	180,3048
23	137,4493
24	66,8830
27	92,8963

Tableau B -N°36: 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	8,70%	13, 24	Eau potable avec traitement obligatoire/ Irrigation
76-100	Mauvaise	3	13,00%	14, 17, 27 .	Une possibilité d'utilisation à l'irrigation avec des conditions fermes.
> 100	Très Mauvaise	19	78,30%	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23	Utilisation interdite (Consommation humaine ou irrigation)

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

- **02 forages (8,7%)** ont un WQI compris entre **51 et 75**, ce qui indique une qualité d'eau modérée. L'eau de ces forages (**13, 24**) nécessite un traitement avant la consommation humaine, mais elle est adaptée à l'irrigation.
- **03 forages (13,0%)** ont un WQI compris entre **76 et 100**, indiquant une qualité mauvaise. L'eau de ces forages (**14, 17, 27**) ne peut pas être utilisée pour la consommation humaine, mais peut être exploitée pour l'irrigation sous conditions strictes.
- **19 forages (78,3%)** présentent un WQI supérieur à **100**, ce qui signifie une qualité d'eau très mauvaise. L'eau de ces forages n'est pas autorisée à la consommation humaine ni à l'irrigation.

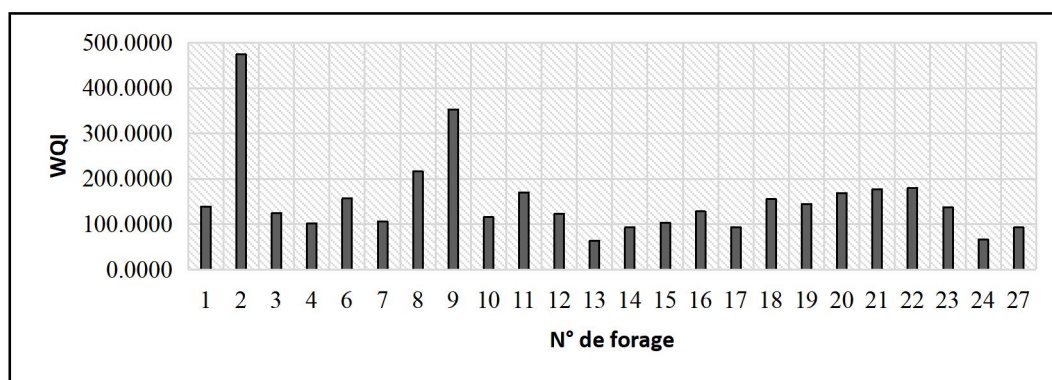


Figure N°38: Histogramme de WQI de 24 forages.

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.), conçu par le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon, constitue un outil essentiel dans l'analyse des données hydrochimiques. Ce programme, connu sous le nom de "Diagrammes", permet la réalisation d'analyses statistiques et graphiques, facilitant ainsi l'interprétation des processus géochimiques affectant les eaux souterraines.

Particulièrement adapté à la classification géochimique des eaux et des roches carbonatées, il offre diverses représentations visuelles, comme les diagrammes ternaires, qui permettent une lecture claire et approfondie des données.

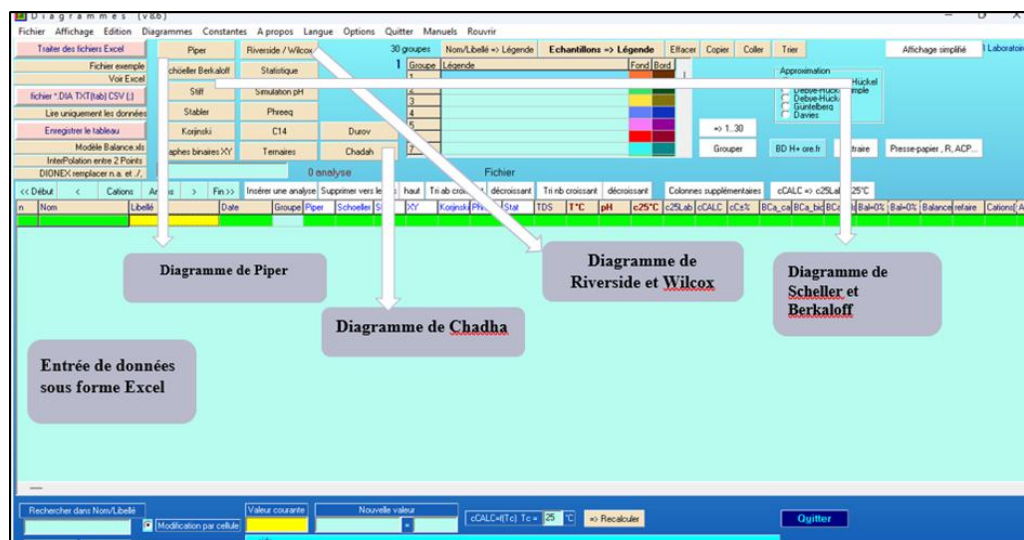


Figure N°39: Interface de logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A) version 8.44.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé la version 8.44 du logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.) pour élaborer différents types de diagrammes, notamment :

A - Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est un outil graphique couramment utilisé en hydrochimie pour l'interprétation des résultats analytiques des eaux souterraines ou superficielles. Il permet de représenter simultanément les concentrations relatives des principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) sous forme d'un graphique unique.

Ce diagramme comprend trois zones :

- Deux triangles distincts représentant séparément les cations et les anions.
- Un losange central où les coordonnées issues des deux triangles sont projetées pour offrir une synthèse visuelle.

L'un des intérêts majeurs de ce diagramme réside dans sa capacité à regrouper visuellement des analyses présentant des faciès chimiques similaires, ce qui le rend très utile pour le suivi temporel de la qualité de l'eau.

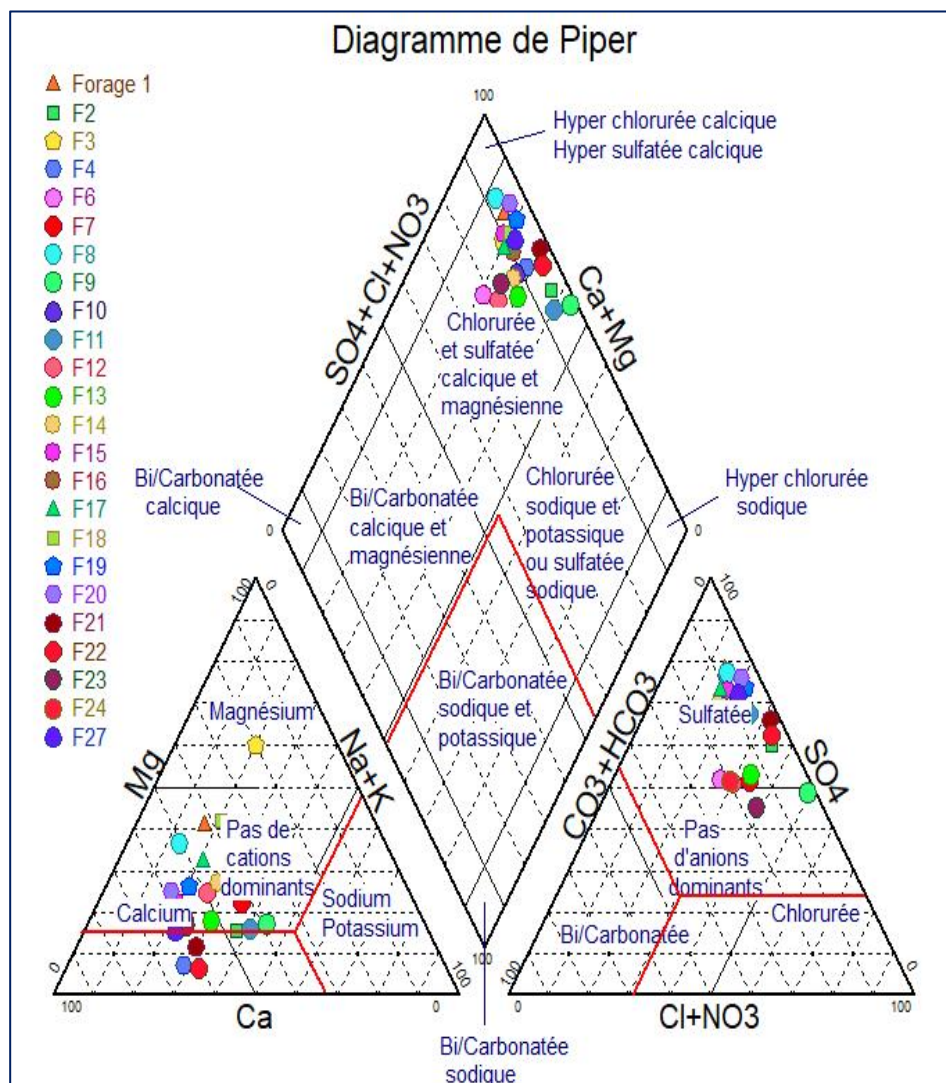


Figure N°40: Diagramme de Piper pour 24 forages de EL Ghrous.

o Interprétation des résultats de diagramme de Piper :

La figure N° 42 montre les faciès chimiques des valeurs analysés dans les 24forages de El Ghrous selon le diagramme de Piper qui présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

Nous observons que l'ensemble des eaux des 24 forages étudiés, leurs faciès est caractérisé par:

- **Les cations dominants :** Comme nous avons souligné, les points tracés dans le diagramme triangulaire inférieur gauche indiquent clairement que le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) sont les cations dominants, avec un ordre d'abondance général de $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$.
- **Les anions dominants :** De même, les points tracés dans le diagramme triangulaire inférieur droit montrent que le sulfate (SO_4^{2-}) et le chlorure (Cl^-) sont les anions dominants, suivant la tendance $r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^-$.

B- Diagramme de Schoeller et Berkaloff.

Le diagramme de Schoeller et Berkloff, 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 semilogarithmique 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 Schoeller et Berkloff 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.

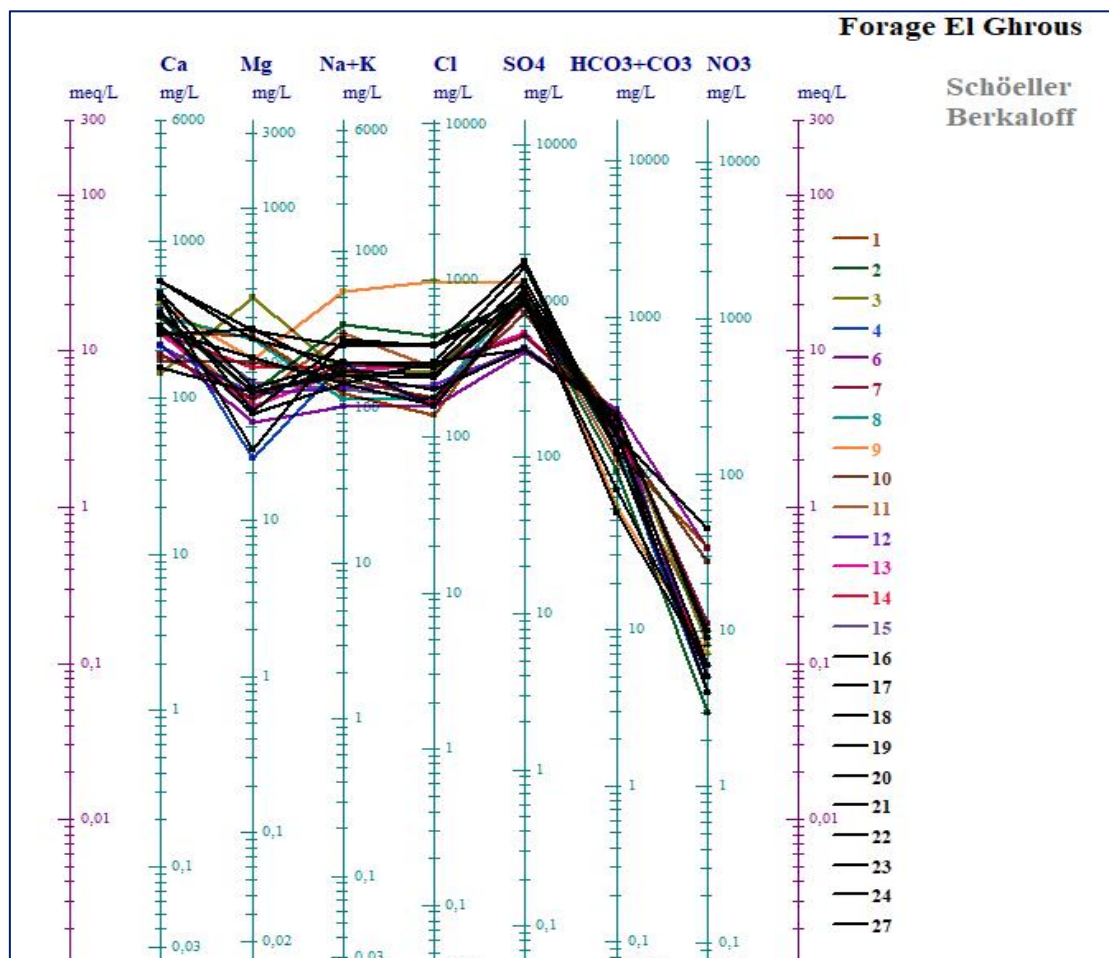


Figure N°41: Diagramme de Schoeller et Berkloff pour 24 forages d'El Ghrous.

- Interprétation des résultats de diagramme de Schoeller et Berkloff :

Ce diagramme à échelle logarithmique met en évidence deux faciès chimiques, confirmant les observations faites sur le diagramme de Piper.

- Éléments dominants : SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} .
- Faciès chimique: Chloruré sodique, Sulfaté calcique magnésique.

C - Diagramme de Riverside.

Le diagramme de Riverside constitue un outil analytique fondamental pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation. Il est largement utilisé par les spécialistes en gestion des ressources en eau, les ingénieurs agronomes et les experts en irrigation. Ce diagramme permet de juger rapidement de l'aptitude de l'eau à l'irrigation en tenant compte de deux paramètres essentiels : la conductivité électrique (CE), indicateur de salinité, et le rapport d'adsorption du sodium (SAR), indicateur de sodicité. Ces deux facteurs influencent directement la structure du sol et la productivité agricole.

Le diagramme associe les valeurs de CE et de SAR dans une grille de classification qui facilite l'interprétation de la qualité de l'eau. Afin de l'adapter aux réalités des zones arides, notamment sahariennes, une classe supplémentaire (C5) a été ajoutée pour inclure les eaux très salines dont la conductivité dépasse 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, rendant ainsi le diagramme plus pertinent pour les conditions locales.

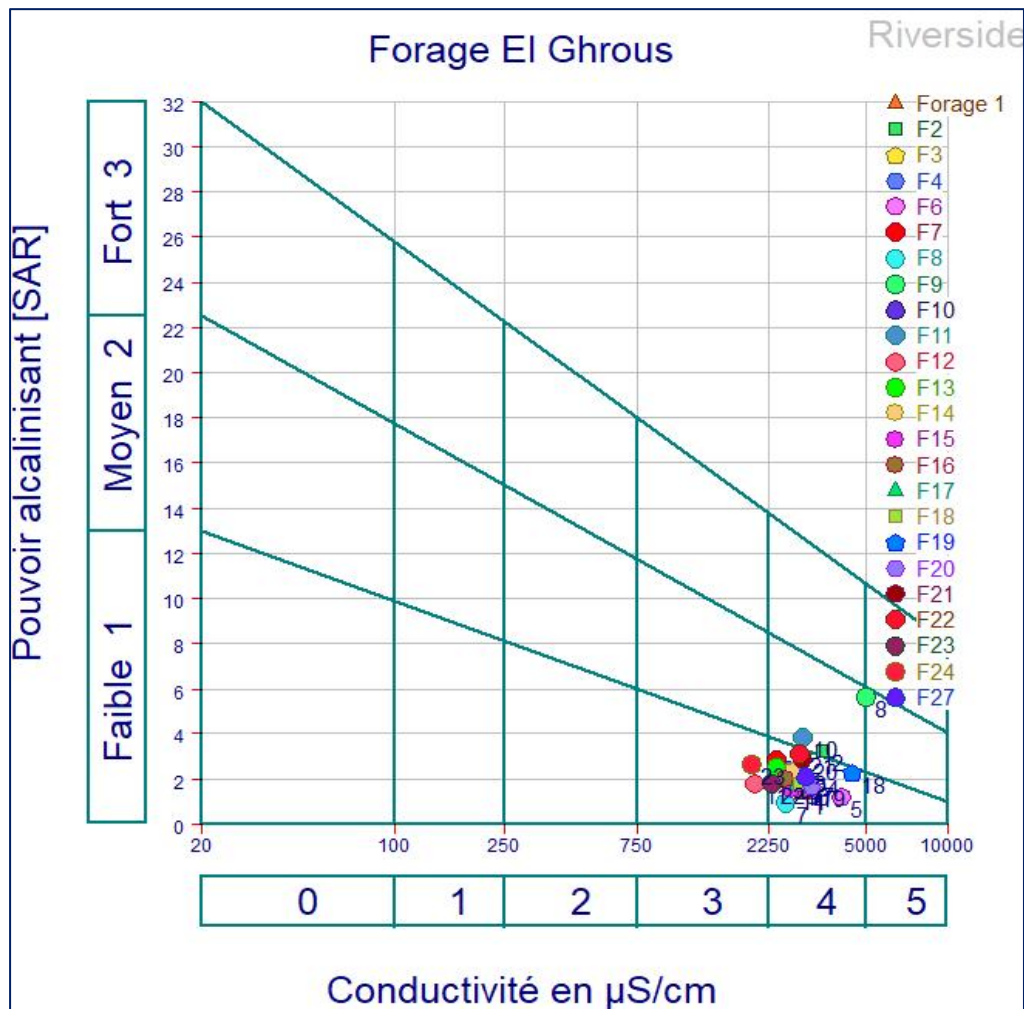


Figure N°42 : Diagramme de Riverside pour les 24 forages d'El Ghrous.

Tableau N°37: 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°38: 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 :

D'après le diagramme de Riverside, les eaux des 24 forages étudiés se répartissent principalement en deux classes :

1. La classe C4S1 19 Forages (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F10, F11, F13, F14, F15, F16, F18, F19, F21, F23 et F24) : Eau de qualité médiocre à mauvaise, à utiliser avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles. Son utilisation pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou un apport de gypse.
2. La classe C3S1 05 forages (F8, F12, F17, F20 et F22) : Eau de qualité moyenne à médiocre, à utiliser avec précaution. Elle nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou un apport de gypse.

D- Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox est un outil d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation, fondé sur l'analyse conjointe de deux paramètres principaux : le rapport d'absorption en sodium (SAR) et la conductivité électrique (CE) des ions dissous dans l'eau. Ces deux indicateurs permettent de déterminer le potentiel de dégradation des sols par accumulation de sodium et de sels dissous.

Le diagramme classe les eaux en cinq catégories qualitatives : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise. Cette classification facilite l'interprétation rapide de la qualité des eaux en fonction de leur impact probable sur les sols et les cultures, contribuant ainsi à une gestion plus rationnelle et durable de l'irrigation.

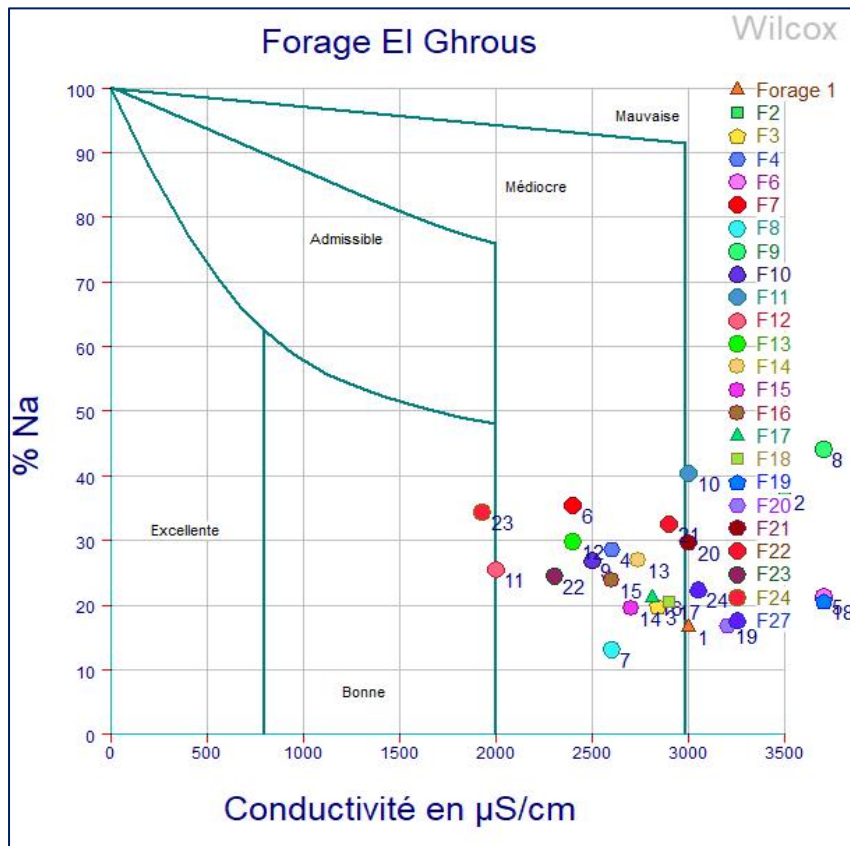


Figure N°43: Diagramme de Wilcox pour 24 forages de EL Ghrous

D'après le diagramme de Wilcox, les eaux des 24 forages étudiés se répartissent en quatre classes de qualité pour l'irrigation :

1. Un forage (F15) présente une eau de bonne qualité pour l'irrigation.
2. Dix-neuf forages présentent une eau de qualité médiocre pour l'irrigation.
3. Trois forages présentent une eau de mauvaise qualité pour l'irrigation.
4. Trois forages (F5, F8 et F18) se situent hors de la classification de Wilcox.

II.7 Les aptitudes des eaux d'irrigation

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

Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) est un indicateur couramment utilisé en agriculture irriguée et en hydrologie pour évaluer le risque de sodicité lié à l'utilisation de l'eau d'irrigation ou à la composition chimique du sol. Il est calculé selon la formule suivante :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

où les concentrations des ions sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) sont exprimées en milliéquivalents par litre (meq/L).

Le SAR permet d'estimer la tendance de l'eau à favoriser l'accumulation de sodium échangeable dans le sol, un phénomène pouvant altérer la structure physique du sol. Des valeurs élevées de SAR sont généralement associées à un risque accru de sodicité, pouvant entraîner une dispersion des particules d'argile, une réduction de la perméabilité, une mauvaise infiltration de l'eau et, par conséquent, une baisse de la productivité agricole.

Tableau N°39 : Résultats des SAR de 24 forages

ID DE FORAGE	SAR	<10	10-18	18-28	>28
1	7,63631	+			
2	17,62459		+		
3	11,28609		+		
4	12,87357		+		
6	6,74040	+			
7	15,71053		+		
8	5,27661	+			
9	30,74533				+
10	11,87465		+		
11	21,20733			+	
12	9,95506	+			
13	13,52447		+		
14	13,01628		+		
15	8,46415	+			
16	10,81665		+		
17	9,83920	+			
18	10,31421		+		
19	12,64090		+		
20	9,27423	+			
21	15,13941		+		
22	16,25614		+		
23	9,624266	+			
24	9,62427	+			
27	14,86866		+		

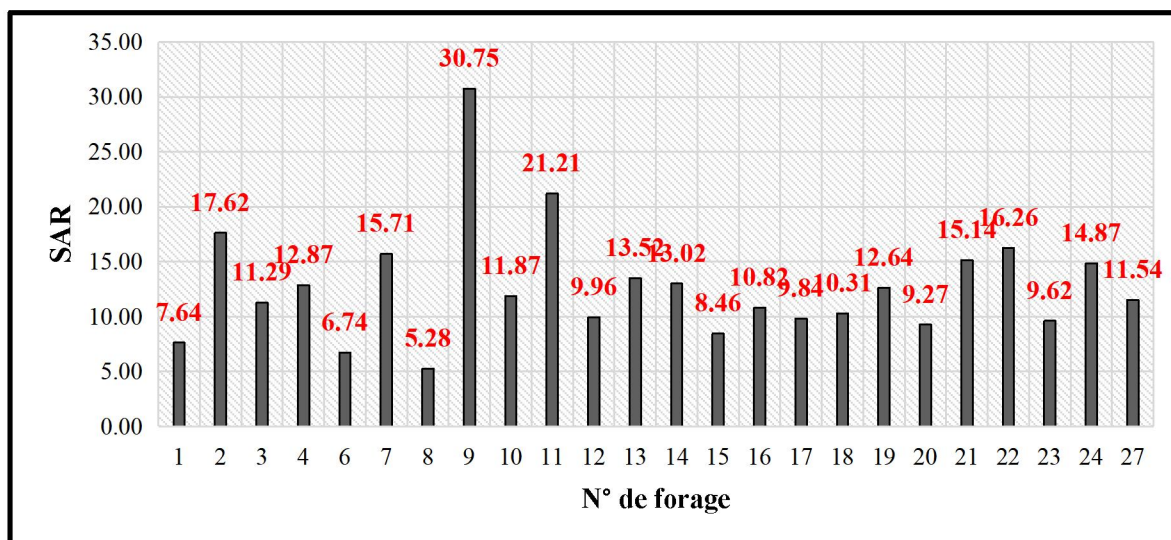


Figure N°44: Histogramme de SAR pour 24 forages.

La Figure N°46 montre une répartition contrastée des valeurs du Sodium Adsorption Ratio (SAR) pour les 24 forages de la région d'El Ghrous. Certains forages (n° 1, 6, 8 et 12) présentent des valeurs inférieures à 10, traduisant une faible sodicité et une eau relativement adaptée à l'irrigation. La majorité des forages affichent des SAR compris entre 10 et 18, indiquant une sodicité modérée qui nécessite des pratiques agricoles adaptées (drainage, amendements). Enfin, deux forages N° 11 (21,21) et N° 9 (30,75) présentent une sodicité élevée à très élevée, posant un risque important pour la structure des sols.

Interprétation des résultats du SAR :

- 1. 08 forages présentent un SAR faible (<10) (S01) :** Ces eaux peuvent généralement être utilisées sur la plupart des sols avec un faible risque d'accumulation de sodium échangeable. Les forages concernés sont : 1, 8, 6, 12, 15, 17, 20, 24
- 2. 14 forages présentent un SAR moyen (10-18) (S02) :** Ces eaux peuvent poser des problèmes dans les sols à texture fine sans gypse, surtout en l'absence de lessivage et avec une forte capacité d'échange cationique. Les forages concernés sont : 2, 3, 4, 7, 10, 12, 13, 14, 16, 21, 22, 27
- 3. Un forage (N° 11) présente un SAR élevé (18-28) (S03) :** L'irrigation avec cette eau peut entraîner 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. Un forage (N°09) présente un 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 un indicateur utilisé pour mesurer la proportion de sodium par rapport aux autres cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) dans une solution, notamment dans l'eau d'irrigation ou les extraits de sol. Elle permet d'évaluer le risque de sodicité et ses effets possibles sur la structure du sol. Cette teneur est exprimée en pourcentage de la somme totale des cations, selon la formule suivante :

$$Na\% = \frac{(Na^{+} + K^{+})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+})} \times 100$$

Tableau N°40: Résultats des Na% de 24 forages

ID DE FORAGE	Na%	<20	20-40	40-60	60-80
1	22,71881		+		
2	46,04905			+	
3	28,84615		+		
4	32,93310		+		
6	27,70083		+		
7	42,82460			+	
8	18,82353	+			
9	51,89394		+		
10	35,19814		+		
11	47,44409			+	
12	32,28916		+		
13	35,37832		+		
14	33,49460		+		
15	24,43609		+		
16	29,13118		+		
17	27,09355		+		
18	27,81570		+		
19	25,75446		+		
20	21,25280		+		
21	35,02674		+		
22	37,43169		+		
23	30,11		+		
24	30,10526		+		
27	41,92818			+	

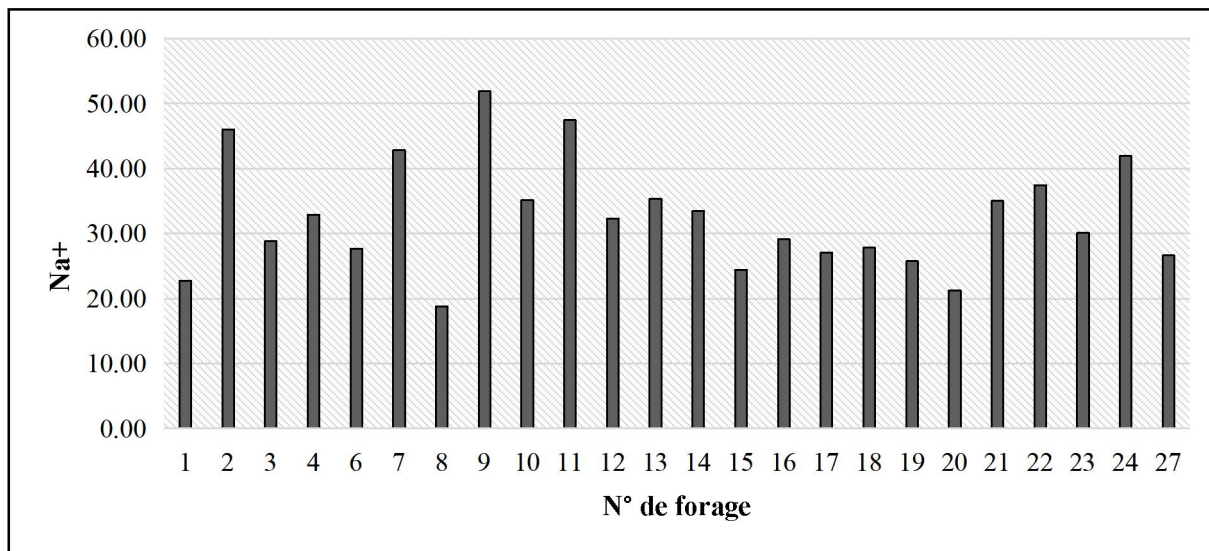


Figure N°45: Histogramme des Na% de 24 forages.

-Interprétation des résultats des Na% :

- **01 forages présentent un Na% < 20 :** Ces eaux sont d'excellente qualité pour l'irrigation. Les forages concernés sont : 8
- **19 forages présentent un Na% entre 20 et 40 :** Ces eaux sont de bonne qualité pour l'irrigation. Les forages concernés sont : 1, 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24.
- **04 forages présentent un Na% entre 40 et 60 :** Ces eaux sont de qualité admissible pour l'irrigation. Les forages concernés sont : 2, 7, 11, 27

II.7.3 L'indice de perméabilité (PI)

L'indice de perméabilité (IP) est un paramètre complémentaire utilisé pour évaluer l'aptitude des eaux naturelles à l'irrigation. Proposé par Doneen en 1964, cet indice permet d'estimer l'effet potentiel de la qualité de l'eau sur les propriétés physiques du sol, en particulier sa perméabilité. En effet, l'usage prolongé d'eaux d'irrigation de mauvaise qualité peut entraîner une dégradation de la structure du sol, affectant ainsi sa capacité à absorber et à retenir l'eau. Cet indice tient compte de plusieurs facteurs chimiques tels que la concentration en sodium (Na^+), en bicarbonates (HCO_3^-), en calcium (Ca^{2+}) et en magnésium (Mg^{2+}). Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$PI = \frac{(Na^+ + Ca^{2+})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100$$

Tableau 41: Résultats des PI de 24 forages

ID DE FORAGE	PI	<25	25-75	>75
1	23,2061256	+		
2	40,0928632		+	
3	30,9564079		+	
4	33,5958248		+	
6	20,5310974	+		
7	27,5147929		+	
8	44,6914279		+	
9	16,6518665	+		
10	49,8807865		+	
11	36,6756303		+	
12	47,0957339		+	
13	33,4404132		+	
14	37,9398137		+	
15	35,5323498		+	
16	25,4492783		+	
17	29,5986249		+	
18	28,9458608		+	
19	28,499849		+	
20	26,320633		+	
21	21,1362001	+		
22	33,7141549		+	
23	36,2057094		+	
24	30,489758		+	
27	45,3759329		+	

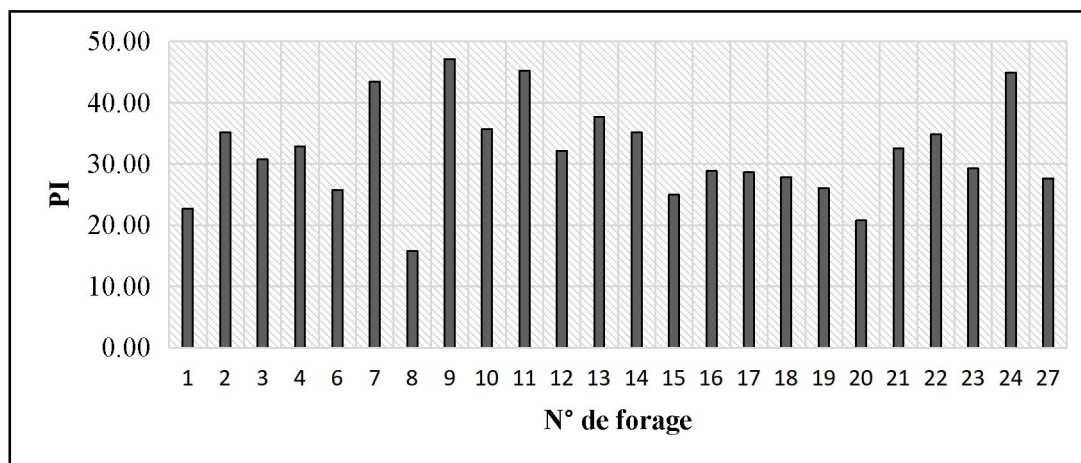


Figure N°46: Histogramme des PI de 24 forages.

Interprétation des résultats des PI :

- La majorité des forages (**20 sur 24**) se situent dans la classe moyenne (25–75), indiquant une qualité modérée à acceptable selon l'indice PI.
- Quatre forages présentent des valeurs de PI inférieures à 25, ce qui peut refléter un risque potentiel d'impact négatif sur la perméabilité des sols.
- Aucun forage ne présente une valeur supérieure à 75, ce qui suggère l'absence d'eaux de très haute qualité selon cet indicateur.
- La distribution globale des données révèle une certaine homogénéité dans les valeurs de PI à travers les sites.
- Il est recommandé de surveiller de près les forages ayant un $PI < 25$, car ils peuvent compromettre la structure physique des sols en cas d'irrigation prolongée.

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

Le MHR (Magnesium Hazard Ratio) est un indicateur utilisé en agronomie pour évaluer le risque potentiel associé à la présence de magnésium dans les eaux d'irrigation. Ce ratio est particulièrement important, car une teneur excessive en magnésium par rapport au calcium peut altérer la structure du sol et réduire sa perméabilité, affectant ainsi la croissance des plantes. Le MHR se calcule selon l'équation suivante :

$$MHR = \frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+} + Ca^{2+}} \times 100$$

Tableau N°42 : Résultats des MHR de 24 forages

ID DE FORAGE	MHR	<50	>50
1	36,38554	+	
2	16,66667	+	
3	64,61916		+
4	6,39386	+	
6	21,25280	+	
7	16,09195	+	
8	24,30279	+	
9	30,02070	+	
10	21,25984	+	
11	37,41007	+	
12	17,93313	+	
13	23,13167	+	
14	17,08861	+	
15	26,30106	+	
16	18,90547	+	
17	15,86538	+	
18	28,97333	+	
19	39,95272	+	
20	22,87465	+	
21	20,45455	+	
22	10,28807	+	
23	6,11354	+	
24	14,45783	+	
27	29,55289	+	

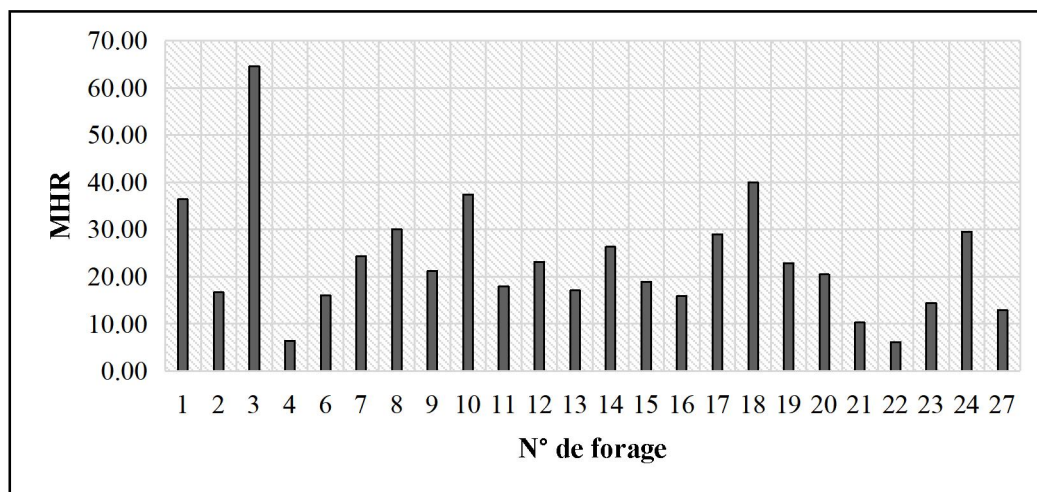


Figure 47: Histogramme des MHR de 24 forages.

Interprétation des résultats de MHR :

- La grande majorité des puits (environ 95,8 %, soit 23 puits sur 24) ont des valeurs de MHR inférieures à 50, ce qui indique un faible risque de sodicité et donc une bonne aptitude à l'irrigation.
- Seul le puits numéro 3 dépasse le seuil critique de 50, ce qui suggère un risque élevé de détérioration de la structure du sol si cette eau est utilisée sans traitement.
- La distribution des données montre une homogénéité relative des valeurs de MHR dans la zone étudiée.

II.8 Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP appliquée aux données hydrochimiques de 24 forages (hors n°5, 25, 26, 28, 29) vise à réduire la dimensionnalité des données et à identifier les sources de variabilité géochimique. Les 11 variables analysées incluent des paramètres physico-chimiques (T°C, pH, CE) et des ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-). Deux composantes principales (F1 et F2) expliquent 61,3 % de la variance totale (42,5 % pour F1 et 18,8 % pour F2), permettant une interprétation robuste des processus dominants.

Tableau N°43: Variance totale expliquée

Facteur de la charge	Valeur propre	Variabilité (%)	Cumulé (%)
1	4,253	42,529	42,529
2	1,880	18,798	61,327
3	1,306	13,065	74,392
4	0,988	9,879	84,271
5	0,686	6,859	91,130
6	0,424	4,239	95,369

7	0,260	2,596	97,964
8	0,117	1,171	99,135
9	0,077	0,770	99,906
10	0,009	0,094	100,000

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°44: Contributions des variables

Paramètres	Coefficients de F1	Coefficients de F2
pH	0,24	-0,61
CE	0,71	0,23
Ca	0,69	0,33
Mg	0,08	0,73
Na	0,78	-0,11
K	0,68	-0,51
HCO ₃	-0,79	0,10
SO ₄	0,65	0,71
Cl	0,76	-0,13
NO ₃	-0.31	0.12

1. Composante F1 (42,5 % de la variance)

Variables influentes :

Contributions positives : CE (0,71), Na⁺ (0,78), K⁺ (0,68), SO₄²⁻ (0,65), Cl⁻ (0,76).

Contribution négative : HCO₃⁻ (-0,79), NO₃⁻ (-0.31)

Interprétation :

F1 oppose deux types de minéralisation :

Pôle positif : Associé à une conductivité électrique élevée (CE) et à des concentrations importantes en Na⁺, Cl⁻, K⁺ et SO₄²⁻. Ces ions suggèrent une origine liée à la dissolution de sels (gypse) ou à des eaux salines influencées par des intrusions marines ou des aquifères salins.

Pôle négatif : Dominé par HCO₃⁻ et NO₃⁻, ce qui est typique des eaux bicarbonatées, souvent issues de l'altération des carbonates en milieu continental. La présence du nitrate dans ce pôle suggère également une influence possible d'activités agricoles ou de sources anthropiques, indiquant un mélange entre processus géogéniques et apports externes.

Conclusion : F1 illustre un gradient de minéralisation générale, opposant les eaux salines/sulfatées aux eaux douces riches en bicarbonates.

2. Composante F2 (18,8 % de la variance)

Variables influentes :

Contributions positives : Mg^{2+} (0,73), SO_4^{2-} (0,71).

Contributions négatives : pH (-0,61), K^+ (-0,51).

Interprétation :

Pôle positif : Lié à Mg^{2+} et SO_4^{2-} , indiquant une dissolution de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou une interaction avec des formations géologiques sulfatées. Ces ions peuvent également provenir de rejets industriels ou agricoles.

Pôle négatif : Associé à un pH bas et à une faible concentration en K^+ , reflétant potentiellement des processus d'acidification naturelle (ex : oxydation de la matière organique) ou des apports anthropiques (eaux usées, engrais).

Conclusion : F2 représente un gradient géochimique spécifique, opposant des eaux sulfatées/magnésiennes à des eaux acides et pauvres en potassium.

Projection des variables sur le plan factoriel (Figure N°50)

La figure N°50 et les coefficients du Tableau N°43 permettent de reconstituer les tendances : (CE , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) se positionne dans le quadrant positif de F1, reflétant une forte minéralisation.

HCO_3^- et NO_3^- s'isole dans le quadrant négatif de F1, marquant son opposition aux autres ions (Na et Cl).

Mg^{2+} et SO_4^{2-} dominent le quadrant positif de F2, tandis que pH et K^+ s'alignent dans le quadrant négatif.

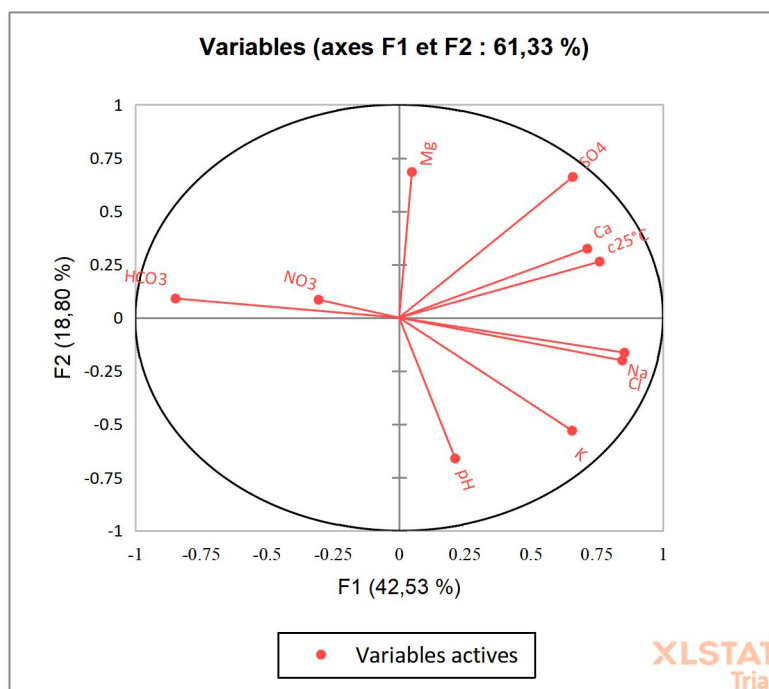


Figure N°48: Projection des variables sur le premier plan factoriel.

L'ACP révèle deux processus dominants :

Minéralisation globale (F1) : Opposition entre eaux salines/sulfatées et eaux bicarbonatées.

Processus géochimiques locaux (F2) : Dissolution de gypse et acidification.

Ces résultats corroborent des études antérieures (Subba Rao et al., 2012 ; Yang et al., 2016) et soulignent l'importance des interactions eau-roche et des activités anthropiques dans la composition hydrochimique.

II.9 Conclusion

L'étude de la qualité des eaux souterraines de 24 forages de la région d'El Ghrous, comparée aux normes algériennes (JORA 2014) et celles de l'OMS (2011), a révélé une forte minéralisation avec des teneurs élevées en ions dominants tels que les chlorures, les sulfates, le calcium et le magnésium. Les résultats de l'indice de qualité de l'eau (IQE) ont montré que la majorité des eaux se classent dans la catégorie de très mauvaise qualité, impropre à la consommation humaine sans un traitement préalable. L'analyse de l'aptitude à l'irrigation basée sur des indices comme la CE, le SAR, le pourcentage de sodium (Na%), le PI et le MHR a révélé que la plupart des forages étudiés présentent une salinité élevée, plaçant les eaux dans les classes C3S1 à C4S1, indiquant une qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation. Les résultats du bilan ionique ont conduit à l'exclusion de cinq forages (5, 25, 26, 28, 29) pour déséquilibre ionique important ($\Delta E > 5 \%$). L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) a permis de mettre en évidence des regroupements et oppositions entre les paramètres chimiques : l'axe I (42,53 % de la variance) oppose la conductivité, le sodium, le calcium et les chlorures aux bicarbonates, traduisant l'intensité de la minéralisation, tandis que l'axe II (18,80 %) distingue les sulfates et le magnésium opposés au pH et au potassium. En somme, les paramètres physico-chimiques analysés révèlent une qualité des eaux généralement médiocre à mauvaise, nécessitant un traitement préalable pour répondre aux exigences de consommation humaine et d'utilisation agricole durable.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'évaluation hydrochimique des eaux souterraines prélevées à partir de 29 forages dans la région d'El Ghrous a permis de dresser un diagnostic détaillé de leur qualité à des fins de consommation humaine et d'irrigation agricole. Après vérification du bilan ionique, cinq forages (N°5, 25, 26, 28 et 29) ont été exclus de l'analyse pour déséquilibre ionique significatif ($\Delta E > 5 \%$), réduisant le nombre effectif de forages étudiés à 24.

L'interprétation des résultats issus des différents diagrammes (Piper, Schoeller-Berkaloff, Riverside, Wilcox) a mis en évidence une forte minéralisation des eaux avec la prédominance des ions chlorures, sulfates, calcium et magnésium. Les faciès chimiques identifiés sont essentiellement de type chloruré sodique et sulfaté calcique magnésien, confirmant une géochimie influencée par la dissolution des roches évaporitiques et les échanges ioniques.

L'analyse de l'aptitude à l'irrigation montre que la majorité des forages se répartissent entre les classes C4S1 19 forages (F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F10, F11, F13, F14, F15, F16, F18, F19, F21, F23 et F24) et C3S1 5 forages (F8, F12, F17, F20 et F22) selon le diagramme de Riverside, traduisant une qualité médiocre à mauvaise, nécessitant des mesures correctives telles que le lessivage et l'apport de gypse, notamment pour les sols lourds ou peu perméables.

Les indices complémentaires (SAR, Na%, PI, MHR) confirment cette tendance :

- 12 forages ont un SAR faible (<10) indiquant un faible risque de sodicité, tandis que 10 forages présentent un SAR modéré (10–18), et 2 forages un SAR élevé ou très élevé (>18).
- La teneur en sodium (Na%) indique que 20 forages se situent dans la classe de bonne qualité (20–40 %), tandis que 2 forages présentent des niveaux admissibles.
- L'indice de perméabilité (PI) montre que 20 forages appartiennent à la classe moyenne (25–75), et 4 forages présentent un $PI < 25$, reflétant un risque potentiel pour la structure des sols.
- Le ratio de danger du magnésium (MHR) révèle que seul un forage (n°3) dépasse le seuil critique de 50 %, les autres forages affichant un risque très faible.

Enfin, l'analyse en composantes principales (ACP) a permis de distinguer deux axes majeurs expliquant 61,3 % de la variance totale :

- L'axe F I (42,5 %) reflète la **minéralisation** générale, opposant les eaux bicarbonatées aux eaux riches en sels dissous.
- L'axe F II (18,8 %) distingue des processus liés à la **dissolution du gypse** et aux apports anthropiques (engrais, effluents).

En conclusion, la qualité des eaux souterraines de la région d'El Ghrous est globalement médiocre à mauvaise, impropre à la consommation humaine sans traitement préalable, et d'utilisation limitée pour l'irrigation sans mesures d'atténuation. Ces résultats justifient la mise

en œuvre de stratégies de gestion durable incluant le suivi régulier, le traitement ciblé et la sélection de cultures adaptées à la salinité

Références Bibliographiques

➤ Ouvrages et Articles :

1. ANAT, Agence Nationale d'Aménagement de territoire, Algérie., 2003 - *Schéma directeur des ressources en eau. Wilaya de Biskra.*
2. ABHS, (2018). *Réseau hydrographique de la wilaya de Biskra.*
3. A.N.R.H, (1996). *Étude des grandes unités hydrogéologiques du Sahara Septentrional.*
4. ANRH (2011). *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. (2021). *Hydrochemical Characteristics of Aquifers and Their Predicted Impact on Soil Properties in Biskra Region, Algeria.*
7. Abdel-Fattah, M.K., Mokhtar, A. & Abdo, A.I. (2021). *Application of neural network and time series modeling to study the suitability of drain water quality for irrigation: a case study from Egypt.*
8. Akhtar et al. (2021). *Biochars' adsorption performance towards moxifloxacin and ofloxacin in aqueous solution.*
9. Adhikary P, et al. (2010). *Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach.*
10. Awad et al. (2022). *Performance Evaluation of Solar-Powered Atmospheric Water Harvesting Using Different Glazing Materials.*
11. Balamurugan.P (2020). *Groundwater parameter on human health and irrigation indices in semi-arid India.*
12. Batarseh et al. (2021). *Groundwater quality for irrigation using IWQI and GIS.*
13. Belghitim. C. B (2013). *Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines à Meknès (Maroc).*
14. Belhadi A. et al. (2016). *Apport de la plasticulture à la dynamique agricole de la région de Ziban (Biskra).*
15. Bagnouls F. & Gaussen H. (1953). *Saison sèche et indice xérothermique.*
16. Boutouga F. (2012). *Ressources et gestion des eaux dans le Zeb Est de Biskra.*
17. Bouchemal F. (2017). *Diagnostic de la qualité des eaux souterraines à Biskra.*
18. Bradai et al. (2022). *Groundwater Irrigation Sustenance in the Middle Cheliff Plain.*
19. Boukhari M. (2008). *Juste prix de l'eau potable pour une gestion durable des ressources.*
20. Chebbah M. (2007). *Lithostratigraphie et sédimentologie de la région de Biskra.*
21. Chadha D.K. (1999). *A new diagram for geochemical classification of natural waters.*

22. Chelli L., Djouhri N. (2013). *Analyse des eaux de Béjaia et évaluation de leur pouvoir entartrant.*
23. Cosandey C., et al. (2003). *Les eaux courantes: Géographie et environnement.*
24. Dajoz R. (1971). *Précis d'écologie.*
25. DPSB (2022). *Monographie de la wilaya de Biskra.*
26. Degremont (2005). *Mémento technique de l'eau.*
27. Dubost D. (2002). *Les oasis du sud-est algérien.*
28. Doneen L.D. (1964). *Notes on water quality in agriculture.*
29. Djellouli Y. (1990). *Flores et climats en Algérie.*
30. Guergazi S., Achour B. (2005). *Étude de la qualité de l'eau souterraine à Biskra.*
31. Guerzou B. (2008). *Étude de la potabilité des eaux souterraines de Djelfa.*
32. Manahan S.E. (2005). *Environmental Chemistry.*
33. Rodier J. (2009). *L'analyse de l'eau.*
34. Todd D.K. (2001). *Groundwater Hydrology.*
35. Wilcox L.V. (1955). *Classification and use of irrigation waters.*
36. Walton W.C. (1970). *Groundwater Resource Evaluation.*
37. Verhille S. (2013). *Les indicateurs microbiens dans l'évaluation de l'eau potable.*
38. Savary P. (2010). *Guide des analyses de la qualité de l'eau.*
39. OMS (2011). *Directives de qualité pour l'eau potable.*
40. OMS (2017). *Directives de qualité pour l'eau potable.*
41. ONU (2006). *Eau, assainissement et développement durable.*
42. Piper A.M. (1944). *Graphical interpretation of water analysis.*
43. Richards L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.*
44. Saleh A., Al-Ruwaih F., Shehata M. (1999). *Hydrogeochemical Processes in Kuwait.*
45. Salifu M. et al. (2017). *Suitability of groundwater for irrigation in Ghana.*
46. Mediouni K. (1997). *Organisation et biodiversité algérienne.*
47. Morales F.J. et al. (1996). *Maillard reaction and food chemistry.*
48. Nagaraju et al. (2014). *Groundwater near mining area in India.*
49. Adimalla N., Qian H. (2019). *Groundwater quality index and health risk assessment.*
50. Subba Rao N. et al. (2012). *Geochemistry and health risk in Andhra Pradesh.*
51. Gugulothu et al. (2022). *Groundwater salinity in Andhra Pradesh, India.*
52. Hem J.D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water.*
53. Houillier P., Blanchard A., Paillard M. (2004). *Métabolisme du potassium.*
54. Halitim A. (1989). *Sols des régions arides d'Algérie.*

55. Halilet M.T. (1998). *Étude expérimentale du sable avec argile compactée.*
56. Harrat & Achour (2010). *Pollution des eaux de barrage.*
57. Giacobbe A. (1961). *Recherches écologiques sur l'aridité en Afrique du Nord.*
58. Gouskov H. (1964). *Carte géologique de Biskra.*
59. Gouaidia L. (2008). *Influence de la lithologie sur les eaux souterraines.*
60. Geological Survey. *Water-Supply Paper 2254.*
61. SCI, Environnement Canada. (2006). *Système canadien d'information sur l'eau.*
62. Tardath & Beaudry (1984). *Chimie des eaux.*
63. Stewart P. (1968). *Quotient pluvio-thermique et dégradation biosphérique.*
64. Jean-Louis Ballais (2010). *Hydrographie et piémont de l'atlas saharien.*
65. Chebbah A. (2007). *Log litho-stratigraphique synthétique.*
66. Durand M. (1958). *Carte pédologique de Biskra.*
67. Jean-Louis B. (2010). *Carte géomorphologique du Bas-Sahara.*
68. A.B.H.S. (2018). *Carte du réseau hydrographique de Biskra.*
69. ANAT (2003). *Esquisse géologique de la région de Biskra.*
70. ANRH (2011). *Répartition des points d'eau.*
71. ANRH (1980). *Carte piézométrique de la nappe du Quaternaire.*
72. A.N.R.H. (1996). *Carte piézométrique de la nappe des sables.*
73. Québec, Gouvernement (2003). *Fiches santé et eau potable.*
74. Hill M. (2004). *Understanding Environmental Pollution.*
75. Myrand P. (2008). *Techniques de captage d'eau souterraine.*
76. Kawagoshi Y. et al. (2016). *Anaerobic bacteria in saline wastewater.*
77. AGW-Net et al. (2006). *Manuel de gestion des eaux souterraines en Afrique.*
78. Yang W. et al. (2016). *Hydrochemical characteristics in Ordos, China.*
79. Giacobbe (1961). *Étude sur la zone aride d'Afrique du Nord.*
80. Weyer P.J. et al. (2001). *Nitrate in drinking water and cancer risk.*
81. Ballais J-L. (2010). *Les piémonts de l'Atlas saharien.*
82. Kelly W.P. (1940). *Permissible limits for saline irrigation waters.*
83. Paliwal K.V. (1967). *Irrigation with saline water.*
84. Stewart P. (1968). *Indices climatiques appliqués à l'environnement.*
85. SCI (2006). *Environnement Canada – SCI en ligne.*
86. Wilcox L V (1955). Classification and use of irrigation waters, vol 969. U.S. Department of Agriculture Circular, Washington, DC, 19 p.
87. 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.
88. 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
 89. Reghis, B. (2024). 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
 90. Ben Alia, (2018). Diagnostic agraire de la région d'El Ghrous (Wilaya de Biskra)
 91. Malki, L., & Lahreche, I. (2022). Inventaire des maladies fongiques du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) de la région de Biskra, cas de «Bordj ben azzouz, El ghrous et Lioua
 92. Naili, A., & Menidjele, Y. (2024). La Qualité physico-chimique des eaux utilisée dans les industries agro-alimentaires alimentaires (cas wilaya de Guelma)
 93. Naouri, M., Hartani, T., & Kuper, M. (2015). "Mobilités des jeunes ruraux pour intégrer les nouvelles agricultures sahariennes (Biskra, Algérie)". *Cahiers Agricultures*, 24(6), 379–386. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0778>
 94. Evasion FM. (2023). "Les nappes phréatiques sont à un niveau modérément bas en Seine-et-Marne". Récupéré de <https://www.evasionfm.com/les-nappes-phreatiques-sont-a-un-niveau-moderement-bas-en-seine-et-marne>

➤ **Site internet consulté :**

- 1- (<https://fr.oceancampus.eu/cours/7Mc/la-pollution-de-leau>)
- 2- http://wilayabiskra.dz/?page_id=1673

➤ **Logiciels utilisés :**

- 1- EXCEL 2019
- 2- DIAGRAMME : Version 8.44 (Roland SIMLER Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)
- 3- XLSTAT 2025
- 4- Map

➤ **Cartes utilisées :**

- 1- Situation géographique de la commune de La Ghrous
- 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).

- 5- Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).
- 6- Log litho-stratigraphique synthétique de la région de Biskra (CHEBBAH, 2007)
- 7- Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011).
- 8- Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).
- 9-Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)