

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Hydraulique et Génie Civile

Mémoire de Licence

Domaine: Sciences et de la Technologie

Filière: Hydraulique

Spécialité: Hydraulique

Thème

**Comparaison de qualité des eaux souterraine entre la
région de Ghardaia et Guerarra**

Réalisé par : Soudani Amira Fatna

Encadré par : Dr Tahar SELMANE

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

اشكر الله العلي القدير الذي انعم علي بنعمة العقل و الدين. القائل في محكم التنزيل "و فوق كل ذي علم عليم". سورة يوسف الاية 76
وقال رسول الله (صلى الله عليه وسلم) "من صنع لكم معروفا فكافئوه, فان لم تجدوا ما تكافئونه به فادعوا له حتى تروا انكم كافأتموه".
(رواه ابو داوود) .

J'adresse mes remerciements et ma profonde gratitude tout particulièrement à :

*Mon encadrant, mon professeur **Dr Tahar SELMANE** à l'Université de Ghardaïa, pour avoir accepté de superviser mon travail, pour son suivi rigoureux, son travail remarquable, ses conseils et son dévouement, qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien ce travail. Je ne peux pas non plus manquer de le remercier pour sa gentillesse exceptionnelle.*

Je remercie également tous les enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie, et plus particulièrement les professeurs du département Hydraulique, qui nous ont enseigné pendant trois années de formation.

*Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à mon enseignante, la **Dr Hafsi Radia** à l'Université de Ghardaïa, pour son aide précieuse.*

Mes remerciements s'adressent aussi aux responsables de l'Institution Algérienne des Eaux.

*Et enfin, je remercie **moi-même** pour la réalisation de ce mémoire.*

Dédicace

À celui qui a sué sang et eau, et à celui qui m'a appris que la réussite ne vient qu'avec la patience et la persévérance, à la lumière qui éclaire mon chemin, et à la lanterne dont la lumière ne s'éteindra jamais :

à celui qui a donné son âme, son souffle, et de qui j'ai puisé ma force et ma fierté — à mon cher père, je te rends hommage et reconnaissance.

À celle que Dieu a placée au paradis sous ses pieds, à celle qui m'a facilité les moments difficiles par ses prières, jusqu'à m'élever à l'humanité sublime qu'elle a toujours souhaité voir en ce jour — ma chère maman.

À mon pilier solide, à la sécurité de mes jours, à ceux en qui j'ai trouvé refuge quand j'étais brisée — ils étaient mes sources d'inspiration — à la sagesse de ma mère et à sa pureté, je rends hommage à mes chers frères.

À tous ceux qui ont été un soutien et un appui sur ce chemin, à mes amis fidèles, compagnons des années, compagnons des épreuves et des crises.

À ceux de ma famille loyale qui ont enrichi mon parcours par leurs conseils sincères — cette réussite est la vôtre autant que la mienne.

J'ai enfin atteint ce que j'ai longtemps souhaité et je suis arrivée à la fin de mon chemin.

Tout cela par la grâce de Dieu, le Glorieux et le Très-Haut.

Louange à Dieu pour ce qu'Il m'a donné et octroyé, et qu'Il me bénisse et m'accompagne où que je sois.

Celui qui dit : "Tu l'obtiendras, même si cela semble impossible", avait raison.

Louange à Dieu, gratitude, amour et reconnaissance du début jusqu'à la fin

ملخص

تقع منطقتا غرداية والقرارة، المصنفتان ضمن المناطق الجافة، في جنوب الجزائر شمال الصحراء الكبرى. وتتميزان بوفرة المياه الجوفية، التي تُعد المصدر الرئيسي والأكثر استخدامًا في هاتين المنطقتين. في إطار تقييم ومقارنة جودة المياه الجوفية المخصصة للاستهلاك البشري بين منطقتي غرداية والقرارة، تم خلال سنة 2024 جمع عينات من 13 بئرًا موزعة على مختلف مواقع منطقة غرداية، و14 عينة أخرى من آبار متعددة في منطقة القرارة. وقد خضعت هذه العينات لتحاليل فيزيائية وكيميائية في مخبر الوحدة الجزائرية للمياه

أظهرت نتائج التحاليل الفيزيائية أن مؤشري الأس الهيدروجيني والتوصيلية الكهربائية يقعان ضمن القيم المسموح بها وفقًا للمعايير الجزائرية. أما من الناحية الكيميائية، فقد أظهرت النتائج وجود بعض العناصر بتركيزات منخفضة، في حين تجاوزت تركيزات عناصر أخرى الحدود الموصى بها في المواصفات الوطنية. وسُجلت تركيزات مرتفعة لكل من العسر الكلي، والسلفات في كلا المنطقتين، والبوتاسيوم في منطقة القرارة فقط. ورغم هذه التجاوزات، تُعد جودة مياه القرارة أفضل نسبيًا من مياه غرداية، التي أظهرت تجاوزات أكثر وضوحًا خاصة فيما يتعلق بالعكارة والصوديوم، مما يستدعي مراقبة ومتابعة أكثر انتظامًا في هذه المنطقة.

Résumé

Les régions de Ghardaïa et de Guerarra, classées parmi les zones arides, sont situées dans le sud de l'Algérie, au nord du désert du Sahara. Elles se caractérisent par une abondance en eaux souterraines, qui constituent la principale source utilisée dans ces deux régions. Dans le cadre de l'évaluation et de la comparaison de la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine entre les régions de Ghardaïa et Guerarra, des échantillons ont été prélevés en 2024 : 13 puits répartis dans différents sites de la région de Ghardaïa et 14 autres dans la région de Guerarra. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses physiques et chimiques au laboratoire de l'Unité Algérienne de l'Eau. Les résultats des analyses physiques ont montré que les paramètres du pH et de la conductivité électrique (COND) sont conformes aux normes algériennes en vigueur. Sur le plan chimique, les analyses ont révélé que certaines substances présentent des concentrations faibles, tandis que d'autres dépassent les valeurs recommandées par les normes nationales. Des concentrations élevées de la dureté totale (TH) et des sulfates ont été enregistrées dans les deux régions, ainsi que du potassium uniquement dans la région Guerarra. Malgré ces dépassements, la qualité de l'eau Guerarra est relativement meilleure que celle de Ghardaïa, qui a montré des dépassements plus marqués, notamment en ce qui concerne la turbidité et le sodium, ce qui nécessite un contrôle et un suivi plus réguliers dans cette région.

Abstract

The regions of Ghardaïa and Guerarra, classified as arid zones, are located in southern Algeria, north of the Sahara Desert. They are characterized by an abundance of groundwater, which is the main and most commonly used water resource in both regions. As part of the evaluation and comparison of groundwater quality intended for human consumption between the regions of Ghardaïa and Guerarra , samples were collected in 2024 from 13 wells distributed across various sites in the Ghardaïa region, and 14 other samples from multiple wells in the Guerrara region. These samples underwent physical and chemical analyses at the laboratory of the Algerian Water Unit. The results of the physical analyses showed that the pH and electrical conductivity indicators were within the permissible values according to Algerian standards. From a chemical perspective, the results revealed the presence of some elements at low concentrations, while others exceeded the recommended limits set by national specifications. High concentrations of total hardness (TH) and sulfates were recorded in both regions, as well as potassium in the Guerarra region only. Despite these exceedances, the water quality in Guerarra is relatively better than that of Ghardaïa, which showed more significant exceedances, particularly in turbidity and sodium levels, necessitating more regular monitoring and follow-up in This region.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
<i>ملخص</i>	III
Résumé	III
Abstract.....	IV
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste des Abréviations	X
Introduction générale	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation générale de la région d'étude	
I.1. Introduction	2
I.2. Aspect géomorphologique et Aspect topographique	2
I.2.1. Aspect géomorphologique	2
I.2.2. Aspect topographique.....	4
I.3. Réseau hydrographique	4
I.4. Cadre hydro-climatique.....	5
I.4.1. Les éléments du climat.....	5
I.4.1.1. Température	5
I.4.1.2 Précipitations	7
I.4.1.3. Le vent	8
I.4.1.4. L'évapotranspiration	9
I.4.2. synthèse climatique	10
I.4.2.1 Climagramme d'Emberger	10
I.4.2.2 Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	11
I.5. Cadre géologique	12
I.6. Cadre hydrogéologique	14
I.6.1. Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS)	14
I.6.1.1 Continental Intercalaire.....	15
I.6.1.2 Complexe terminal.....	17
I.6.2. L'aquifère albien dans la région de Ghardaïa	18
I.6.3 Répartition et nombre de forages	19
I.6.4. Exploitation et utilisation.....	19
I.5. Données d'analyse physico-chimique des eaux de forages de la région de Guerarra et Ghardaïa (2024) :	20
I.8. Conclusion.....	21
Chapitre II : Généralité sur la Qualité des eaux Souterraine	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Caractéristique des eaux souterraines	22
II.3 Norme de qualité d'eau	23
II.4. Principaux Paramètre de Potabilité	24

I.4.1. Paramètres organoleptiques	24
II.4.1.1. Couleur	24
II.4.1.2. Odeur	24
II.4.1.3. Goût	24
II.4.2. Paramètres bactériologiques	24
II.4.2.1 Coliformes fécaux	24
II.4.2.2. Coliformes totaux	24
II.4.2.3. Escherichia coli	25
II.4.2.4. Les streptocoques fécaux.....	25
II.4.3. Paramètres physique et chimiques.....	25
II.4.3.1. Température (T°).....	25
II.4.3.2. La conductivité électrique	25
II.4.3.3 Le potentiel hydrogène (pH)	26
II.4.3.4 La turbidité	26
II.4.3.5 La salinité (SAL):	26
II.4.3.6 Résidus et Total des Solides Dissous (TDS)	27
II.4.3.7 Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) :	27
II.4.3.8. Les ions majeurs	27
II.4.3.9 Nutriments :	28
II.4.3.10 Métaux lourds.....	30
II.5. Pollution des eaux.....	30
II.5.1. Origines de la pollution	30
II.5.1.1. Pollution industrielle	30
II.5.1.2. Pollution urbaine	30
II.5.1.3 Pollution agricole	30
II.5.1.4. Pollution atmosphérique.....	31
II.6. Les principaux pollutions des eaux.....	31
II.6.1. Les polluants bactériologiques :	31
II.6.2. Les polluants chimiques :	31
II.6.3. Les polluants physiques.....	31
II.7. Conclusion	31
Chapitre III : Calculs et interprétation des résultats de qualité.	
III.1. Introduction	33
III.2. Vérification de la fiabilité des données	33
III.3. Vérification aux normes Algériennes	35
III.3.1. Titre alcalimétrique simple (ou alcalinité simple) :	36
III.3.2. Titre alcalimétrique complet (alcalinité totale) :	36

III.3.4. Température (T).....	38
III.3.5. Potentiel Hydrogène (pH)	39
III.3.6. Conductivité	40
III.3.7. Turbidité	40
III.3.8. Dureté totale	41
III.3.8. Calcium Ca^{2+}	42
III.3.9. Magnésium (Mg^{2+})	42
III.3.10. Sodium (Na^{+}).....	43
III.3.11. Potassium (K^{+})	44
III.3.12. Sulfate (SO_4^{2-})	44
III.3.12. Chlorures (Cl^{-})	45
III.4. Discussion et comparaison de qualité des eaux entre Ghardaia et Guerrara	46
III.5. Conclusion.....	48
Conclusion général	49
Références bibliographiques	51

Liste des figures

Figure I.1. Localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa (Messatefa, 2024).....	3
Figure I.2: Localisation géographique de la région de Guerarra (Oulad Noui et Rouabah, 2020).....	4
Figure I.3. Température moyenne mensuelle dans la région de Ghardaïa durant la période 2014-2023 (Messatefa, 2024).).....	6
Figure I.4 : Température minimale, maximale et moyenne dans la région de Ghardaïa en 2022. (Seddi, 2024)).....	7
Figure I.5. Évolution des précipitations mensuelles moyennes dans la région de Ghardaïa sur la période 2014–2023. (Messatefa, 2024).).....	8
Figure I.6. Histogramme illustrant les moyennes mensuelles des précipitations selon moulay (omar et benhamadi, 2020)).....	8
Figure I.7: Variation mensuelle moyenne de la vitesse du vent dans la région de Ghardaïa entre 2014 et 2023. (Messatefa, 2024).....	9
Figure I.8. Taux moyen annuel d'évaporation selon Fifati (2012).....	10
Figure I.9: Etage bioclimatique de la région de Ghardaïa selon le climagramme d'Emberger Oulad (Oulad Noui et Rouabah, 2020).....	11
Figure I.10. Ombrothermogramme de Gaussen pour la région de Ghardaïa (année 2022) (Seddi, 2024).....	12
Figure I.11: Représentation géologique de la région de Ghardaïa d'après (ANRH, 2010).....	14
Figure I.12. Délimitation du bassin du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). (kebili et bouziane mohmed, 2018).....	15
Figure I.13 : Coupe transversale hydrogéologique du 'CT' (Messatefa, 2024).....	18
Figure I.14. Évolution de l'exploitation des eaux du Continental Intercalaire selon les usages entre 2005 et 2016 (Source : ANRH, 2016).).....	20
Figure III.1 : Histogramme représentant l'équilibre ionique pour l'année 2024.....	35
Figure III.2 : Évolution de l'alcalinité totale (TAC) en 2024.....	38
Figure III.3 : Évolution de la température des eaux des forages étudiés en 2024.....	39
Figure III.4: Évolution du pH des eaux des forages analysés durant l'année 2024.....	40
Figure III.5 : Évolution de la conductivité électrique des eaux des forages en 2024.....	41
Figure III.6: Évolution de la turbidité des eaux des forages analysés en 2024.....	41
Figure III.7 : Évolution de la dureté des eaux des forages au cours de l'année 2024.....	42
Figure III.8 : Évolution de la concentration en calcium dans les eaux des forages durant l'année 2024.).....	43
Figure III.9: Évolution de la concentration en magnésium dans les eaux des forages en 2024.....	43
Figure III.10: Évolution de la concentration en sodium des eaux issues des forages en 2024.....	44
Figure III.11 : Évolution de la concentration en potassium dans les eaux des forages étudiés (année 2024).....	45
Figure III.12 : Évolution de la concentration en sulfates dans les eaux des forages étudiés (année 2024).....	46

Liste des tableaux

Tableau I .1. Évolution mensuelle des températures dans la région de Ghardaïa (R2) entre 2014 et 2023. (Messatefa, 2024)).....	6
Tableau I.2. Précipitations mensuelles observées dans la région de Ghardaïa, de 2014 à 2023. (Messatefa, 2024).).....	7
Tableau I. 3. Vents mensuels de la région de Ghardaïa, période de 2014-2023. (Messatefa, 2024).....	9
Tableau I.4 : Répartition des forages albien selon l'état d'exploitation (ANRH, 2016).....	19
Tableau I.5. Évolution de l'exploitation des eaux du Continental Intercalaire selon l'usage (ANRH, 2016).....	20
Tableau II .1. Normes d'eau acceptable pour la consommation humaine.(Selmane, 2023).....	23
Tableau II.2: Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (Seddi, 2024).....	25
Tableau II.3 : Typologie des eaux selon leur valeur de pH (Hassani et Noui, 2022).....	26
Tableau II.4. Catégories courantes de turbidité (NTU : unité néphélométrique de turbidité (Hassani et Noui, 2022).....	26
Tableau II.5: Classification des eaux selon leur dureté (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).....	27
Tableau III.1 : Résultats des calculs de la balance ionique pour l'année 2024.....	34
Tableau III.2 : Références normatives des paramètres physico-chimiques de l'eau selon la réglementation (JORA, 2011).....	36
Tableau III.3 : Données calculées de l'alcalinité totale et partielle des eaux de forage (année 2024)...	37
Tableau III.3 : Données calculées de l'alcalinité totale et partielle des eaux de forage (année 2024)...	47

Liste des Abréviations

OMS : Organisation mondiale de la santé.

NA : Normes algériennes.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

ADE : l'Algérienne Des Eaux.

SASS : Système Aquifère du Sahara septentrional.

NTU : Néphélométrie turbidité unîtes.

BI : Balance ionique.

PH : Potentiel d'hydrogène.

TH : Titre hydrométrique.

TAC : Titre Alcalimétrique complet.

TDS : Sels Totaux Dissous.

AEP : L'alimentation en eau potable.

Introduction générale

Introduction générale

La demande mondiale en eau ne cesse d'augmenter, entraînant une détérioration progressive de sa qualité, notamment celle des eaux souterraines. Cette dégradation résulte principalement de l'urbanisation croissante, du développement industriel, de l'intensification de l'agriculture, de l'essor du tourisme, ainsi que du besoin d'assurer un accès universel à l'eau potable.

Les eaux souterraines jouent un rôle fondamental dans le cycle de l'eau et représentent une ressource indispensable, fournissant de l'eau potable à plus de 1,5 milliard de personnes dans le monde. Bien qu'on les considère souvent comme protégées par les couches géologiques, elles demeurent exposées à la pollution, surtout en raison des activités humaines concentrées dans les bassins versants.

En Algérie, l'approvisionnement en eau potable repose principalement sur les eaux souterraines et les eaux de surface, distribuées à travers des réseaux publics conformes aux normes nationales de qualité. Les efforts fournis dans ce domaine ont permis d'atteindre un taux de raccordement des foyers de 93 % en 2008, contre 78 % en 1999 et 92 % en 2007.

La wilaya de Ghardaïa et la commune de Guerarra, située au cœur du Sahara septentrional dans le sud de l'Algérie, dépend essentiellement des eaux souterraines pour satisfaire ses besoins en eau, en raison de son climat aride et de la facilité relative d'exploitation de ces nappes. Deux grands aquifères caractérisent la région : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) du Sahara septentrional.

Cette étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines dans la région de Ghardaïa, à travers le prélèvement d'échantillons représentatifs issus de plusieurs localités.

Le travail a été structuré comme suit :

Chapitre I : Présentation générale de la région d'étude

Chapitre II : Généralité sur la Qualité des eaux Souterraine

Chapitre III : Calculs et interprétation des résultats de qualité

Chapitre I : Présentation générale de la région d'étude

I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du cadre physique général de la région de Ghardaïa, incluse dans la plateforme saharienne. Nous y décrivons la localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa et de la commune de Guerarra, en mettant en évidence les principales caractéristiques naturelles telles que le climat, géologie et hydrogéologie de la zone d'étude.

I.2. Aspect géomorphologique et Aspect topographique

I.2.1. Aspect géomorphologique

La wilaya de Ghardaïa se situe au nord du Sahara algérien. à environ 600 km au sud d'Alger. Sa superficie totale est de 26 165,13 km², avec une extension de 100 à 150 km du nord au sud et de 200 à 250 km d'est en ouest. Son altitude moyenne est de 460 mètres au-dessus du niveau de la mer. La wilaya de Ghardaïa est limité par :

- La wilaya de Djelfa et celle de Laghouat au nord,
- La wilaya d'EL Bayadh à l'ouest,
- La wilaya d'Ouargla à l'est,
- Et la wilaya de Maniea au sud.

La commune de Ghardaïa, capitale de la wilaya, se trouve à une d'environ 200 km de Laghouat, à 200 km d'Ouargla, à 400 km d'EL Bayadh et à 270 km de Maniea (Monographie Mai 2025).

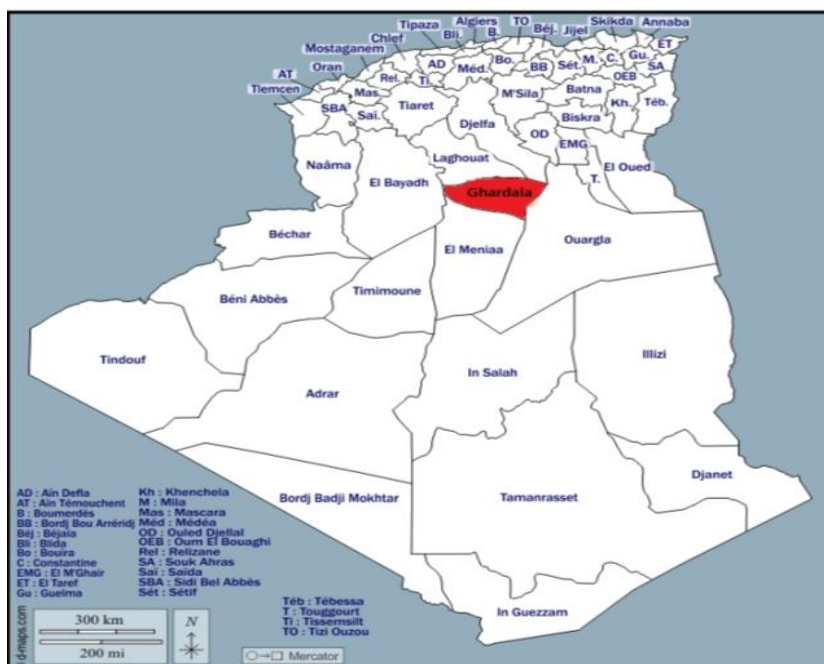


Figure I.1. Localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa (Messatefa, 2024)

Le terme Guerrara désigne en arabe une vaste dépression en forme de cuvette caractérisée par une végétation dense (Dubief, 1953). Sur le plan administratif, la sous-région de Guerrara fait partie d'une Daïra, l'une des huit que compte la wilaya de Ghardaïa. Guerrara est considérée comme l'une des oasis isolées de la Pentapole mozabite (DSA, 2017). Elle se situe à environ 120 km au nord-est du centre-ville de Ghardaïa, avec une superficie totale de 2600 km² et une superficie agricole estimée à 16 000 hectares (Fifati, 2012).

Les limites géographiques de Guerrara sont les suivantes :

- Au nord : la wilaya de Djelfa, notamment la commune de Guettera située à 50 km ;
- À l'est : la wilaya de Ouargla, avec la commune d'El Alia distante de 90 km ;
- À l'ouest : les daïras de Berriane (à 73 km) et Bounoura ;
- Au sud : les daïras de Zelfana (à 45 km) et El Atteuf.

Guerrara occupe ainsi une position géographique stratégique reliant trois wilayas : Ouargla, Djelfa et Ghardaïa (Figure I. 2).

Ses coordonnées géographiques sont situées entre 32° 47' de latitude nord et 4° 30' de longitude est (DSA, 2017 ; Oulad Noui et Rouabah, 2020)

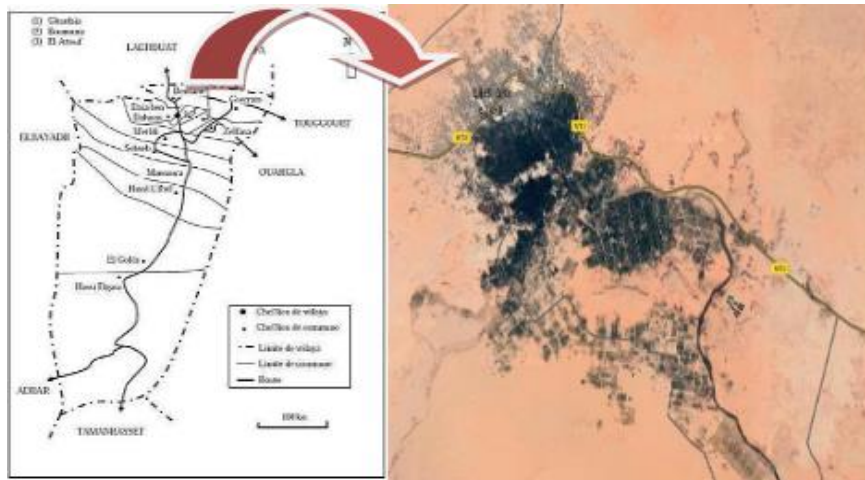


Figure I.2: Localisation géographique de la région de Guerarra (Oulad Noui et Rouabah, 2020).

I.2.2. Aspect topographique

Les terrains de l'agglomération présentent une topographie globalement plane, avec une pente moyenne estimée à 4 % en direction du sud-ouest. L'altitude moyenne de la région est d'environ 360 mètres au-dessus du niveau de la mer. (Sebti, 2015).

I.3. Réseau hydrographique

La région de Ghardaïa se distingue par la présence de plusieurs oueds qui traversent son territoire.

Oued Zegrir

Le bassin de l'oued Zegrir, délimité au niveau de la région de Guerarra, couvre une superficie d'environ 4100 km². Il est principalement localisé dans les affleurements continentaux du Miocène et du Pliocène. Plusieurs daïas, souvent alimentées par des vallées, le traversent. En raison de la présence marquée de phénomènes karstiques dans la région, de nombreux cours d'eau disparaissent avant de rejoindre l'oued Zegrir ou son prolongement, le Zgag. Cela rend floues les limites nord et sud du bassin. Le tronçon principal, qui s'étend de la source de l'oued Ajerma jusqu'à la daïa Ben Feïlah, mesure environ 270 km, représentant la limite naturelle des crues majeures. (Mihoub, 2017).

Oued N'sa

Situé au sud du bassin précédent, le bassin d'El-Nissa couvre une superficie d'environ 7800 km². En raison de la complexité géologique locale, ses frontières orientales demeurent mal définies. Son cours d'eau principal, long de 320 km, prend sa source dans la région de Tilrempt à une altitude proche de 750 mètres, pour se jeter dans la Sebkhia Safioune, au nord d'Ouargla, à 107 mètres d'altitude (Mihoub, 2017).

Oued Metlili

Le bassin de l'Oued Metlili, situé au centre de l'oasis éponyme, s'étend sur une superficie inférieure à 400 km². Comme d'autres bassins de la région, sa limite orientale reste mal définie en raison des caractéristiques géologiques propres au domaine continental du Pliocène dans cette zone géographique. L'oued s'étire sur une longueur totale de 214 km, mais son cours est interrompu à 134 km de la source par la ceinture de dunes de l'Areg Rhanem. En aval, son lit est jalonné de plusieurs daïas qui captent une partie des eaux de ruissellement, la plus importante étant la Daïa Ghemta (Mihoub, 2017)

Oued M'Zab

Le bassin de l'oued M'Zab couvre une superficie d'environ 5000 km², bien que ses limites orientales restent imprécises. Si l'on considère uniquement la zone de Ghardaïa, point le plus bas fréquemment touché par les crues, cette superficie se réduit à environ 1500 km². L'oued M'Zab s'étire sur environ 320 km d'ouest en est, partant de la région de Bohna Rouila jusqu'à la Sebket Safioune. Il prend sa source sous le nom de vallée El Abiod à une altitude de 750 mètres et se jette dans la Sebket Safioune, située à 107 mètres d'altitude (Mihoub, 2017).

I.4. Cadre hydro-climatique

I.4.1. Les éléments du climat

La région de Ghardaïa est située dans une désertique caractérisée par un climat aride et sec. Toutefois, l'existence de microclimats joue un rôle important dans les environnements désertiques. Le relief et la présence d'une végétation dense peuvent localement modifier les conditions climatiques, créant ainsi des microclimats. À l'intérieur d'une palmeraie, on peut observer un taux d'humidité élevé ; cette humidité influe sur la perception de la température par l'homme (DSA, 2018).

Dans cette section, nous présentons certains facteurs climatiques tels que la température, les précipitations et les vents. Le diagramme ombrothermique de Gaussen permet d'identifier la période sèche, tandis que le climagramme d'Emberger est utilisé pour déterminer l'étage bioclimatique de la région étudiée (Oulade Naoui et Rouabah, 2020).

I.4.1.1. Température

La température constitue un facteur climatique majeur, et elle représente le premier élément à analyser pour comprendre les effets écologiques sur les êtres vivants (Dreaux, 1974), ainsi que sur la

répartition des espèces et des communautés au sein de la biosphère (Ramade, 1984). Les températures mensuelles enregistrées au cours de la période de dix ans (2014-2023) dans les stations météorologiques de Ghardaïa sont présentées dans le tableau 1. Les données du tableau révèlent deux grandes périodes climatiques distinctes. Durant la période la plus chaude, la température moyenne sur dix ans atteint un maximum au mois de juillet, avec une valeur de 36,38°C, et des pics extrêmes pouvant dépasser les 50°C. En revanche, le mois le plus froid est janvier, avec une température moyenne de 11,82°C. Les mois les plus chauds sont généralement mai, juin, juillet, août, septembre et octobre. La température à la surface du sol peut dépasser les 70°C, mais elle diminue rapidement avec la profondeur pour se stabiliser. Le gel, quant à lui, est principalement limité aux régions nord du Sahara et aux zones montagneuses (Monod, 1992 ; Messatefa, 2024 ; Seddi, 2024).

Tableau I .1. Évolution mensuelle des températures dans la région de Ghardaïa (R2) entre 2014 et 2023. (Messatefa, 2024)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Max	17,22	19,23	29,33	11,68	32,99	38,44	41,66	40,35	36,77	29,26	22,41	18,22
Min	6,42	7,98	9,71	14,97	20,02	24,97	31,15	27,11	24,10	17,50	11,03	7,36
Moy	11,82	13,60	24,52	13,32	26,50	31,70	36,38	33,73	30,43	23,38	11,72	12,79

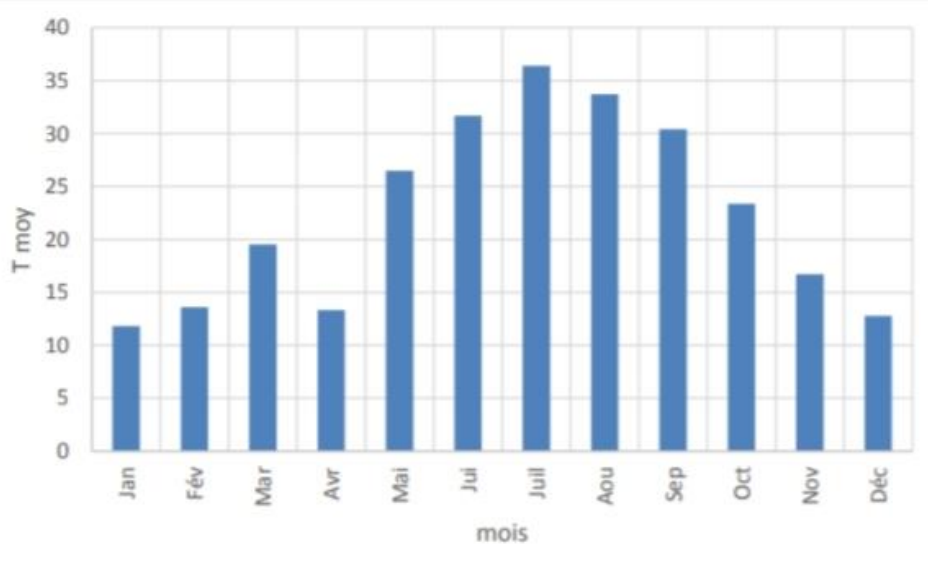


Figure I.3. Température moyenne mensuelle dans la région de Ghardaïa durant la période 2014-2023 (Messatefa, 2024).

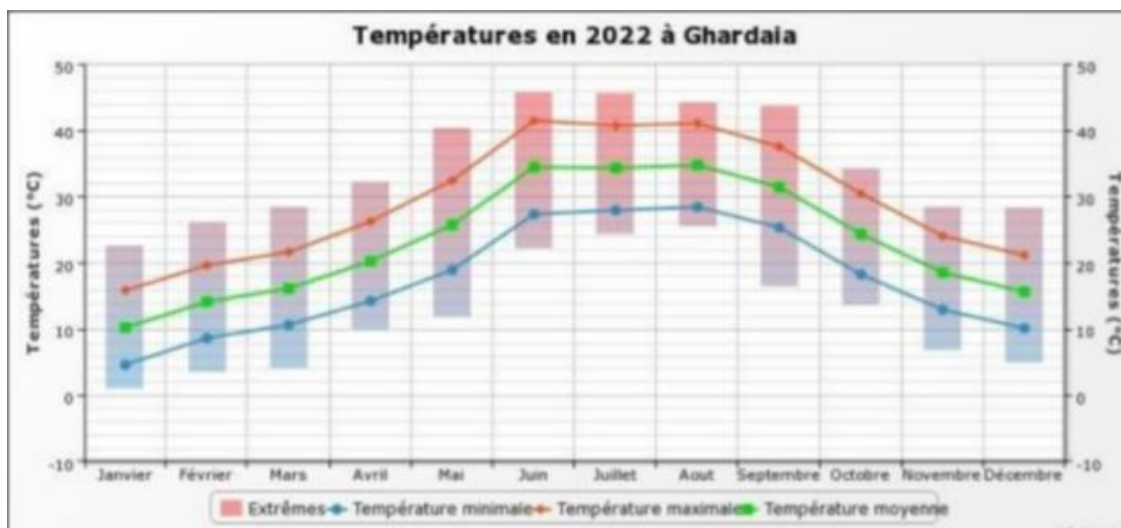


Figure I.4 : Température minimale, maximale et moyenne dans la région de Ghardaïa en 2022. (Seddi, 2024)

I.4.1.2 Précipitations

Les précipitations jouent un rôle essentiel dans le bilan hydrogéologique, car elles permettent d'évaluer les réserves d'eau dans la nappe phréatique superficielle ainsi que le régime des cours d'eau dans le bassin. Elles sont habituellement mesurées en millimètres, soit en hauteur de la lame d'eau tombée par unité de surface horizontale (mm)(Fifati,2012). Pour la région de Ghardaïa, les précipitations mensuelles ont été suivies pendant dix ans (2014-2023), comme l'indique le tableau 2. En règle générale, les précipitations mensuelles y sont faibles, ce que est caractéristique d'un climat aride. Les mois de mars (42mm) et d'octobre (14mm) ont enregistré les valeurs maximales, tandis que le mois de juillet (1mm), et aucune pluie n'a été mesurée en juin. Ce modèle de précipitations contribue à expliquer la sécheresse qui affecte cette région.(Messatefa, 2024 ; Seddi, 2024).

Tableau I.2. Précipitations mensuelles observées dans la région de Ghardaïa, de 2014 à 2023. (Messatefa, 2024).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
P(mm)	1.24	3.47	3.52	3.65	3.82	0.71	0.20	2.22	4.68	5.46	3.35	1.16

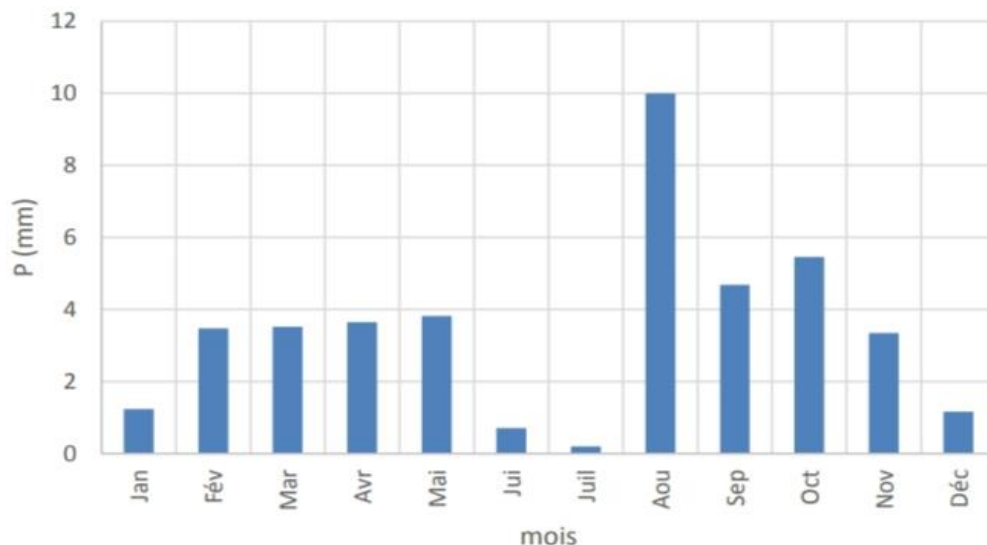


Figure I.5. Évolution des précipitations mensuelles moyennes dans la région de Ghardaïa sur la période 2014–2023. (Messatefa, 2024).

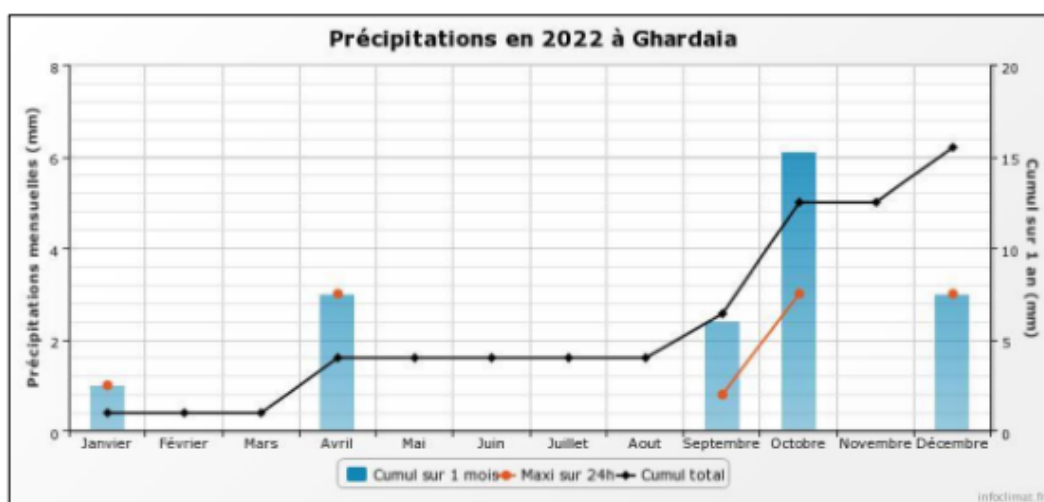


Figure I.6. Histogramme illustrant les moyennes mensuelles des précipitations selon moulay (omar et benhamadi, 2020)

I.4.1.3. Le vent

Les mouvements éoliens sont des facteurs déterminants dans la formation de la topographie désertique, contribuant ainsi à son caractère aride. L'effet des vents secs entraîne une évaporation intense dans la région (Moulisas, 1927). Le vent est l'agent principal du transport et de l'accumulation des dunes, ainsi que de la corrosion et du polissage des roches, tout en augmentant l'environnement désertique (Monod, 1992). De plus, les vents jouent un rôle primordial dans la dispersion des matériaux sur de longues distances (Kuhnelt, 1969). En outre, le vent agit comme un facteur influent

sur la répartition des précipitations, contribuant à une augmentation des taux d'évaporation et à une diminution des températures, ce qu'intensifie la condition climatique extrême dans les régions désertiques (White, 1986). Les vents dans cette région se divisent en deux types principaux : d'une part, les vents de sable, soufflant principalement en automne, au printemps et en hiver, avec une direction Nord-Ouest. D'autre part, les vents chauds (sirocco), que dominant en été, soufflent du Sud au Nord, sont très sec et entraînent une forte évapotranspiration, nécessitant des irrigations importantes. (Biad, 2022)

Tableau I. 3. Vents mensuels de la région de Ghardaïa, période de 2014-2023. (Messatefa, 2024).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Vent(mm)	9,51	8,85	8,50	8,42	8,59	8,64	9,20	8,86	8,77	9,60	9,43	9,56

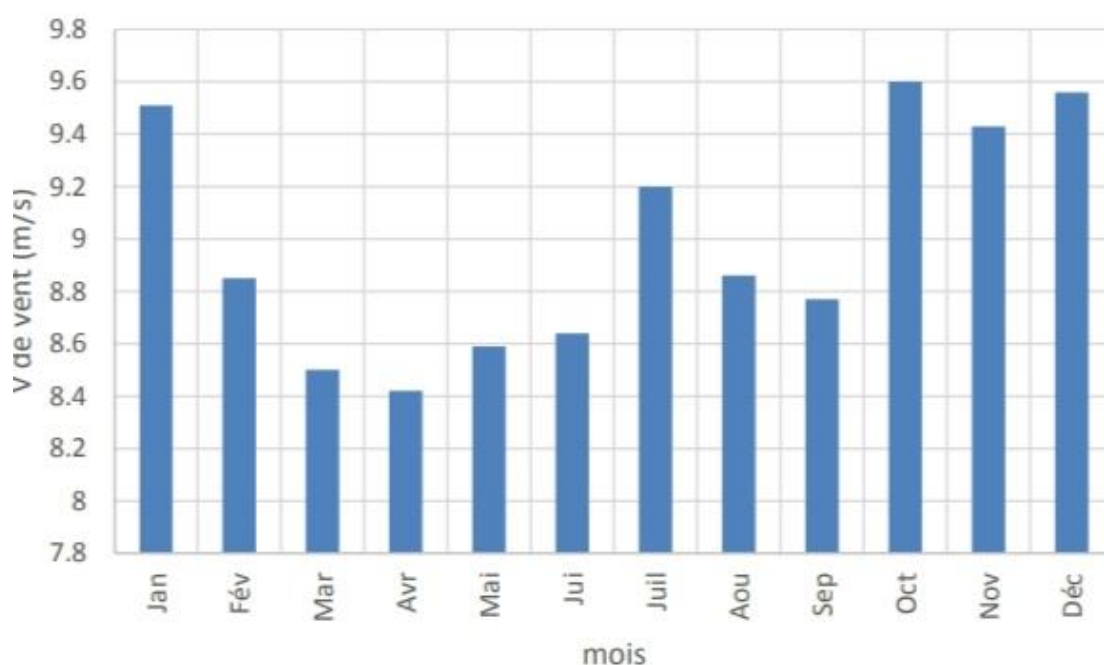


Figure I.7: Variation mensuelle moyenne de la vitesse du vent dans la région de Ghardaïa entre 2014 et 2023. (Messatefa, 2024).

I.4.1.4. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration ce processus comprend à la fois l'évaporation physique et la transpiration (évaporation physiologique). Il est ainsi influencé par les conditions climatiques ainsi que par la disponibilité en eau (Fafati, 2012). Ghardaïa, que fait partie des régions les plus sujettes à une forte évaporation dans le Sahara, connaît une perte d'eau due à diverses causes :

- L'évaporation des masses d'eau libres ou de celles contenues dans le sol.
- L'évaporation par les plantes (qui reste secondaire dans les régions sahariennes).

L'évaporation y est particulièrement intense, notamment lorsqu'elle est accentuée par les vents chauds. Elle atteint environ 2660,05 mm par ans, avec un pic mensuel de 387,66 mm en juillet et un creux de 95,88 mm en janvier. En moyenne, l'évaporation s'élève à 221,67 mm par mois (Fafati, 2012).

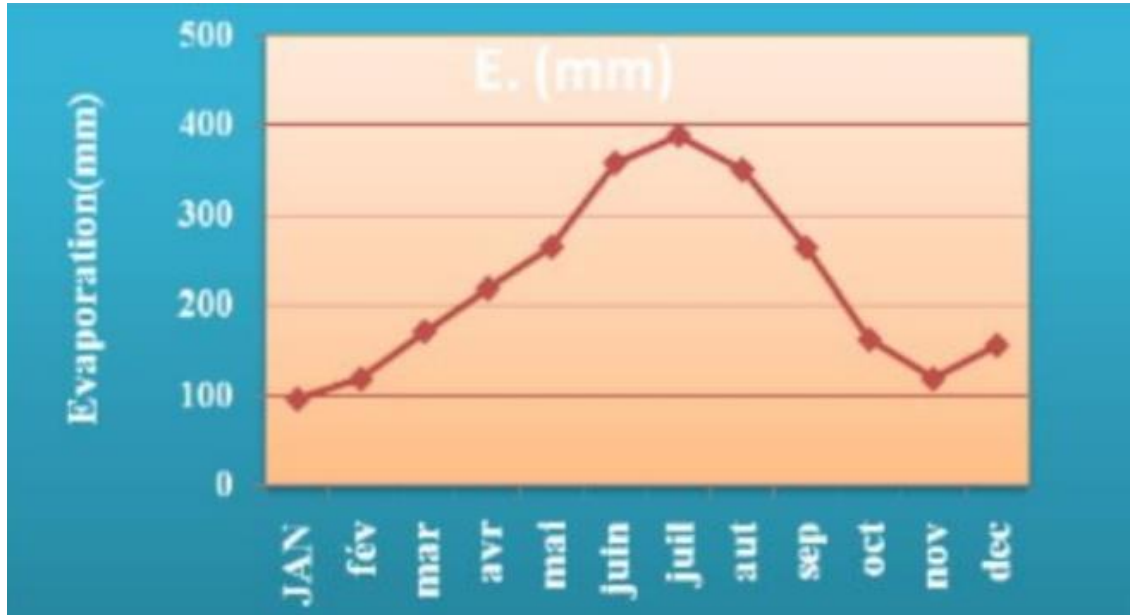


Figure I.8. Taux moyen annuel d'évaporation selon Fafati (2012).

I.4.2. synthèse climatique

La température et les précipitations sont les principaux facteurs déterminants pour définir le climat d'une zone spécifique (Faurie et al, 1984). Le diagramme ombrothermique de Gaussen permet d'identifier les saisons humides et sèches, tandis que le climagramme pluviométrique d'Emberger est utilisé pour définir les zones bioclimatiques (Faurie et al, 1984).

I.4.2.1 Climagramme d'Emberger

L'indice pluviothermique d'Emberger (Q3), conçu pour caractériser les climats méditerranéens, permet de positionner une région dans son étage bioclimatique en tenant compte des précipitations et des températures. Il se calcule à l'aide de la formule :

$$Q2 = 2000 \times P / (M - m)(M + m)$$

Cependant, Stewart (1969) a proposé une version simplifiée pour le contexte de l'Algérie et du Maroc :

$$Q3 = 3,43 \times P / (M - m)$$

Avec :

Q3 : quotient pluviométrique d'Emberger

P : précipitations annuelles moyennes (mm)

M : température moyenne maximale du mois le plus chaud (°C)

m : température moyenne minimale du mois le plus froid (°C)

Pour la région de Ghardaïa, l'analyse sur la période 2010–2019 donne un Q3 de 5,43. En croisant cette donnée avec la température minimale hivernale $m = 6,56$ °C sur le climagramme d'Emberger, il apparaît que Ghardaïa se situe dans l'étage saharien à hiver doux. (Oulad Noui et Rouabah, 2020).

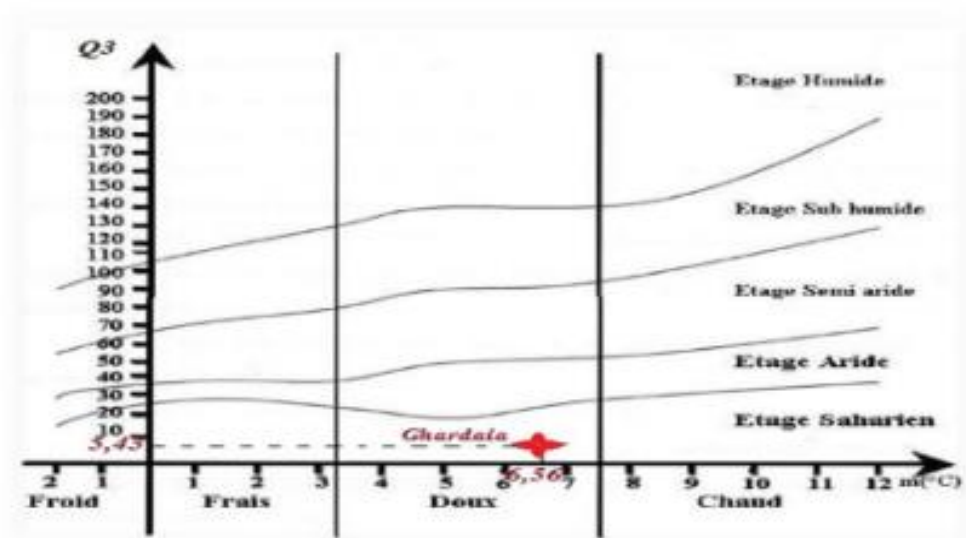


Figure I.9: Etage bioclimatique de la région de Ghardaïa selon le climagramme d'Emberger Oulad (Oulad Noui et Rouabah, 2020).

I.4.2.2 Diagramme ombrothermique de Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen sert à identifier les mois secs, définis comme ceux où les précipitations mensuelles en millimètres sont égales ou inférieures au double de la température en degrés Celsius.

D'après ce diagramme, la région d'étude présente une période de sécheresse qui s'étend sur toute l'année, englobant les 12 mois (Figure I.9) (kebili et bouziane mohmed, 2018).

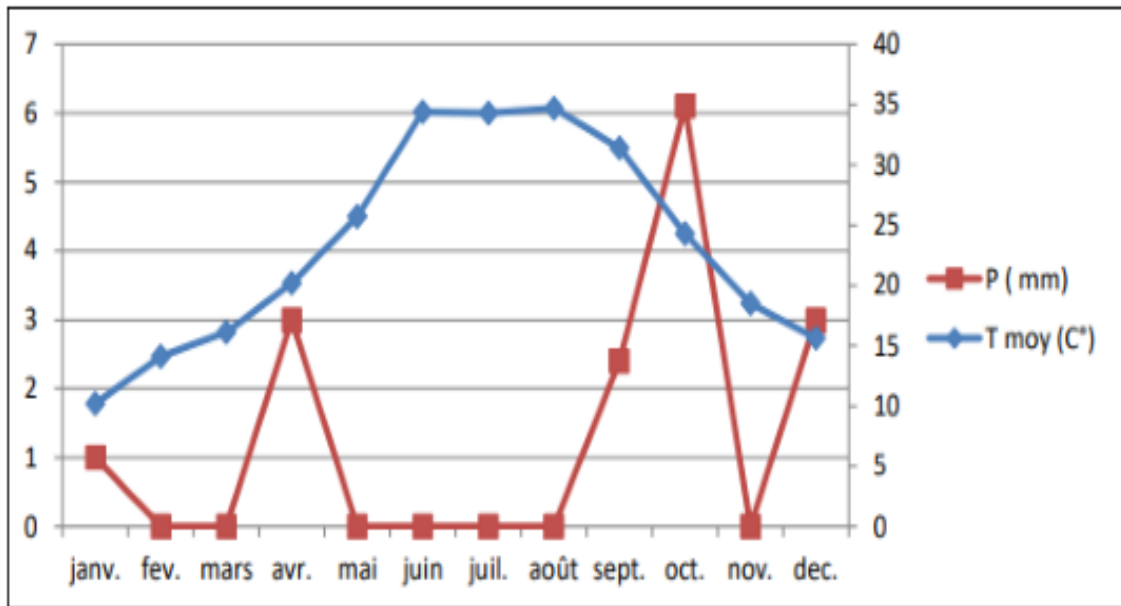


Figure I.10. Ombrothermogramme de Gaussen pour la région de Ghardaïa (année 2022) (Seddi, 2024).

I.5. Cadre géologique

La région de Ghardaïa se trouve au sein du vaste bassin sédimentaire du Sahara septentrional, caractérisé par des formations géologiques principalement tabulaires, légèrement inclinées vers le nord-est, en direction du centre du bassin. La succession stratigraphique au-dessus de l'Albien y est relativement simple, les différenciations stratigraphiques reposant essentiellement sur les propriétés lithologiques, en raison de la rareté des fossiles (Seddi, 2024).

Albien

L'Albien est constitué d'un dépôt continental formé de sables, de grès et d'argiles sableuses aux teintes variées. Son épaisseur peut dépasser les 400 mètres et il renferme une importante nappe souterraine (Sebti, 2015)

Cénomanién

Ce niveau correspond à des dépôts argilo-lagunaires constitués d'argile grise et noire, surmontés de couches de gypse et d'anhydrite dans la partie supérieure, et d'argile multicolore dans la partie inférieure. L'épaisseur de la formation cénomaniénne atteint 335 mètres, tandis que celle du vracien est estimée à 70 mètres (Sebti, 2015)

Turonien

Le Turonien correspond à un dépôt carbonaté atteignant 120 mètres d'épaisseur, constitué principalement de calcaire massif gris, enrichi par endroits en dolomie (Sebti, 2015)

Sénonien

a. Sénonien carbonaté

Le Sénonien carbonaté est formé d'une série de dépôts de 25 mètres d'épaisseur, marquée par une alternance de calcaire blanc fissuré et karstifié, d'argile jaune et de dolomie (Sebti, 2015).

b. Sénonien lagunaire

Le Sénonien lagunaire présente une épaisseur de 75 mètres, composée d'une succession de marnes bariolées, d'anhydrite, et de calcaire marneux aux teintes jaunes et rouges (Sebti, 2015)

Miopliocène

Le Miopliocène correspond à un dépôt continental détritique d'une épaisseur de 65 mètres, constitué de sables rougeâtres, de granulométrie moyenne à grossière, et enrichis en argile (Sebti, 2015)

Quaternaire

Les dépôts sédimentaires sahariens du Quaternaire sont constitués d'alluvions fluviales. Ils ne se cantonnent pas aux vallées de ruissellement, mais s'étendent aussi sur de vastes dépressions situées au cœur des chaînes montagneuses de l'Atlas saharien (Mutin, 1977).

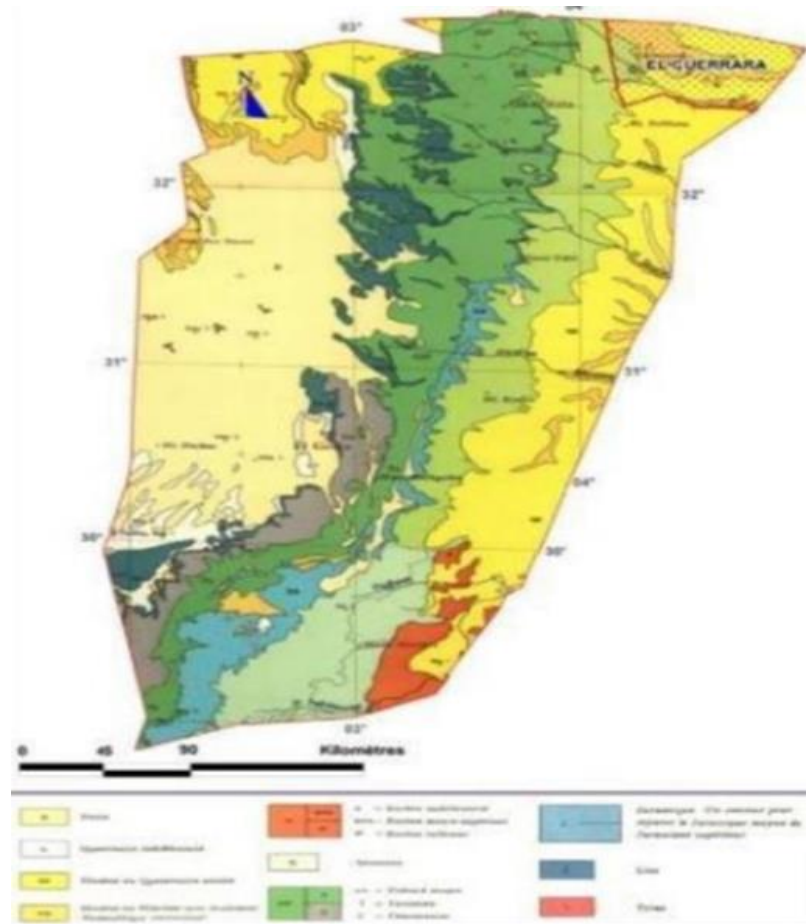


Figure I.11: Représentation géologique de la région de Ghardaïa d'après (ANRH, 2010).

I.6. Cadre hydrogéologique

I.6.1. Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS)

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) est reconnu comme l'un des plus vastes réservoirs d'eau souterraine au monde, selon les recherches récentes. Il se compose de plusieurs couches aquifères couvrant une superficie d'environ 1 100 000 km², répartie entre l'Algérie (60 %), la Libye (30 %) et la Tunisie (près de 10 %).

Les limites hydrogéologiques du système forment une ceinture continue allant de la frontière marocaine au nord-ouest du bassin jusqu'à la ville de Hun, à l'extrême sud-est de la Libye.

La dorsale du M'Zab divise le SASS en deux bassins principaux : un bassin occidental de 280 000 km² drainé vers le sud et un bassin oriental de 500 000 km² drainé vers le nord-est.

Le système s'étend du nord au sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux plateaux de Tidikelt et de Tinrhert, et d'ouest en est, de la vallée Guir-Saoura en Algérie jusqu'au graben de Hun en Libye. Il

comprend deux principaux réservoirs : le Complexe Terminal, contenant une nappe phréatique de sub-surface, et le Continental Intercalaire, plus étendu, abritant une nappe captive profonde. (Messatefa, 2024)

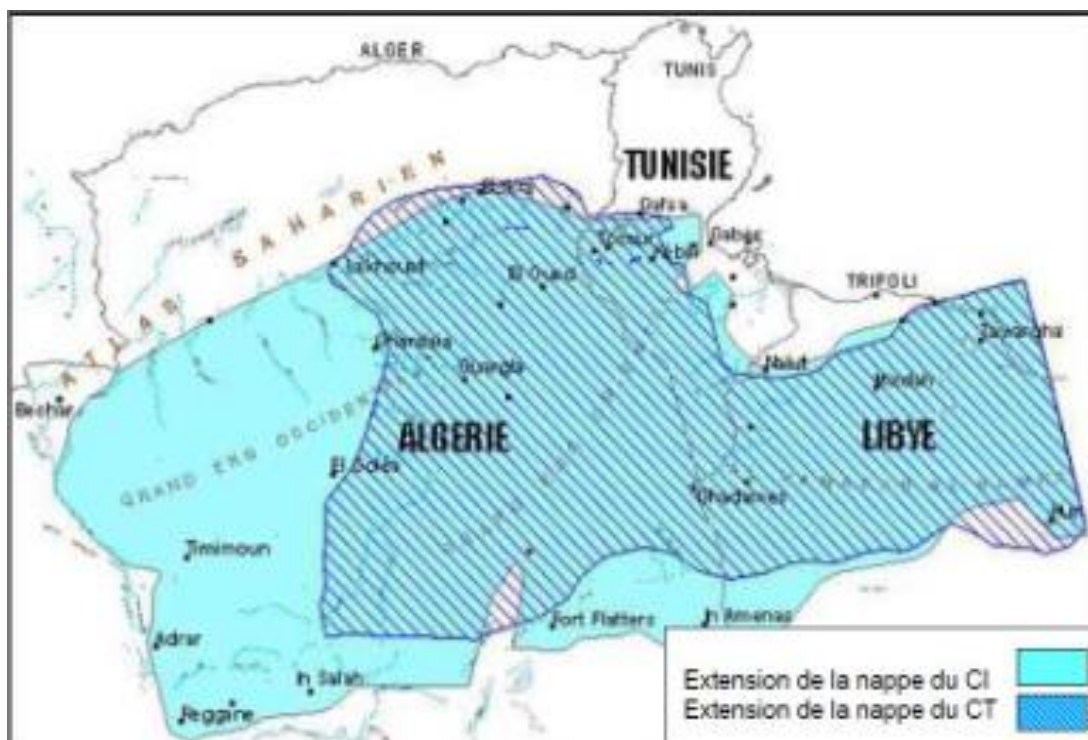


Figure I.12. Délimitation du bassin du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). (kebili et bouziane mohmed, 2018).

I.6.1.1 Continental Intercalaire

Le Continental Intercalaire constitue l'aquifère le plus étendu du bassin. Ses limites coïncident largement avec celles définies pour le domaine du SASS. Il regroupe principalement les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses du Crétacé inférieur. L'aquifère est recouvert par d'épais dépôts argilo-évaporitiques assurant une couverture imperméable (Messatefa, 2024).

I.6.1.1.1 Limites et structure du CI

Le domaine du CI est subdivisé en deux sous-bassins hydrogéologiques par la dorsale du M'zab, orientée approximativement Nord-Sud : le sous-bassin oriental et le sous-bassin occidental.

L'ensemble couvre une superficie d'environ 1 100 000 km², avec une épaisseur moyenne de 358 mètres.

Les failles orientées Nord-Sud, notamment celle d'Amguid El Biod qui prolonge le socle ancien de l'Ahaggar, exercent une influence marquée sur la partie méridionale du réservoir du CI. (Messatefa, 2024)

I.6.1.1.2 Piézométrie et alimentation du CI

les flux d'eau souterraine issus de l'Atlas saharien se répartissent en deux grandes directions. D'une part, ils s'écoulent vers le Sud et le Sud-Ouest, en direction des régions du Tidikelt, du Touat et d'Adrar. D'autre part, ils progressent vers le Nord-Est, en direction des zones des chotts et de la nappe côtière tunisienne.

Bien que situé en milieu aride, le CI reçoit une alimentation directe par infiltration des eaux de ruissellement sur les zones d'affleurement périphériques, notamment au niveau des piémonts de l'Atlas saharien et des bordures méridionales des plateaux du Tidikelt et du Tinrhert.

Une alimentation indirecte s'effectue également au travers des dunes de sable du Grand Erg Occidental. (Messatefa, 2024)

I.6.1.1.3. Organisation de l'aquifère du Continental Intercalaire dans la région du M'Zab

Dans la région du M'Zab, le Continental intercalaire est principalement composé de sables fins et de grès aux teintes jaunâtres à grises, entrecoupés de couches d'argile. Cet ensemble gréso-sableux forme un aquifère, dont l'Albien constitue l'étage le plus exploité à travers de nombreux forages répartis sur toute la wilaya de Ghardaïa.

La profondeur du sommet de cet aquifère varie selon les zones, oscillant entre 650 et 700 mètres, notamment dans les régions de Zelfana et de Guerrara.

Au niveau de la vallée du M'Zab, le toit de l'aquifère albien se situe à une profondeur comprise entre 290 et 300 mètres. Les forages réalisés dans cette vallée atteignent en moyenne une profondeur de 500 mètres.

Le comportement hydrodynamique de la nappe dépend de l'altitude locale ainsi que de l'épaisseur des formations recouvrantes. Dans les secteurs sud et est de la wilaya, l'eau jaillit naturellement sous pression (artésianisme), avec des pressions à la tête des forages variant entre 0,5 et 4 bars.

À l'inverse, dans les régions nord et ouest, l'exploitation de la nappe nécessite un pompage mécanique (Seddi, 2024).

I.6.1.2 Complexe terminal

Le complexe terminal couvre une superficie d'environ 665 000 km² et regroupe plusieurs aquifères formés au cours de différentes périodes géologiques, notamment le Turonien, le Sénonien, l'Éocène et le Mio-Pliocène. Ces aquifères sont interconnectés, constituant ainsi un système hydraulique intégré. Les affleurements de ces formations géologiques sont localisés comme suit :

- Au nord : dans le sillon des chotts algéro-tunisiens,
- À l'est : le long du flanc oriental du Dahar et du Djebel Nafusa en Tunisie,
- Au sud : sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït,
- À l'ouest : au niveau de la dorsale du M'zab (calcaires du Turonien), considérée comme une zone d'alimentation majeure du complexe terminal.

Étant donné que la limite de la nappe du complexe terminal se situe plus à l'est de la région du M'zab, son exploitation dans la région de Ghardaïa s'avère peu concluante. Par conséquent, seule la nappe du complexe inférieur sera abordée en détail (Seddi, 2024).

I.6.1.2.1 Alimentation et écoulement

Le réservoir du Complexe Terminal a connu sa principale phase de remplissage durant les périodes pluvieuses du Quaternaire. Aujourd'hui encore, la recharge de la nappe se poursuit grâce à des apports hydriques significatifs, provenant :

- de l'infiltration des eaux de ruissellement issues des massifs montagneux ;
- de la traversée des formations perméables affleurantes, telles que l'Atlas Saharien, le M'Zab et le Dahar ;
- ainsi que des infiltrations exceptionnelles des pluies dans les sables du Grand Erg Oriental, reposant partiellement sur des horizons perméables du Complexe Terminal (Messatefa, 2024).

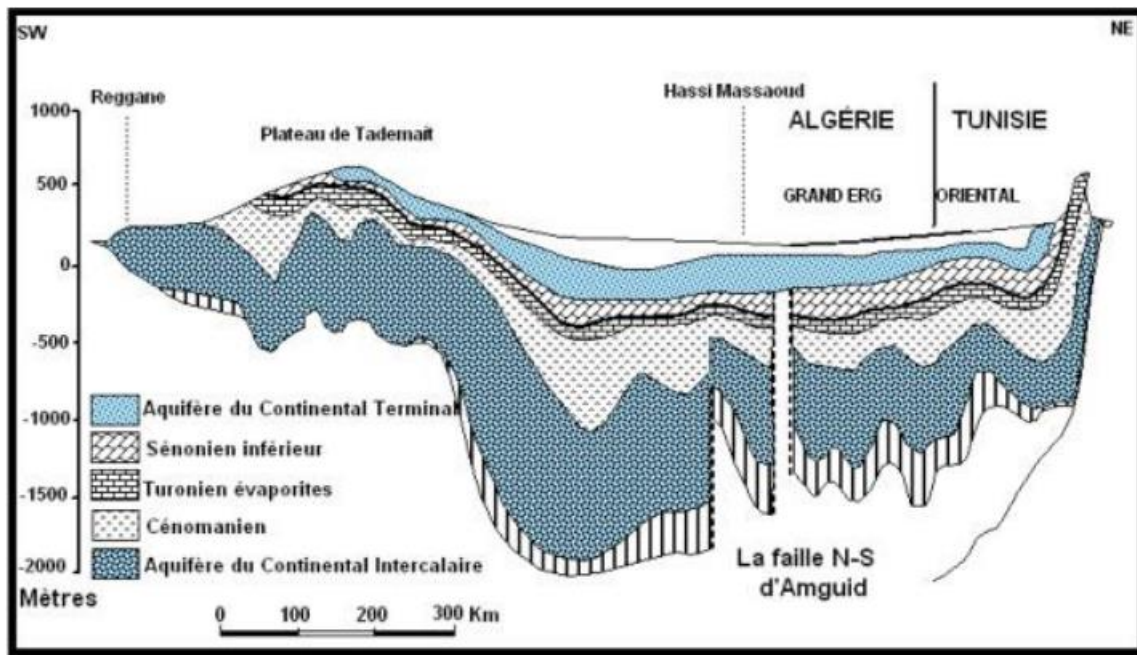


Figure I.13 : Coupe transversale hydrogéologique du 'CT' (Messatefa, 2024).

I.6.2. L'aquifère albien dans la région de Ghardaïa

Cet aquifère, caractérisé par une température élevée, représente le principal réservoir géothermique du Sahara algérien.

Dans le Sahara septentrional, le Continental Intercalaire est constitué principalement de formations sableuses et argileuses datant du Barrémien à l'Albien. Toutefois, dans la région de Ghardaïa, seule la formation argilo-sableuse de l'Albien est exploitée efficacement. Selon les zones et l'inclinaison de la couche, l'aquifère albien est accessible à des profondeurs variant entre 160 et 1000 mètres d'ouest en est à travers la wilaya.

Dans les secteurs sud-ouest, notamment à Hassi Fhal, la nappe est relativement peu profonde, avec des toits situés entre 60 et 150 mètres, ce qui explique la forte densité de forages, essentiellement à usage agricole. En revanche, dans les zones nord-est telles que Guerrara et Zelfana, la profondeur du toit est plus importante, entre 650 et 700 mètres, limitant ainsi le nombre de forages.

Dans les communes proches du chef-lieu, telles que Metlili, Daya, Bounoura, Atteuf, Berriane, Sebseb et Mansoura, la profondeur du toit varie entre 250 et 320 mètres. À l'échelle locale, l'écoulement des eaux suit une direction générale d'ouest en est.

L'alimentation de la nappe, bien que réduite, provient principalement des précipitations au pied sud de l'Atlas Saharien, favorisées par l'accident sud-atlasique (moulay et benhamadi, 2020).

I.6.3 Répartition et nombre de forages

En fonction de l'altitude des zones et des variations de l'épaisseur des formations géologiques postérieures au Continental Intercalaire, la nappe albiennne présente des caractéristiques contrastées :

Elle est artésienne dans certaines localités, affichant des pressions en tête de puits, comme à Zelfana et Guerrara.

Ailleurs, elle nécessite un pompage à de grandes profondeurs, parfois supérieures à 120 mètres, notamment à Ghardaïa, Metlili et Berriane.

Dans le cadre de notre zone d'étude, la nappe du Continental Intercalaire est exploitée à travers des forages dont la profondeur varie selon les régions : entre 450 et 500 mètres à Sebseb et Ghardaïa, et entre 900 et 1000 mètres à Zelfana et Guerrara.

L'inventaire réalisé par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) en 2016 sur l'ensemble de la wilaya de Ghardaïa a recensé un total de 766 forages utilisant cette nappe pour divers usages : irrigation, alimentation en eau potable (AEP) et activités industrielles. (Seddi, 2024).

Tableau I.4 : Répartition des forages albiens selon l'état d'exploitation (ANRH, 2016)

Type de forage	Exploités	Non exploités	Total
Forage AEP	124	48	172
Forage irrigation	441	133	574
Forage industriel	18	2	20
Total général	583	183	766

I.6.4. Exploitation et utilisation

Les informations recueillies auprès des différents organismes en charge de la gestion de l'eau — la Direction des Services Agricoles (DSA), la Direction des Ressources en Eau (DRE), l'Algérienne des Eaux (ADE) et l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) — indiquent que le volume d'eau extrait de la nappe du Continental Intercalaire (CI) est passé de 186,5 hm³ en 2005 à 367,47 hm³ en 2011, pour atteindre 419,76 hm³ en 2016, soit un prélèvement annuel de 419,76 millions de mètres cubes (ANRH, 2016).

Tableau I.5. Évolution de l'exploitation des eaux du Continental Intercalaire selon l'usage (ANRH, 2016)

Usage	Volume d'eau exploité (hm ³ /an)		
	2005	2011	2016
AEP	43,49	58,74	68,5
IRP	137,02	302,02	344,33

AEI	5,99	6,71	6,93
TOTAUX	186,5	367,47	419,76

On remarque que le secteur agricole est de loin le plus grand consommateur d'eau avec un volume annuel de 344,33 hm³. Cette forte demande est principalement due aux programmes de développement mis en œuvre par l'État depuis les années 2000, notamment les initiatives de mise en valeur par concession et le dispositif d'Accès à la Propriété Foncière Agricole (APFA). (Seddi, 2024).

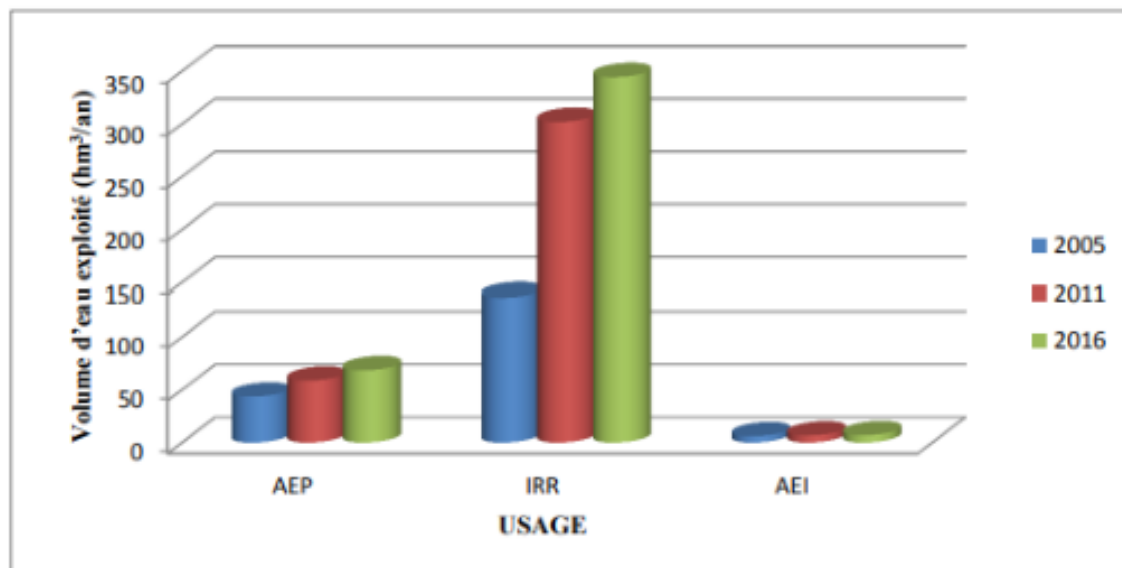


Figure I.14. Évolution de l'exploitation des eaux du Continental Intercalaire selon les usages entre 2005 et 2016 (Source : ANRH, 2016).

L'analyse de l'histogramme met en évidence une augmentation significative de la consommation d'eau destinée à l'irrigation entre 2005 et 2016, suivie d'une hausse des besoins en eau pour l'approvisionnement en eau potable (AEP). En revanche, les besoins en eau du secteur industriel sont restés relativement stables au cours de la même période. (Seddi, 2024).

I.5. Données d'analyse physico-chimique des eaux de forages de la région de Guerarra et Ghardaïa (2024) :

Pour effectuer les analyses physico-chimiques des eaux souterraines, 28 échantillons ont été prélevés par le laboratoire algérien des eaux, dont 13 dans la région de Ghardaïa et 14 dans la région d'El Guerarra. Les analyses physiques ont porté sur plusieurs paramètres essentiels tels que la turbidité, la conductivité électrique (CE), la dureté totale (TH) et la salinité. Par ailleurs, les analyses chimiques ont inclus les principaux éléments ainsi que l'alcalinité totale (TAC). Les concentrations en calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), potassium (K⁺), sodium (Na⁺), sulfate (SO₄²⁻), chlorure (Cl⁻) et alcalinité totale (TAC) influencent la qualité de l'eau. Les résultats révèlent que la composition

chimique des eaux souterraines dépend principalement de la nature lithologique des formations traversées par l'eau ainsi que du temps de résidence dans ces formations. Ces analyses revêtent une importance particulière, compte tenu des multiples usages des eaux souterraines, notamment pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et l'industrie

I.8. Conclusion

La région de Ghardaïa est située dans le nord du Sahara algérien, à environ 600 kilomètres au sud de la capitale, Alger. Elle est caractérisée par un climat saharien typique, avec des hivers courts et froids, et des étés longs, secs et extrêmement chauds, où les températures dépassent souvent les 40 °C.

Cette région fait partie intégrante du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), dont les principales ressources en eau sont d'origine souterraine. Deux grands types d'aquifères y sont présents :

Les aquifères superficiels, localisés dans les formations calcaires fissurées du Sénonien et du Turonien, ainsi que dans les alluvions des vallées d'oueds. Ces nappes sont alimentées directement par les précipitations et les ruissellements fréquents.

L'aquifère profond, souvent captif, appartient au Continental Intercalaire. Il constitue une ressource majeure, formée de sables, grès et argiles sableuses datant de l'Albien. Sa profondeur de captage varie considérablement, de 80 à 1000 mètres selon les zones. Les eaux de cet aquifère sont exploitées à travers des forages à des fins agricoles (irrigation), industrielles et pour l'alimentation en eau potable (AEP).

Chapitre II : Généralité sur la Qualité des eaux Souterraine

II.1. Introduction

Longtemps considérées comme des ressources pures, protégées naturellement par les couches du sol contre les impacts des activités humaines, les eaux souterraines sont aujourd'hui de plus en plus exposées à la contamination par divers polluants à haut risque, notamment les nitrates et les pesticides.

Les eaux des nappes souterraines présentent généralement une composition chimique stable et sont riches en sels minéraux. Leur exploitation exige la mise en place de systèmes de captage adaptés ainsi que des équipements hydrauliques de distribution, tels que des pompes souvent de grande capacité.

La porosité et la structure géologique du sol influencent directement le type de nappe et le mode de circulation des eaux souterraines.

Une nappe peut être libre, c'est-à-dire alimentée directement par l'infiltration des eaux de pluie ou de ruissellement. Elle peut aussi être captive, lorsqu'elle est confinée entre deux couches imperméables, et maintenue sous pression en raison de la faible perméabilité des formations qui la surplombent.

Les nappes alluviales représentent un cas particulier : elles se trouvent dans les terrains alluviaux traversés par un cours d'eau en surface (moulay et benhamadi, 2020).

II.2. Caractéristique des eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent une réserve naturelle d'eau située dans les profondeurs de la terre, plus précisément dans les zones saturées. Elles proviennent de l'infiltration et de la percolation des eaux de surface à travers le sol, et sont stockées dans des formations géologiques appelées aquifères.

La composition chimique de ces eaux dépend étroitement de la nature des roches traversées lors de leur parcours, établissant un équilibre entre les composants minéraux du sol et ceux de l'eau.

Bien que les eaux souterraines respectent généralement les normes de potabilité, il arrive parfois qu'elles contiennent certains éléments à des concentrations supérieures aux limites recommandées, ce qui nécessite un traitement préalable avant leur distribution pour la consommation.

Protégées naturellement des sources de pollution, ces eaux présentent une qualité relativement stable dans le temps, réduisant ainsi les contraintes de traitement pour les stations d'épuration.

Principales caractéristiques des eaux souterraines :

- Faible turbidité : grâce à la filtration naturelle du sol.

- Faible contamination bactérienne : due au long séjour dans le sous-sol et à l'absence de matières organiques.
- Température stable : protégées des rayonnements solaires et des variations climatiques.
- Faible indice de couleur : absence de contact avec des substances végétales colorantes.
- Débit régulier : la quantité et la qualité restent constantes tout au long de l'année.
- Dureté souvent élevée : causée par la présence d'ions divalents comme Ca^{2+} et Mg^{2+} issus des roches.
- Concentration élevée en fer et manganèse : ces métaux se dissolvent facilement en l'absence d'oxygène dissous (Hassani et Noui, 2022).

II.3 Norme de qualité d'eau

L'eau potable est une eau douce. Elle doit respecter les normes sanitaires les plus récentes de l'Organisation Mondiale de la Santé, sans présenter de risque immédiat ou à long terme pour la santé. (Kadri et Mesroua, 2020).

Tableau II.1. Normes d'eau acceptable pour la consommation humaine.(Selmane, 2023).

Paramètre	Unités	Norme algérienne (2011)	Norme d'OMS (2011)
T (°C)	(°C)	25	-
pH	-	6.5 – 9.0	8.5
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	2800	1500
Ca^{2+}	mg/l	200	75
Mg^{2+}	mg/l	150	100
HCO_3^-	mg/l	-	300
Cl^-	mg/l	500	250
SO_4^{2-}	mg/l	400	250
TH	mg/l	200	500
NO_3^-	mg/l	50	50
Na^+	mg/l	200	200
K^+	mg/l	12	12
NO_2^-	mg/l	0.2	3
NH_4^+	mg/l	0.5	1.5

II.4. Principaux Paramètre de Potabilité

I.4.1. Paramètres organoleptiques

II.4.1.1.Couleur

Les eaux souterraines sont généralement limpides et incolores, sauf lorsqu'elles contiennent une concentration importante de sels de fer. La présence de matières en suspension peut également altérer la couleur de l'eau (Hasnia, 2018).

II.4.1.2.Odeur

Une eau potable est en principe inodore. Les odeurs indésirables peuvent être dues à la présence de composés chimiques, à la décomposition de matières organiques, ou encore à certains micro-organismes comme les protozoaires ou autres êtres aquatiques (Adda, 2013 ; Seddi, 2024).

II.4.1.3. Goût

Le goût de l'eau est influencé par les sels et les gaz dissous. Une eau de bonne qualité doit être sans saveur. Le goût peut également être défini comme la sensation causée par des substances dont la tension de vapeur et l'odeur sont faibles voire imperceptibles (Proulx, 2010). (Seddi, 2024).

II.4.2. Paramètres bactériologiques

II.4.2.1 Coliformes fécaux

C'est un sous-groupe des coliformes totaux l'espèce la plus proche de ce groupe bactérien est l'*Escherichia Coli* (*E. coli*). Sa présence dans l'eau de puits indique définitivement une contamination fécale par le fumier ou les eaux usées d'une fosse septique à proximité (Adda, 2013).

II.4.2.2. Coliformes totaux

Ce sont des bactéries en formes bâtonnet (aérobies ou anaérobies). Il se présente naturellement dans le sol et dans le tube digestif des humains et des animaux. Ainsi, sa présence dans l'eau peut indiquer une contamination fécale et peut également signifier que l'eau de surface s'infiltre dans les eaux souterraines et peut être impropre à la consommation (Adda, 2013).

II.4.2.3. Escherichia coli

Le terme « E. coli » correspond à des coliformes thermo tolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane et ont les caractères biochimiques propres à cette espèce, est utilisée à titre d'indicateur de la qualité des eaux (Rodier et al, 2009).

II.4.2.4. Les streptocoques fécaux

Ce sont des indicateurs de pollution et sont généralement pris en compte comme des témoins depollution fécale, car tous ont un habitat fécal (Adda, 2013).

II.4.3. Paramètres physique et chimiques

II.4.3.1. Température (T°)

La température joue un rôle déterminant dans la conductivité électrique, en influençant la solubilité des sels et des gaz, ainsi que la dissociation des composés dissous. Ces variations permettent de différencier les eaux profondes de celles en surface, facilitant ainsi la traçabilité de leur origine après l'analyse du pH (Kadri et Mesroua, 2020).

II.4.3.2. La conductivité électrique

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface, séparées de 1 cm. La plupart des substances dissoutes dans l'eau sont présentes sous forme d'ions chargés électriquement. Par conséquent, la mesure de la conductivité permet d'évaluer la concentration des sels dissous dans l'eau. La conductivité dépend également de la température de l'eau et augmente généralement avec la température. De plus, elle constitue un moyen efficace de valider les analyses physico-chimiques de l'eau. La conductivité de l'eau naturelle varie généralement entre 50 et 1500 µS/cm. En termes de qualité de l'eau, le classement suivant est proposé (Seddi, 2024).

Tableau II.2: Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (Seddi, 2024).

Conductivité électrique (µS/cm)	Qualité de l'eau
50 à 400	Excellente
400 à 750	Bonne
750 à 1500	Moyenne, mais l'eau reste utilisable
> 1500	Minéralisation excessive (salinité trop élevée)

II.4.3.3 Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'eau exprime la concentration en ions hydrogène (H^+), ce qui permet d'évaluer son acidité ou son alcalinité, ainsi que son pouvoir corrosif ou sa tendance à provoquer des dépôts calcaires. Les eaux issues des aquifères sableux ou granitiques présentent généralement un pH acide, tandis que celles provenant de formations calcaires tendent à être alcalines. L'ajustement du pH peut se faire en éliminant l'excès de CO_2 dissous ou en modifiant la dureté carbonatée. (Seddi, 2024).

Tableau II.3 : Typologie des eaux selon leur valeur de pH (Hassani et Noui, 2022).

Valeur du pH	interprétation
pH < 7	Acidité marquée $\Rightarrow$ présence d'acides minéraux ou organiques dans l'eau
pH = 7	Eau neutre.
7 < pH < 8	pH quasi neutre $\Rightarrow$ concerne surtout les eaux de surface.
5.5 < pH < 8	Représente la majorité des eaux souterraines.
pH > 8	Forte alcalinité, due à une évaporation importante.

II.4.3.4 La turbidité

La turbidité résulte de la présence de particules en suspension dans l'eau, telles que les matières organiques, les argiles ou encore les micro-organismes. Elle est mesurée à l'aide d'un turbidimètre et exprimée en unités NTU (Néphélométric Turbidité Unit). Ce paramètre revêt une grande importance, car une eau trouble peut indiquer une contamination microbiologique potentielle (Kankou et al.2004).

Tableau II.4. Catégories courantes de turbidité (NTU : unité néphélométrique de turbidité (Hassani et Noui, 2022).

Turbidité (UTN)	Description
UTN < 5	Eau limpide
5 < UTN $\leq$ 30	Eau légèrement troublée
UTN > 50	Eau très troublée
UTN	La majorité des eaux de surface en Afrique présentent ce niveau de turbidité

II.4.3.5 La salinité (SAL):

La salinité correspond à la concentration en sels dissous dans une solution, exprimée en grammes par litre. Elle peut provenir de diverses sources telles que la roche mère, les eaux utilisées pour l'irrigation ou encore les apports d'engrais (Ouzal, 2005).

II.4.3.6 Résidus et Total des Solides Dissous (TDS)

L'évaluation des résidus dans une eau non filtrée permet d'estimer la quantité de matières dissoutes et en suspension, désignée comme résidu total. En revanche, lorsque l'eau est préalablement filtrée, le résidu mesuré ne concerne que les substances dissoutes. Ce paramètre est sensible à la température et à la durée de dessiccation (Rodier et al, 2009 ; Seddi, 2024).

II.4.3.7 Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) :

La dureté totale de l'eau résulte de la présence de sels dissous de calcium et de magnésium. On distingue deux formes de dureté :

La dureté carbonatée, due aux carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium, et la dureté non carbonatée, provenant d'autres types de sels.

La dureté se mesure par le titre hydrotimétrique, exprimé en degrés français (°F), où 1 °F équivaut à 10 mg de carbonate de baryum par litre d'eau. Des valeurs faibles (entre 50 et 120 mg/l) caractérisent les eaux douces, tandis que les eaux dures présentent un titre compris entre 250 et 320 mg/l (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).

Tableau II.5: Classification des eaux selon leur dureté (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).

Dureté en °F	Qualité de l'eau
0 à 5	Eau très douce
5 à 12	Eau douce
12 à 25	Eau moyennement dure
25 à 32	Eau dure
> 32	Eau très dure

II.4.3.8. Les ions majeurs

□ Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+})

Le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) sont deux éléments largement présents dans les roches de nature variée, qu'elles soient sédimentaires, ignées ou cristallines. En raison de leur grande solubilité, ils se retrouvent fréquemment dans la majorité des eaux naturelles (Touhari, 2015 ; Seddi, 2024).

□ Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+)

Le sodium est un élément largement présent dans la nature, notamment dans les feldspaths, les évaporites et les argiles. Il se caractérise par une grande mobilité dans l'environnement et se trouve fréquemment associé aux chlorures et aux bromures (Touhari, 2015).

Le potassium, bien qu'abondant sur le plan géologique, est généralement peu concentré dans les eaux en raison de sa forte capacité d'adsorption et de rétention dans les sols, en particulier dans les argiles. Ses principales sources sont les roches cristallines – contenant des minéraux moins altérables que ceux riches en sodium ainsi que les évaporites et les argiles (Touhari, 2015 ; Seddi, 2024).

□ **Les chlorures (Cl^-)**

L'ion chlorure se distingue des autres éléments par son comportement : il n'est ni adsorbé par les formations géologiques, ni facilement réactif avec d'autres substances chimiques, ce qui lui confère une grande mobilité. De ce fait, il représente un excellent traceur de pollution. Les concentrations en chlorures dans les eaux varient fortement, principalement en fonction de la nature des formations géologiques traversées, notamment les roches magmatiques riches en minéraux chlorés (Touhari, 2015)

□ **Fer (Fe^{2+})**

Le fer peut se présenter dans l'eau sous diverses formes. Dans les conditions courantes, correspondant à un pH compris entre 4,5 et 9, le fer dissous se trouve principalement sous forme ferreuse (Fe^{2+}), notamment en milieu réducteur comme c'est souvent le cas dans les eaux souterraines. En revanche, le fer ferrique (Fe^{3+}) n'est significativement soluble que lorsque le pH est inférieur à 3. Selon les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la concentration maximale admissible en fer pour l'eau potable est fixée à 0,3 mg/l (Rodier et al, 2009 ; Seddi, 2024).

□ **Sulfates (SO_4^{2-})**

Les sulfates présents dans les eaux proviennent de diverses sources. D'origine naturelle, ils résultent des précipitations atmosphériques et de la dissolution de roches sédimentaires évaporitiques telles que le gypse (CaSO_4), la pyrite (FeS_2), et plus rarement, de certaines roches magmatiques comme la galène, la blende ou la pyrite. Les sources anthropiques incluent principalement la combustion du charbon et du pétrole, générant une importante quantité de composés soufrés retrouvés dans les précipitations, ainsi que l'utilisation d'engrais chimiques (Touhari, 2015 ; Seddi, 2024).

II.4.3.9 Nutriments :

La présence de ces éléments dans les eaux souterraines peut parfois être d'origine naturelle ; cependant, une concentration élevée indique le plus souvent une pollution due à des infiltrations provenant de sources naturelles ou d'activités humaines telles que l'agriculture ou les eaux usées.

□ **Phosphate (PO_4^{3-})**

Le phosphore peut se retrouver dans les eaux sous forme dissoute ou en suspension, sous des formes minérales ou organiques. Les composés phosphorés détectés par spectrophotométrie sont identifiés comme des orthophosphates. En milieu acide, l'hydrolyse permet de révéler le phosphore hydrolysable ainsi que le phosphore minéralisé. Ainsi, chaque fraction du phosphore présent dans l'eau peut être analysée et classée en orthophosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique (Hasnia, 2018).

Le phosphore est le plus souvent présent sous forme d'orthophosphate, provenant principalement de :

- o eaux usées domestiques et fosses septiques, en raison des phosphates organiques issus des excréments et des restes alimentaires ;
- o détergents et engrais. Dans le secteur industriel, des phosphates sont ajoutés à l'eau afin d'éviter la précipitation des oxydes de fer ou des carbonates de calcium (Zereg, 2019 ; Seddi, 2024).

□ **Nitrates (NO_3^-)**

Les nitrates représentent la forme d'azote la plus oxydée et la plus soluble. Leur présence dans les eaux souterraines est principalement liée aux activités humaines telles que la production d'engrais, la fabrication d'explosifs et l'industrie nucléaire. La concentration maximale admissible dans l'eau potable est fixée à 50 mg/l, en raison de leurs effets nocifs sur la santé humaine (Selmane, 2023).

□ **Nitrite (NO_2^-)**

Les nitrites jouent un rôle transitoire dans le cycle de l'azote, se situant entre l'ammoniac et les nitrates. Ils résultent soit de l'oxydation bactérienne de l'ammoniac, soit de la réduction des nitrates. Bien qu'ils ne soient qu'un produit intermédiaire, ils sont rapidement transformés en nitrates par des réactions chimiques ou biologiques. Des taux élevés de nitrites sont souvent révélateurs d'une contamination par des substances toxiques (Touhari, 2019)

□ **Ammonium (NH_4^+)**

L'azote ammoniacal est un gaz hydrosoluble présent en très faible concentration dans les eaux naturelles, généralement inférieure à 0,1 mg/l. Il constitue un indicateur pertinent de la pollution des milieux aquatiques par les rejets urbains. Dans les eaux de surface, sa présence résulte principalement de la dégradation de matières organiques azotées et des échanges gazeux avec l'atmosphère (Makhoukh et al, 2011).

II.4.3.10 Métaux lourds

Parmi les métaux lourds susceptibles de s'accumuler dans le corps humain à la suite d'une exposition par l'eau figurent le plomb, le mercure, le cadmium, le zinc et le cuivre. Les effets sur la santé de ces métaux lourds varient en fonction de la nature de l'élément et du niveau d'exposition, et peuvent inclure des symptômes tels que la diarrhée, les nausées, la fatigue, les maux de tête, l'hépatite, des difficultés respiratoires et une intoxication aiguë (https://sciencecollege.uoanbar.edu.iq/News_Details.php?ID=828).

II.5. Pollution des eaux

II.5.1. Origines de la pollution

La pollution de l'eau peut être classée, selon son origine, en quatre grands types : industrielle, urbaine, agricole et atmosphérique (Adda, 2013).

II.5.1.1. Pollution industrielle

Ce type de pollution est provoqué par les rejets des industries : effluents thermiques et chimiques, eaux usées, déchets solides (notamment miniers) et émissions gazeuses. Sa nature dépend largement du secteur industriel concerné. La présence de substances toxiques en constitue l'aspect le plus dangereux (Adda, 2013).

II.5.1.2. Pollution urbaine

La pollution urbaine est issue de multiples sources, incluant les activités physiologiques et domestiques (comme les décharges publiques et les ordures ménagères), ainsi que les activités économiques, industrielles (matières organiques) et commerciales en milieu urbain. Les rejets d'origine domestique sont majoritairement de nature organique et bactériologique (Seddi, 2024).

II.5.1.3 Pollution agricole

La pollution d'origine agricole résulte principalement de l'usage d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires (insecticides, fongicides, herbicides, etc.) par les agriculteurs. Un usage excessif ou inapproprié de ces substances peut entraîner une contamination grave, notamment des eaux souterraines (Adda, 2013).

II.5.1.4. Pollution atmosphérique

La pollution de l'air représente une deuxième source croissante de pollution des eaux superficielles et souterraines, en raison des composés présents dans l'atmosphère, essentielle à la vie. Les principaux polluants atmosphériques sont :

- Le dioxyde de carbone : non toxique, mais fortement impliqué dans l'effet de serre.
- Le monoxyde de carbone : interfère avec l'absorption de l'oxygène par le sang, mais sa durée de vie atmosphérique est courte.
- Les oxydes d'azote : peu nocifs à faibles concentrations, mais précurseurs de l'ozone, dangereux pour la santé.
- Le plomb : extrêmement nocif pour la santé (Seddi, 2024).

II.6. Les principaux pollutions des eaux

II.6.1. Les polluants bactériologiques :

Elle est causée principalement par des bactéries issues des eaux usées non traitées, chargées de matières fécales et de déchets organiques. (Kadri et Mesroua, 2020).

II.6.2. Les polluants chimiques :

La pollution chimique résulte principalement du rejet des eaux usées contenant des produits d'entretien, des hydrocarbures ainsi que des métaux lourds. (Kadri et Mesroua, 2020).

II.6.3. Les polluants physiques

La pollution physique résulte de la présence de particules en suspension ou parfois de substances colloïdales, ce qui entraîne une turbidité ou une coloration marquée de l'eau. (Seddi, 2024).

II.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté les concepts fondamentaux relatifs à la qualité des eaux souterraines, ainsi que les principaux paramètres utilisés pour son évaluation. Il a également abordé les différentes sources de pollution, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, en soulignant leur impact sur l'équilibre des écosystèmes et les conditions de vie des êtres vivants. Par conséquent, la protection des

eaux souterraines constitue une nécessité impérative, appelant à la mise en œuvre de mesures adaptées pour leur préservation et leur durabilité.

Chapitre III : Calculs et interprétation des résultats de qualité.

III.1. Introduction

Les eaux souterraines représentent la principale source d’approvisionnement en eau potable pour la population. Grâce à leur infiltration à travers les couches du sol, elles bénéficient généralement d’une bonne qualité naturelle. Toutefois, cette ressource demeure vulnérable, car de nombreuses sources de pollution peuvent altérer sa qualité et la rendre impropre à l’usage.

La qualité de l’eau a fait l’objet de nombreuses études scientifiques, où elle est généralement définie comme l’ensemble des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l’eau.

Ainsi, la composition chimique de l’eau joue un rôle déterminant dans l’évaluation de sa qualité et dans sa classification, influençant directement sa possibilité d’utilisation pour l’alimentation en eau potable, l’irrigation ou les besoins industriels.

Ce chapitre a pour objectif d’analyser la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Ghardaïa et Guerrara à travers divers calculs, tels que les degrés de dureté, les indices de saturation, ainsi que l’évaluation de l’aptitude de ces eaux à l’irrigation. L’étude repose sur des données analytiques physico-chimiques collectées dans cette région.

Les échantillons analysés proviennent de différents forages, et les analyses ont été réalisées par le « Laboratoire de Contrôle de Qualité – Algérienne des Eaux, Unité de Ghardaïa », situé à Ghardaïa. (Hassani et Noui, 2022).

III.2. Vérification de la fiabilité des données

Avant d’interpréter les résultats d’analyses des eaux (souterraines et superficielles), il est essentiel de s’assurer de leur fiabilité. Pour cela, on utilise la méthode de l’équilibre ionique (BI).

En théorie, une eau naturelle est électriquement neutre, ce qui signifie que la somme des cations doit être égale à celle des anions, exprimées en équivalents chimiques. Toutefois, cette égalité est rarement parfaite dans la pratique, en raison d’incertitudes analytiques, de la présence d’ions non dosés, ou d’éventuelles erreurs de mesure.

Un certain écart est donc toléré, exprimé sous forme d’un pourcentage selon la formule suivante :

$$BI = \frac{\sum \text{charges positives} - \sum \text{charges negatives}}{\sum \text{charges positives} + \sum \text{charges negatives}} \times 100$$

Ce calcul permet de juger de la qualité des analyses chimiques. Il faut noter que les incertitudes varient selon les méthodes employées, et que la présence éventuelle d'anions organiques non pris en compte peut fausser l'équilibre ionique.

La qualité des résultats est évaluée comme suit :

- Excellente si $BI < 5 \%$
- Acceptable si $5 \% < BI < 10 \%$
- Douteuse si $BI > 10 \%$

(moulay et benhamadi, 2020).

Tableau III.1 : Résultats des calculs de la balance ionique pour l'année 2024.

La région	N° de forage	BI %	La région	N° de forage	BI %
GEURARRA	F1	5%	Ghardaïa	F1	2%
	F2	0%		F2	1%
	F3	3%		F3	9%
	F4	7%		F4	15%
	F5	0%		F5	7%
	F6	5%		F6	3%
	F7	-5%		F7	18%
	F8	-3%		F8	12%
	F9	5%		F9	14%
	F10	1%		F10	14%
	F11	8%		F11	9%
	F12	6%		F12	14%
	F13	-7%		F13	19%
	F14	-8%			

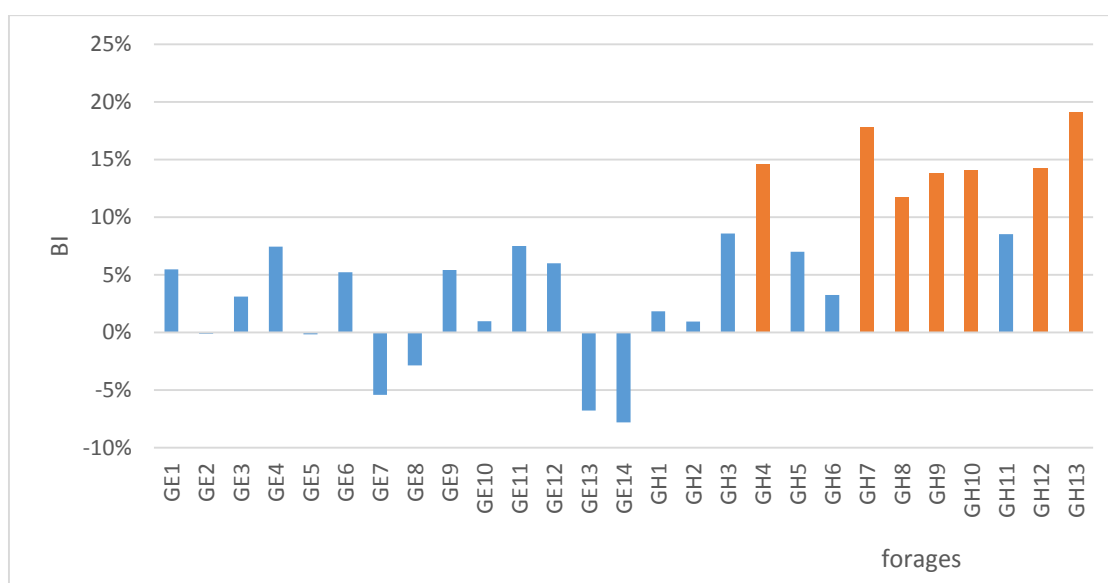


Figure III.1 : Histogramme représentant l'équilibre ionique pour l'année 2024.

Le graphique présenté ci-dessus illustre l'équilibre ionique calculé pour chaque échantillon d'eau analysé. Il révèle que les eaux de 7 forages à Ghardaïa présentent un déséquilibre ionique supérieur à 10 %, ce qui est considérable, ce qui peut être attribué à une erreur ponctuelle ou à un artefact analytique.

III.3. Vérification aux normes Algériennes

Afin de garantir la potabilité de l'eau de manière régulière, des normes nationales ont été établies pour fixer les concentrations maximales admissibles de certaines substances potentiellement nocives. Ainsi, le fait qu'une eau soit déclarée conforme aux normes ne signifie pas qu'elle est totalement dépourvue de polluants, mais plutôt que les concentrations de ces derniers sont suffisamment faibles pour ne pas compromettre la santé du consommateur (Alouane, 2012).

De manière générale, la qualité de l'eau potable est encadrée par une réglementation nationale, qui peut différer d'un pays ou d'une région à une autre, en comparaison avec les standards internationaux (Bouziani, 2000).

En Algérie, la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine est régie par des dispositions locales, telles que celles publiées dans le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA, 2011), qui énonce les paramètres physico-chimiques et microbiologiques, ainsi que les valeurs limitent autorisées pour chaque indicateur.

Tableau III.2 : Références normatives des paramètres physico-chimiques de l'eau selon la réglementation (JORA, 2011).

Paramètres	Unités	Valeurs indicatives
Alcalinité (TAC)	mg/l CaCO ₃	500
Dureté	°F	200
CE à 20°C	μS/cm	2800
Résidu sec	mg/l	1500
Ph	Unité	≥6,5 et ≤9
Température	°C	25
Turbidité	NTU	5
Calcium	mg/l	200
Magnésium	mg/l	150
Potassium	mg/l	12
Sodium	mg/l	200
Bicarbonate	mg/l	600
Chlorure	mg/l	500
Sulfate	mg/l	400
Nitrate	mg/l	50

III.3.1. Titre alcalimétrique simple (ou alcalinité simple) :

La formule utilisée est : $TA = [CO_3^{2-}] + [OH^-]$

- TA : Titre alcalimétrique simple, représentant l'alcalinité simple.
- $[CO_3^{2-}]$ (°F) : Concentration en ions carbonate.
- $[OH^-]$ (°F) : Concentration en ions hydroxyde.

Les résultats relatifs à l'alcalinité simple sont nuls en raison de l'absence d'analyses concernant les ions $[CO_3^{2-}]$ et $[OH^-]$. (Kadri et Mesroua, 2020).

III.3.2. Titre alcalimétrique complet (alcalinité totale) :

$$TAC = [CO_3^{2-}] + [OH^-] + [HCO_3^-]$$

TAC (°F) : Titre alcalimétrique complet exprimé en degrés français (°F).

$[CO_3^{2-}]$ (°F) : Concentration en ions carbonate.

$[OH^-]$ (°F) : Concentration en ions hydroxyde.

$[\text{HCO}_3^-]$ (°F) : Concentration en ions hydrogénocarbonate (bicarbonate).

Sachant que 1 °F correspond à 10 mg/L de CaCO_3 .

Dans ce cas, on considère que $\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-]$, les concentrations de $[\text{OH}^-]$ et $[\text{CO}_3^{2-}]$ n'étant pas disponibles. Les résultats des calculs des titres alcalimétriques (simple et complet) sont présentés dans les Tableaux III.

Tableau III.3 : Données calculées de l'alcalinité totale et partielle des eaux de forage (année 2024)

La région	N° de Forage	TA (°F)	TAC (°F)	La région	N° de Forage	TA(°F)	TAC(°F)
GEURARRA	F1	0	195.2	Ghardaïa	F1	0	183
	F2	0	207.4		F2	0	192.76
	F3	0	248.88		F3	0	212.28
	F4	0	292.8		F4	0	197.6
	F5	0	253.76		F5	0	207.4
	F6	0	231.8		F6	0	244
	F7	0	195.2		F7	0	290.36
	F8	0	183		F8	0	290.36
	F9	0	219.6		F9	0	168.36
	F10	0	224.48		F10	0	178.12
	F11	0	200.08		F11	0	178.12
	F12	0	217.16		F12	0	180.56
	F13	0	195.2		F13	0	183
	F14	0	209.8				

Les concentrations en alcalinité mesurées dans les eaux de forage de la région de Guerarra en 2024 s'étendent d'un minimum de 183 mg/l de CaCO_3 , observé au niveau du forage F8, à un maximum de 292,8 mg/l de CaCO_3 relevé au forage F4. Dans la région de Ghardaïa, les valeurs oscillent entre 168,36 mg/l de CaCO_3 , enregistrée au forage F9, et 290,36 mg/l de CaCO_3 , notée au forage F7. D'après la norme algérienne relative à l'eau potable, qui fixe le seuil maximal à 500 mg/l de CaCO_3 , l'ensemble de ces résultats sont jugés conformes

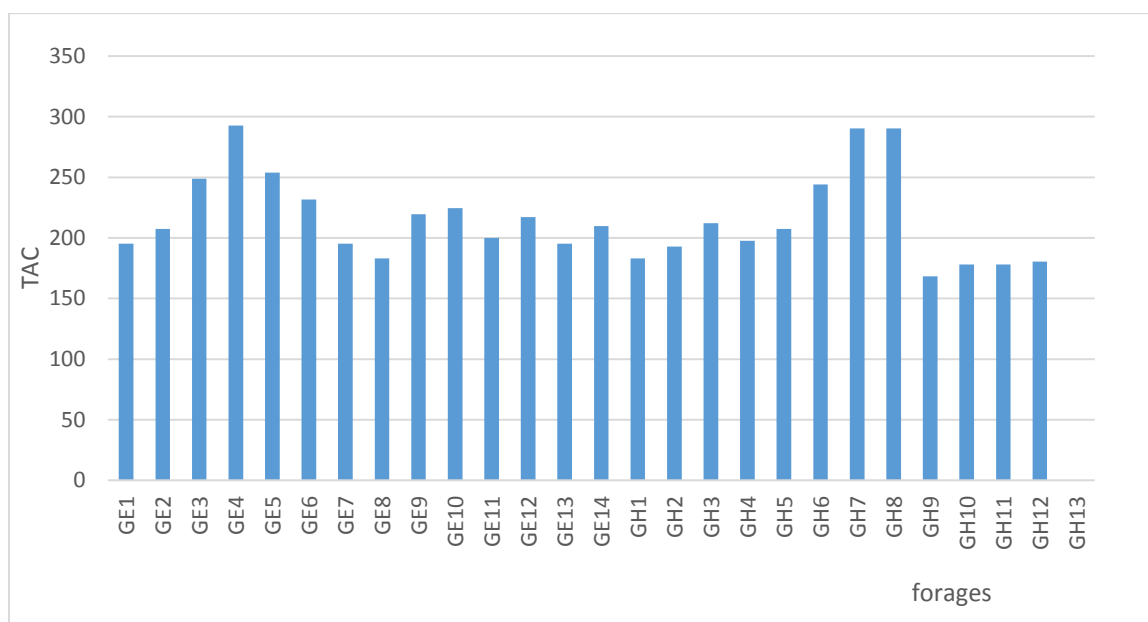


Figure III.2 : Évolution de l'alcalinité totale (TAC) en 2024

III.3.4. Température (T)

Dans la zone étudiée, les résultats indiquent que les températures enregistrées varient entre 15 °C et 29 °C, en raison de l'impact du changement climatique. Ces valeurs restent conformes à la norme algérienne en vigueur, qui fixe une limite maximale de 25 °C (JORA, 2011). à l'exception des forages situés à Guerrara F7,F8,F9(27.1),F10(28.9),F11(29.5),F12(29.2),F14(26) et de ceux localisés à Ghardaïa F2(25.9),F3(26),F4(25.7),F5(26.1),F7(29.1),F8(26.2).

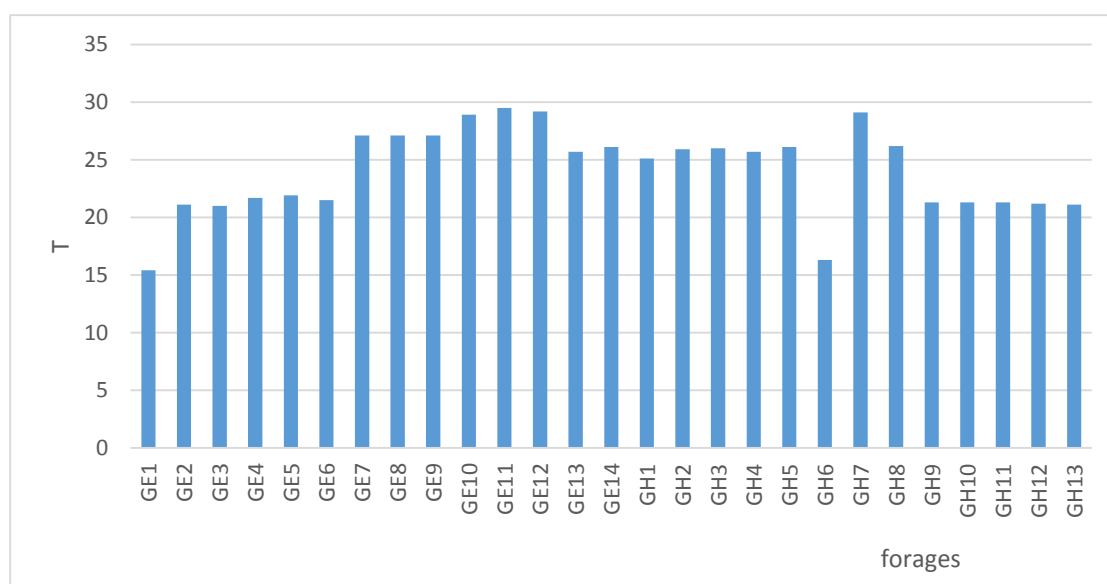


Figure III.3 : Évolution de la température des eaux des forages étudiés en 2024

III.3.5. Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH des eaux naturelles est influencé par leur origine ainsi que par la nature géologique des terrains qu'elles traversent (Saadali, 2007 ; Gouaidia, 2008). Ce paramètre joue un rôle essentiel dans la détermination du caractère corrosif ou entartrant de l'eau. Les réglementations algériennes et européennes fixent une valeur guide du pH entre 6,5 et 9

L'échelle du pH varie de 0 à 14 :

- $\text{pH} > 7$: L'eau est basique.
- $\text{pH} < 7$: L'eau est acide.
- $\text{pH} = 7$: L'eau est neutre.

Dans la zone étudiée, les valeurs du pH varient entre 7,2 et 7,5.

La valeur 7,2 a été enregistrée à El Guerrara dans les puits F1, F7, F8, F9, F10, F11, F12 et F14, ainsi qu'à Ghardaïa dans les puits F2, F4, F5, F9, F10, F11, F12 et F13.

Quant à la valeur 7,5, elle a été relevée dans six puits à El Guerrara (F2, F3, F4, F5, F6 et F13) et dans cinq puits à Ghardaïa (F1, F3, F6, F7 et F8).

Ces résultats traduisent une légère basicité de l'eau. Les valeurs observées s'inscrivent dans l'intervalle des normes de potabilité ($6,5 < \text{pH} < 9$), ce qui indique que l'ensemble des mesures est conforme à la réglementation algérienne

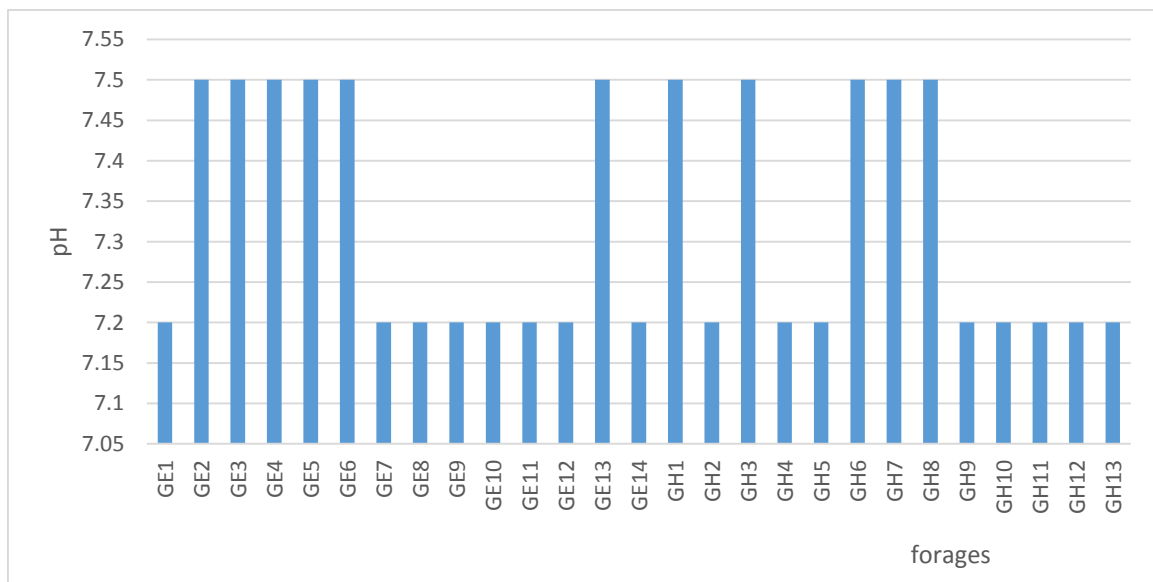


Figure III.4: Évolution du pH des eaux des forages analysés durant l'année 2024

III.3.6. Conductivité

Les résultats des mesures indiquent une variation de la conductivité électrique, qui oscille entre 2140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le forage F1 et 2589 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le forage F4 dans la région de Guerarra Tandis que dans la région de Ghardaïa, la turbidité de l'eau varie entre 1810 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le forage F6 et 2450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le forage F13. Toutes les valeurs respectent la norme algérienne de potabilité fixée à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

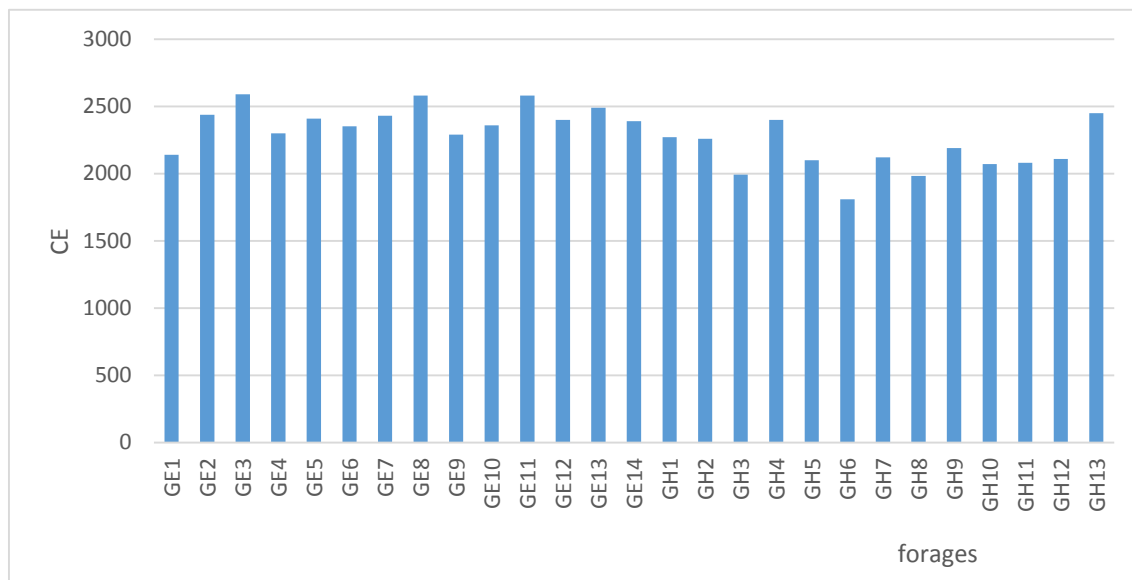


Figure III.5 : Évolution de la conductivité électrique des eaux des forages en 2024

III.3.7. Turbidité

Les valeurs de turbidité mesurées varient entre un minimum de 0,19 NTU Dans les régions de Guerrara et Ghardaïa et un maximum de 21 NTU à Ghardaïa. Globalement, les eaux des forages analysés respectent la norme algérienne relative à la turbidité. à l'exception des forages F7 (24.1 NTU) et F8 (20.1NTU) à Ghardaïa, qui dépassent cette limite

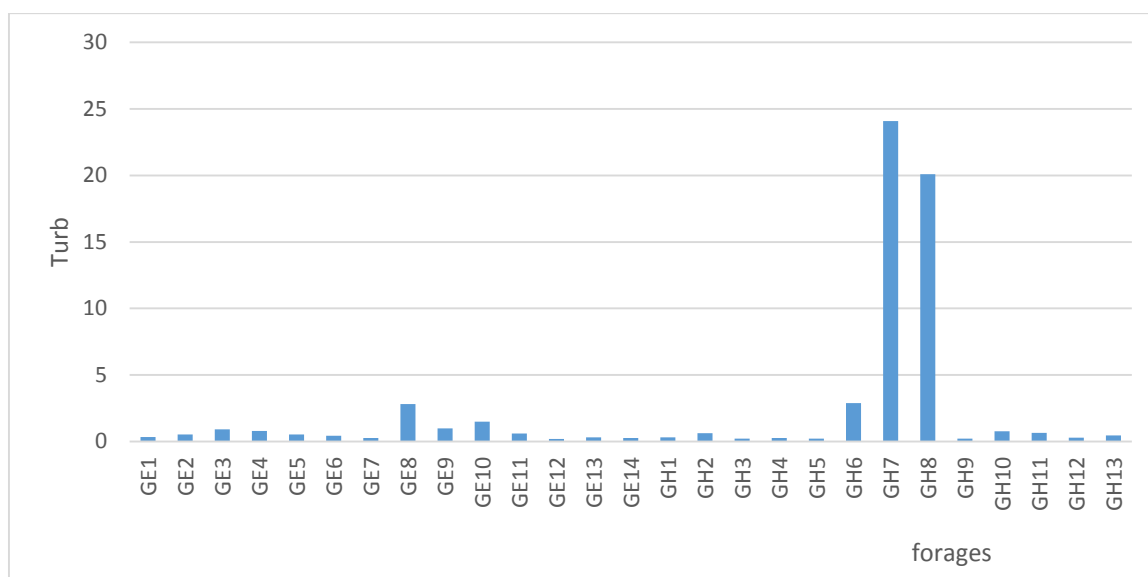


Figure III.6: Évolution de la turbidité des eaux des forages analysés en 2024

III.3.8. Dureté totale

La dureté des eaux des forages analysés dépasse la limite fixée par la norme algérienne (200 mg/l) (JORDA, 2011). Ces eaux présentent une dureté élevée à très élevée. Cette forte minéralisation s'explique par la nature géologique de l'aquifère ainsi que par le parcours des eaux, qui traversent d'abord la nappe superficielle puis atteignent la nappe profonde, entraînant ainsi une augmentation de la concentration en éléments minéraux dans cette dernière

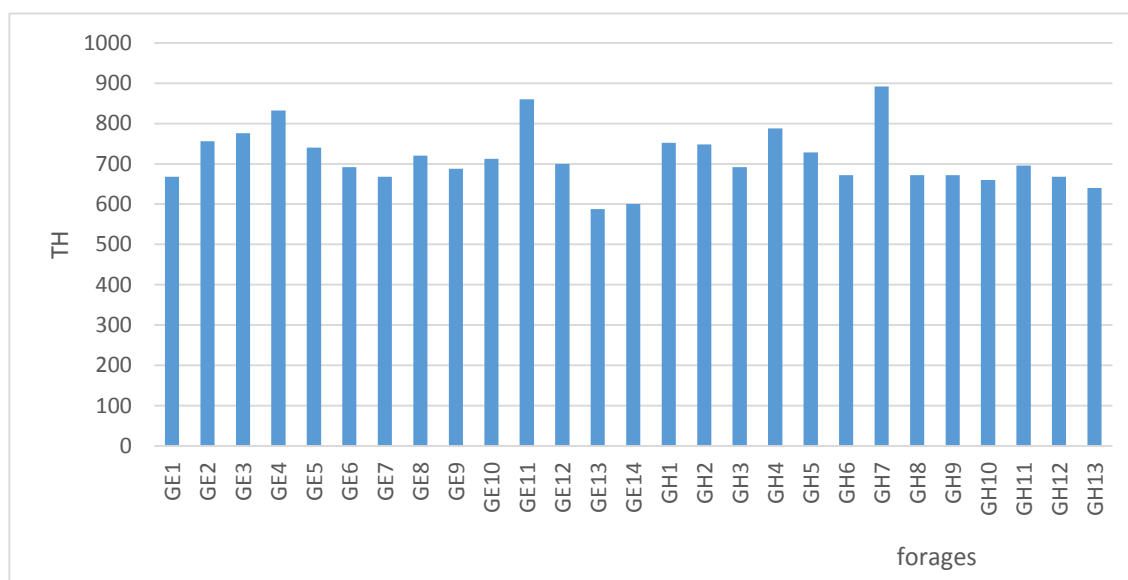


Figure III.7 : Évolution de la dureté des eaux des forages au cours de l'année 2024.

III.3.8. Calcium Ca^{2+}

Les concentrations en calcium dans les eaux des forages analysés varient entre une valeur minimale de 118,63 mg/l (pour les forages F13 et F14) dans la région de Guerrara, et 144,28 mg/l (F13) dans la région de Ghardaïa. Les concentrations maximales ont été relevées dans le forage F6, atteignant 216,432 mg/l à Guerrara et 245,289 mg/l à Ghardaïa. Selon la norme algérienne relative à la qualité des eaux potables, fixant la limite supérieure acceptable à 200 mg/l, la majorité des forages respectent cette limite. Toutefois, les forages F6 à Guerrara et Ghardaïa présentent des teneurs supérieures à cette norme, les rendant non conformes aux exigences réglementaires

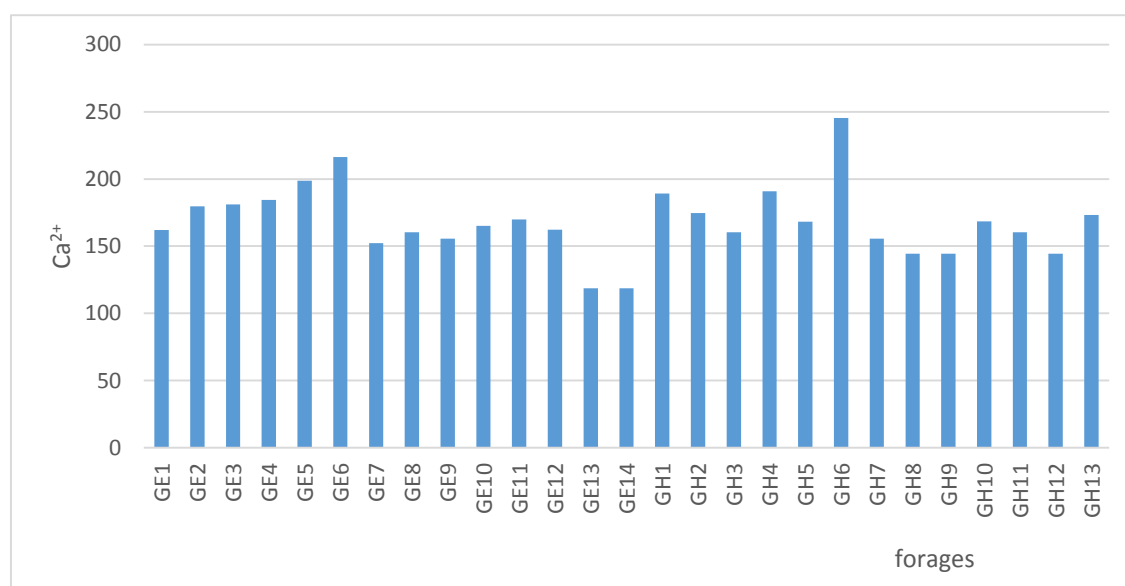


Figure III.8 : Évolution de la concentration en calcium dans les eaux des forages durant l'année 2024.

III.3.9. Magnésium (Mg^{2+})

Les concentrations en magnésium dans les eaux des forages étudiés varient entre 36,93 mg/l à El Guerrara (F6) et 14,58 mg/l à Ghardaïa (F6), ces deux valeurs représentant les concentrations minimales. Les valeurs maximales atteignent quant à elles 105,948 mg/l (F11) à El Guerrara et 122,47 mg/l (F7) à Ghardaïa. Ainsi, toutes ces concentrations restent conformes à la norme algérienne fixée à 150 mg/l.

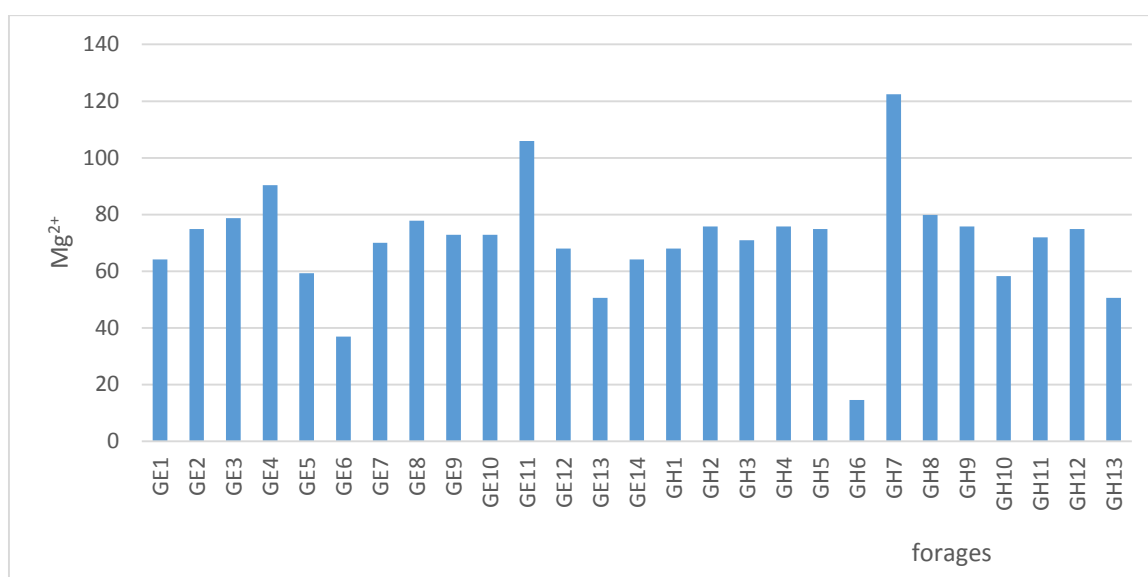


Figure III.9: Évolution de la concentration en magnésium dans les eaux des forages en 2024.

III.3.10. Sodium (Na⁺)

Les teneurs en sodium dans les eaux des forages étudiés varient entre une valeur minimale de 177,27 mg/l enregistrée au (F9) à Guerrara, et 58,88 mg/l observée aux (F7) et (F8) à Ghardaïa. Les concentrations maximales relevées à El Guerrara sont de 205 mg/l (F1), 212,5 mg/l (F8) et (F13), 243,75 mg/l (F11) et 218,75 mg/l (F12), tandis qu'à Ghardaïa, les valeurs les plus élevées atteignent 218,759 mg/l (F1), 231,25 mg/l (F2), 250 mg/l (F4), 220 mg/l (F12) et 325 mg/l (F13). Ainsi, les autres eaux des forages dans les régions d'El Guerrara et de Ghardaïa restent conformes à la norme algérienne, qui fixe la limite maximale de sodium à 200 mg/l.

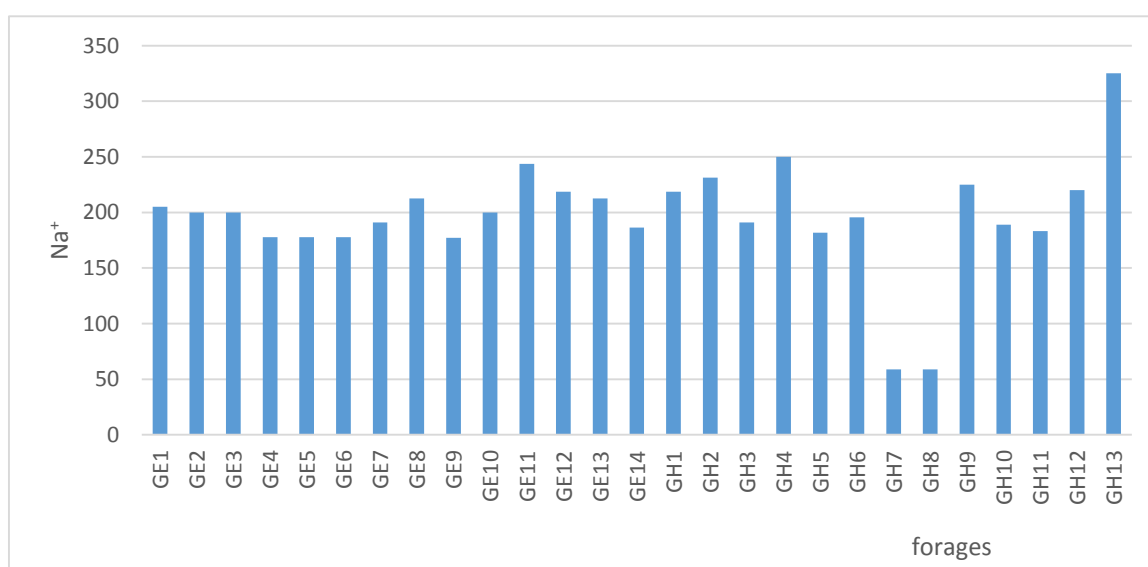


Figure III.10: Évolution de la concentration en sodium des eaux issues des forages en 2024.

III.3.11. Potassium (K^+)

Le potassium provient de la dégradation de certaines argiles ainsi que de la dissolution des engrais chimiques de type NPK, largement utilisés en agriculture. Sa présence peut également être liée aux rejets des eaux usées domestiques. En conditions naturelles, sa concentration ne dépasse généralement pas 10 à 15 mg/l. Le graphique ci-dessus présente les concentrations de potassium pour chaque échantillon d'eau analysé. Les résultats montrent que l'eau de 14 forage puits situés à Guerrara dépasse la valeur limite fixée par la norme 15 mg/l, ce qui indique des concentrations élevées en potassium. En revanche, 13 forage puits à Ghardaïa restent conformes aux normes en vigueur."

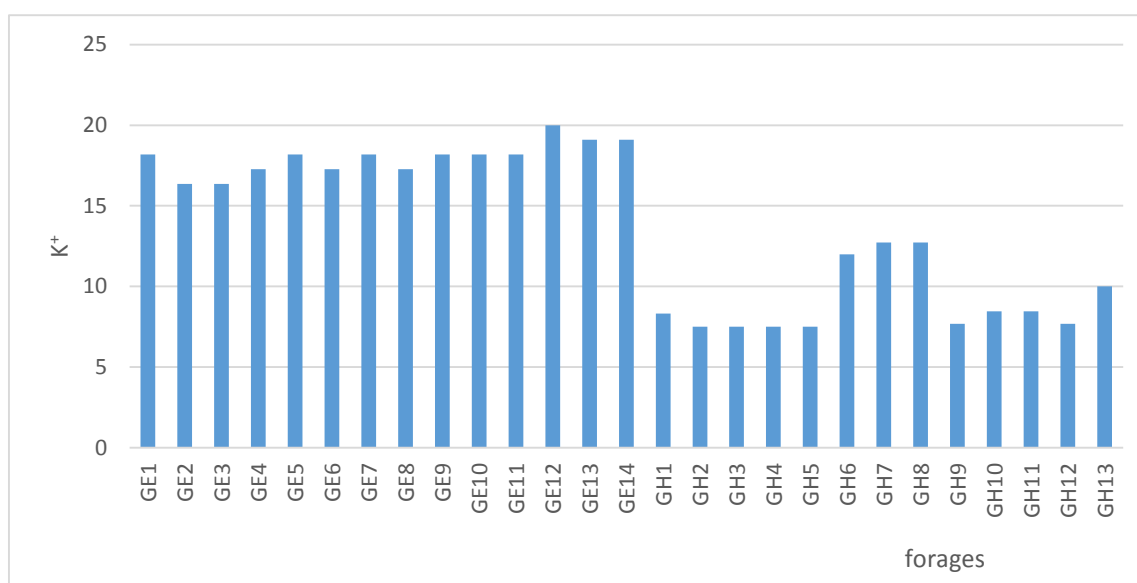


Figure III.11 : Évolution de la concentration en potassium dans les eaux des forages étudiés (année 2024).

III.3.12. Sulfate (SO_4^{2-})

La concentration en sulfates varie considérablement, principalement en raison des interactions entre l'eau et les dépôts minéraux dans l'aquifère de la nappe phréatique, notamment à cause de la solubilité du gypse ou de l'oxydation de minéraux sulfurés (Barrière, 2000). Selon la sensibilité des consommateurs, un excès de sulfates dans l'eau peut provoquer des troubles intestinaux (Peck, 1970).

Les résultats d'analyse des eaux souterraines dans la région d'El Guerrara révèlent que la concentration en sulfates varie entre 404,4 mg/l dans le forage F6 (valeur minimale) et 600,4 mg/l dans le forage F8 (valeur maximale). Toutes les valeurs dépassent la limite recommandée par la norme algérienne, fixée à 400 mg/l, ce qui reflète une dégradation notable de la qualité des eaux vis-à-vis de leur teneur en sulfates.

Répartition des concentrations observées :

F1(452,1 mg/l), F2(566,5 mg/l), F3(520 mg/l), F4(501,7 mg/l), F5(556 mg/l), F6(404,4 mg/l), F7(579 mg/l), F8(600,4 mg/l), F9(430 mg/l), F11(546,8 mg/l), F12(535,6 mg/l), F13 (566,9 mg/l).

F14 : 588,7 mg/l.

Dans la région de Ghardaïa, la valeur minimale a été relevée dans le forage F13 avec 242,5 mg/l. La valeur maximale a été enregistrée dans le forage F2, avec un taux de 665,1 mg/l. , tandis que sept forages présentent des concentrations supérieures à la norme recommandée :

F1(619,8 mg/l), F2 (665,1 mg/l), F3(466,8 mg/l), F4(438,2 mg/l), F5 (499,7 mg/l), F6(540 mg/l), F7(510 mg/l).

En revanche, six forages respectent la norme algérienne de 400 mg/l :

F8(395,3 mg/l), F9 (340,8 mg/l), F10(357,1 mg/l), F11 (385,4 mg/l), F12(329,9 mg/l) F13(242,5mg/l).

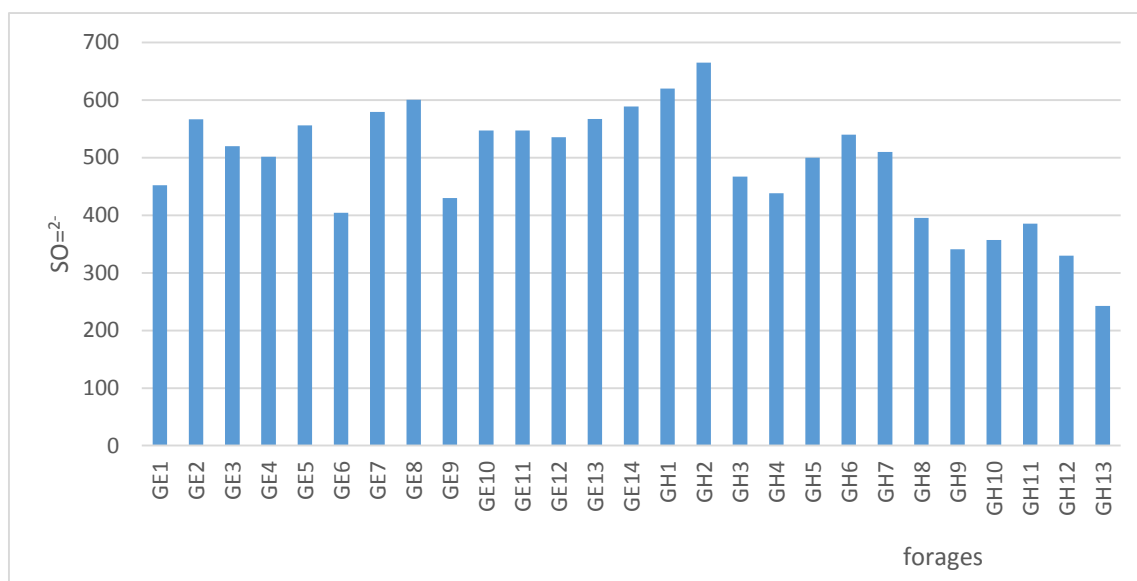


Figure III.12 : Évolution de la concentration en sulfates dans les eaux des forages étudiés (année 2024).

III.3.12. Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures sont constamment présents dans les eaux naturelles, avec des concentrations très variables. Leur présence est généralement liée à la nature géologique des formations traversées par

l'eau. Elle peut également résulter des rejets d'eaux usées ou de l'infiltration d'eaux marines dans les nappes phréatiques. Une teneur élevée en chlorures dans l'eau destinée à la consommation peut la rendre corrosive et présenter un risque pour la santé

Les concentrations en chlorures dans les eaux des puits étudiés dans la région de Guerarra varient entre une valeur minimale de 350,056 mg/L dans le puits F12 et une valeur maximale de 460,889 mg/L enregistrée dans le puits F8.

Dans la région de Ghardaïa, la concentration la plus basse a été relevée à 136,139 mg/L dans le puits F7, tandis que la concentration la plus élevée a atteint 475,070 mg/L dans le puits F13.

Toutes les eaux des puits étudiés dans les deux régions de Guerarra et Ghardaïa sont conformes aux normes algériennes de qualité des eaux potables, puisque les concentrations en chlorures ne dépassent pas la limite maximale autorisée de 500 mg/L.

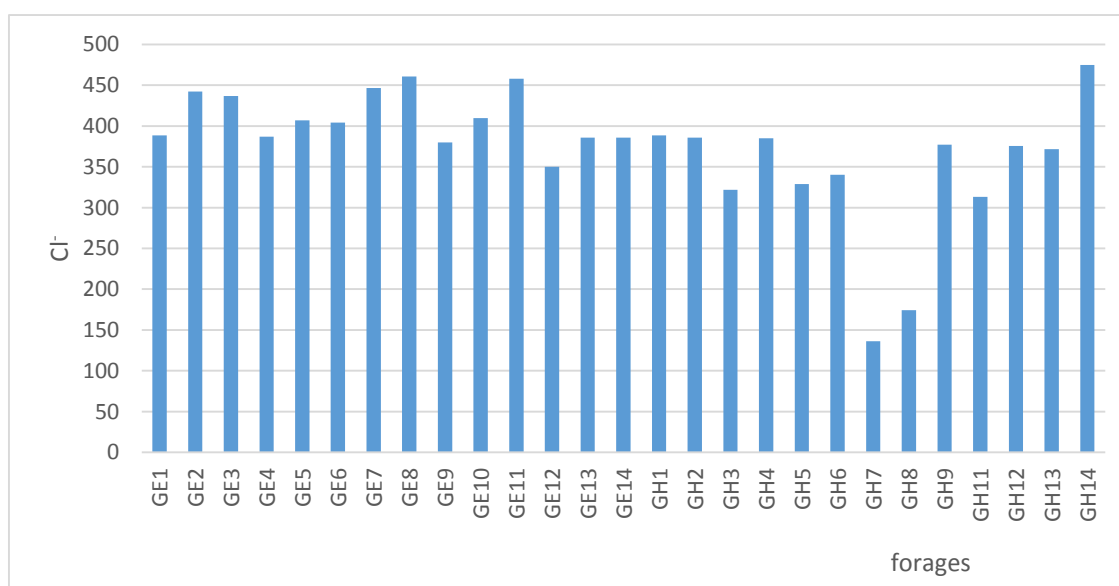


Tableau III.3 : Données calculées de l'alcalinité totale et partielle des eaux de forage (année 2024)

III.4. Discussion et comparaison de qualité des eaux entre Ghardaïa et Guerrara

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de puits dans les régions de Guerarra et de Ghardaïa révèlent une variabilité de la qualité de l'eau selon les indicateurs étudiés.

Concernant l'alcalinité totale (TAC), toutes les valeurs enregistrées se situent dans les limites acceptables selon les normes algériennes. Pour la température, la majorité des mesures sont modérées dans les deux régions, avec toutefois quelques valeurs élevées pouvant résulter de l'influence climatique ou de la profondeur des puits.

Les valeurs du pH enregistrées dans la zone étudiée indiquent que les eaux ont une nature faiblement basique. Puisque ces valeurs se situent dans les limites autorisées par la réglementation algérienne ($6,5 < \text{pH} < 9$), les eaux souterraines de cette région sont considérées comme potables du point de vue du pH, et ne représentent pas de risque en termes de corrosion ou d'entartrage.

En ce qui concerne la conductivité électrique (Conductivité), toutes les valeurs restent conformes aux normes autorisées, reflétant une salinité modérée. La turbidité, quant à elle, est inférieure à la limite recommandée dans la région de Guerarra, tandis qu'à Ghardaïa, un léger dépassement a été relevé uniquement dans deux échantillons, les autres restants dans la norme.

Pour la dureté totale (TH), toutes les valeurs mesurées dans les deux régions dépassent la limite maximale autorisée, indiquant une dureté très élevée qui pourrait affecter l'utilisation domestique de l'eau. La concentration en calcium présente des valeurs tant conformes que supérieures aux normes dans les deux régions, tandis que celles du magnésium (Mg^{2+}) restent généralement dans les limites acceptables.

Concernant le sodium (Na^+), les concentrations varient entre des niveaux faibles, ne dépassant pas 200 mg/L, et des niveaux élevés, ce qui reflète une diversité dans la source et la qualité des eaux. Le potassium (K^+) dépasse la valeur recommandée uniquement dans la région de Guerarra, tandis que les valeurs à restent en Ghardaïa dessous du seuil autorisé.

Pour les sulfates (SO_4^{2-}), des concentrations supérieures à la limite permise ont été relevées dans la région de Guerarra, alors que les échantillons d' Ghardaïa montrent une variabilité entre des valeurs conformes et d'autres dépassant la norme, témoignant d'une diversité géologique et hydrochimique des nappes phréatiques.

Enfin, la concentration en chlorures (Cl^-) dans tous les puits étudiés reste inférieure à la limite maximale autorisée (500 mg/L) dans les deux régions, indiquant l'absence d'une salinité excessive selon cet indicateur.

Les eaux de Guerarra présentent globalement une meilleure qualité, bien qu'elles montrent des problèmes spécifiques liés aux sulfates et au potassium. En revanche, les eaux de Ghardaïa requièrent une surveillance accrue en raison de dépassements constatés dans la turbidité, la dureté, ainsi que des variations significatives des concentrations en sulfates et en sodium. La dureté élevée demeure le

principal enjeu pour les deux régions, ce qui impose la mise en place de traitements adaptés ou des recommandations strictes quant à l'utilisation domestique.

III.5. Conclusion

Ce chapitre présente une analyse approfondie et rigoureuse des résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines des régions de Guerarra et Ghardaïa pour l'année 2024, et les résultats révèlent une certaine similarité dans plusieurs paramètres entre les deux zones, tout en mettant en évidence des différences notables sur d'autres indicateurs.

L'équilibre ionique évalué pour chaque échantillon d'eau montre que la majorité présente un équilibre satisfaisant et acceptable, à l'exception de sept puits situés à Ghardaïa qui présentent un déséquilibre ionique supérieur à 10 %, probablement dû à une erreur analytique ponctuelle.

Les résultats des mesures de pH révèlent que les eaux souterraines de la région étudiée sont légèrement basiques et respectent les normes algériennes de potabilité.

L'alcalinité totale, la conductivité électrique ainsi que les concentrations en magnésium et chlorures se situent dans les limites acceptables dans les deux régions, traduisant une salinité modérée sans présence de salinité excessive. Les températures et la turbidité affichent des valeurs généralement conformes aux normes, malgré un léger dépassement de la turbidité dans certains échantillons de Ghardaïa.

En revanche, la dureté totale constitue un point faible significatif, toutes les valeurs excédant les seuils réglementaires, rendant ainsi ces eaux inadaptées à une consommation domestique directe sans traitement préalable. Des variations importantes ont également été observées dans les concentrations de calcium, sodium, sulfates et potassium, avec des augmentations notables notamment à Guerarra pour les sulfates et le potassium, et à Ghardaïa pour le sodium et la turbidité.

Les concentrations en nitrates n'ont pas pu être déterminées faute de disponibilité du réactif adéquat au sein de l'Algérienne des Eaux.

Ainsi, les eaux des deux régions sont considérées comme partiellement potables, nécessitant un traitement spécifique visant à réduire la dureté et à corriger certains paramètres chimiques, tout en insistant sur le renforcement du suivi périodique pour garantir la sécurité sanitaire des utilisateurs.

Conclusion général

Conclusion général

La présente étude s'est intéressée aux eaux souterraines de la région de Ghardaïa, située au nord du Sahara algérien. Les conclusions suivantes ont été tirées :

Le climat prédominant dans cette région est de type désertique saharien, caractérisé par des hivers courts et frais ainsi que des étés longs et très chauds, avec des températures pouvant dépasser les 40°C durant la saison estivale.

La région de Ghardaïa et Guerarra fait partie intégrante du Système Aquifère du Sahara Nord (SASS), qui abrite les principales réserves d'eau souterraine. Ces réserves sont contenues dans deux types d'aquifères : un aquifère superficiel, localisé dans les calcaires sénoniens et turoniens ainsi que dans les alluvions argileuses des vallées environnantes, alimenté directement par les précipitations et les écoulements de surface.

Par ailleurs, l'aquifère Continental Intercalaire, plus profond et souvent confiné, constitue également une source majeure d'eau. Composé de sable, de grès et d'argile sablo-argileuse, cet aquifère est exploité à des profondeurs variant entre 80 et 1000 mètres selon les secteurs, via des puits utilisés pour divers usages.

À la suite des analyses réalisées sur les échantillons d'eaux souterraines prélevés dans la région de Ghardaïa et Guerarra, les observations suivantes ont été relevées :

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines dans les régions de Guerarra et de Ghardaïa révèle que l'alcalinité totale, la conductivité électrique ainsi que le pH respectent les normes algériennes, ce qui traduit une salinité modérée et une eau considérée comme potable du point de vue de l'acidité. La température est majoritairement modérée, bien que quelques valeurs élevées aient été relevées, probablement en lien avec des facteurs climatiques ou la profondeur des puits. En ce qui concerne la turbidité, elle demeure inférieure au seuil recommandé à Guerarra, tandis que deux échantillons à Ghardaïa présentent de légers dépassements. La dureté totale, quant à elle, excède systématiquement les limites admises dans les deux régions, ce qui peut compromettre l'usage domestique de l'eau. Les concentrations en calcium et en magnésium varient entre des niveaux conformes et d'autres supérieurs aux seuils réglementaires. Le sodium affiche une variabilité significative, reflétant une diversité dans les sources d'alimentation en eau. Des dépassements de la teneur en potassium sont enregistrés uniquement à Guerarra, tandis que les concentrations en sulfates y excèdent également les normes, avec une variabilité observée à Ghardaïa. Enfin, les teneurs en chlorures restent inférieures à la limite maximale autorisée dans l'ensemble des échantillons, traduisant une absence de salinité excessive.

En conclusion, il ressort que la qualité des eaux souterraines dans la région de Guerarra est supérieure à celle observée dans la région de Ghardaïa, ce qui nécessite la mise en œuvre de traitements appropriés ou l'adoption de recommandations strictes concernant l'utilisation domestique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Hasnia, B. (2018). Chimie des eaux. Polycopie. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- Adda, M. (2013). Caractérisation hydrochimique et pollution des eaux souterraines en contexte urbain: cas de l'agglomération oranaise (ALGERIE). Université d'Oran, Algérie, 143p.
- Touhari, F. (2015). Etude de la qualité des eaux de la vallée du Haut Cheliff (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure d'hydraulique-Arbaoui Abdellah Blida).
- Selmane, T. (2023). Qualité des eaux souterraines et origine des nitrates dans la région El Maadher de Boussaâda. Thèse de doctorat. Université de M'sila.
- Monod, T. (1992)- Du désert. Sécheresse, 3(1). pp. 7-24.
- Biad, R. (2022). Écologie du peuplement avien dans la Vallée du Mزاب (Ghardaïa, Sahara algérien) Thèse de Doctorat. Écologie. Guelma. Algérie.
- White, F. (1986) La Végétation de L'Afrique (The Vegetation of Africa)- Ed IRD, Paris, 384p.
- Sebti, K. (2015) Comparaison entre la qualité des eaux de la nappe phréatique et la nappe albienne de la ville de Zelfana (wilaya de Ghardaïa). Université de Ghardaïa.
- ANRH, (2010). Note de synthèse sur les premières mesures piézométriques en utilisant les nouveaux piézomètres captant la nappe du Continental Intercalaire dans la wilaya de Ghardaïa, Rapport de l'Agence nationale ressource hydrique, Ouargla, p 10.
- Fifati, A. (2012). Typologie et caractérisation de la qualité des aquifères d'une zone aride - Cas de la région de Guerrara (Ghardaïa), Université de Tébessa, Algérie.
- MONOGRAPHIE MAI (2024). De la wilaya :Ghardaïa.
- MESSATEFA, I. (2024). Origine chimique, classification et prédiction de qualité des eaux souterraines à l'aide de CCME-WQI, PIG et Krigeage: cas de la région de Ghardaïa. Université de Ghardaïa.
- DUBIEF, J. (1953) - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie ; Service des Etudes Scientifiques; Alger, Algérie. 451p.
- DSA, 2017.– Bulletin d'information. direction. service .agricole .Ghardaïa, 3p.
- D.S.A, 2018.-L'Annuaire Statistique de la Wilaya de Ghardaïa.214 p.

Mihoub, R., Chabour, N. (2000) "Essais d'interprétation des anomalies hydrogéothermales de la région de Ghardaia, Algérie," université des frères Mentouri Constantine 1.

OULAD NAOUI, M et ROUABAH, M (2020). Contribution à l'étude de la diversité des Mantes dans quelques milieux sahariens(milieu cultivé et naturel) de la région de Ghardaïa (cas de Guerrara), Université de Ghardaïa.

Mederegnarou, I. (2024). Etude et suivi de la qualité physico-chimique de l'eau potable dans la région de Guelma, Université 8 Mai 1945 Guelma.

SEDDI,2024. Etude de qualité des eaux souterraines de la région de Ghardaïa, Université de Ghardaïa

MOULAY OMAR,H et BENHAMADI,R. (2020). CONTRIBUTION DE LA GEOMATIQUE A L'ETABLISSEMENT DES CARTES DES INDICESDE LA QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE ALBIENNE DANS LA REGION DE GHARDAIA, Université de Ghardaïa.

MOULIAS, (1927). L'organisation hydraulique des oasis saharienne. Edition Jules carbonel , Ancienne maison Bastide-Jourdan.305p.

Kuhnelt, W. (1969) Écologie générale. Ed. Masson et Cie, Paris, 359 p. 212.

Faurie, C., Ferra, C. Medori, P.(1984). Ecologie. Ed. Baillière J. B., Paris, 168 p

Mihoub, A (2017), ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS CALCAIRES SAHARIENS CULTIVÉS EN BLÉ :CAS DE OUED RIGH. Université Kasdi Merbah Ouargla.

DREUX P.H., 1980. – Précis d'écologie. Ed. Presses. univ. France, Paris, 231p.

RAMADE F., 2003 - Eléments d'écologie-écologie fondamental. Ed. Dunod. Paris,690 p.

FAURIE C., FERRA C., MEDORI P., DEVAUX J., HEMPTINNE J. L, 2003.-Ecologie approche scientifique et pratique. Ed. Lavoisier, Paris, 407 p.

région de Guerrara (W. Ghardaïa). Mémoire Mag. Agro., Uni. El-Harrach -Alger, 136p.

M. KEBILI , M. BOUZIANE Mohamed,(2018). Etude et suivi des forages hydrauliques dans la région de Ghardaïa. UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA.

Mutin, G. (1977). La Mitidja, décolonisation et espace géographique. Ed Office Publ. Université .,Alger, 606 p.

ACHOUR, 2014. Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride: Cas de lavallée du m'zab (ghardaia – algérie). université d'oran.126p.

HASSANI I, NOUI H , (2022). CARACTERISATION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE BOUMERDES. UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA.

KADRI S, MESROUA N, (2020). CARACTERISATION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE BOUIRA. UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA

Web scientifiques :

https://sciencecollege.uoanbar.edu.iq/News_Details.php?ID=828). (3/05/2025 ,05:04)