

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT

SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE GHARDAIA FACULTE DES
SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE



N° d'ordre
N° de série:

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine: Science et Technologie

Filière: Hydraulique

Spécialité : hydraulique urbaine

Par: **MESSATEFA Imane**

Thème

**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**

Soutenu publiquement le:

Membre de Jury:

Mr. Chebihi Iakhdar	MCA	Univ Ghardaïa	Président
Mr. Boubelli salim	MAB	Univ Ghardaïa	Examineur
Mr. Tahar SELMANE	MCB	Univ Ghardaïa	Encadrant
Mr. Senna LECHEHEB	MAB	Univ Ghardaïa	Co-Encadrant

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté d'accomplir cet humble travail.

J'exprime ma plus grande gratitude à mes parents qui ont su transmettre sans jugement les valeurs éducatives et familiales qui font de moi ce que je suis devenu aujourd'hui.

tout d'abord, Mes sincères salutations à notre superviseur, le Dr Selmane Tahar, et co-superviseur, le Dr Lecheheb Senna pour l'honneur qu'il nous a fait en me supervisant. Pour son accueil, son intérêt, sa gentillesse et son assistance tout au long des travaux.

A travers cet humble travail, je tiens à remercier vivement tous les professeurs qui ont contribué directement ou indirectement à notre formation.



Dédicace



Avec une profonde gratitude et des paroles sincères, je dédie ce dernier et humble travail à mes chers parents; Qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite et nous ont ouvert la voie grâce à leurs conseils avisés.

J'espère qu'un jour je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi. Je demande à Dieu leur bonheur et leur longue vie. Je dédie également ce travail à mes frères, sœurs, famille, tantes, grand-mère, amis qui m'ont enseigné et à tous ceux qui me sont chers.

Résumé

La région de Ghardaïa est une région sèche située au sud de l'Algérie, au cœur du désert. Elle se caractérise par une abondance d'eaux souterraines et est la plus exploitée. Dans le but d'évaluer la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation humaine dans la région de Ghardaïa. Nous avons prélevé des échantillons de 12 forages d'eau dans différents endroits de la région de Ghardaïa pour l'année 2023. Pour cette étude, nous avons effectué des analyses physico-chimiques de ces échantillons au laboratoire de l'ADE. Le pH est conforme aux normes d'OMS, tandis que TDS et CE apparaissent en forte concentration dans l'eau. Les résultats des analyses chimiques ont montré qu'il existe des concentrations élevées, dont le SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Cl^- , qui dépassaient les normes de l'OMS, tandis que la concentration de Mg^{2+} et K^+ ne dépassait pas les normes de l'OMS. Les diagrammes de Piper, Chadha et Gibbs ont été utilisés pour analyser la chimie hydrochimique de l'eau dans cette étude. Les résultats ont montré que cette eau est jeune et affectée par les processus de précipitation et dissolution des minéraux. En général, cette eau appartient au faciès chlorure-sulfate-calcium-calcium, et pour évaluer la qualité de l'eau nous avons utilisé des indices de classification de la qualité de l'eau CCME-WQI et PIG. Nous constatons que la qualité de l'eau à Ghardaïa appartient à deux classes : acceptable (faiblement pollué) à l'ouest de la région et moyen (pollution moyenne) à l'est de la zone. Les interpolations spatiales des paramètres chimiques ont prouvé que la qualité de cette eau est affectée par la géologie de la zone et le contact de l'eau avec les roches environnantes.

Mots clés :eaux souterraines,Ghardaia,analyses physico-chimiques, indice de qualité de l'eau CCME-WQI ,indice de pollution de l'eau PIG

Abstract

Ghardaïa is a dry region located in the south of Algeria, in the heart of the sahara. It is characterized by an abundance of groundwater and is the most exploited. With the aim of assessing the groundwater quality intended for human consumption in the Ghardaïa region. We took samples from 12 water wells in different locations in the Ghardaïa region for the year 2023. For this study, we carried out physicochemical analyzes of these samples at the ADE laboratory. The pH complies with WHO standards, while TDS and CE appear in high concentrations in the water. The chemical analysis results showed that there are high concentrations, including SO_4^{2-} , Ca^{2+} and Cl^- , which exceeded the WHO standards, while the concentration of Mg^{2+} and K^+ did not exceed the WHO standards. WHO. Piper, Chadha and Gibbs diagrams were used to analyze the hydrochemical chemistry of water in this study. The results showed that this water is young and affected by the processes of precipitation and dissolution of minerals. In general, this water belongs to the chloride-sulfate-calcium-calcium facies,

and to assess the water quality we used CCME-WQI and PIG water quality classification indices. We note that the water quality in Ghardaïa belongs to two classes: acceptable (lowly polluted) in the west

of the region and average (medium pollution) in the east of the area. Spatial interpolations of chemical parameters have proven that the quality of this water is affected by the geology of the area and the contact of the water with the surrounding rocks.

Keywords : groundwater, Ghardaia, physical and chemical analyses, CCME-WQI water quality index, PIG water pollution index

ملخص:

منطقة غرداية هي منطقة جافة تقع في جنوب الجزائر، في قلب الصحراء، وتتميز بوفرة المياه الجوفية وهي الأكثر استخداما. لهدف تقييم وتحديد نوعية المياه الجوفية المخصصة للاستهلاك البشري بمنطقة غرداية. قمنا بأخذ عينات من 12 بئر مياه في مواقع مختلفة في منطقة غرداية لعام 2023. ولهذه الدراسة أجرينا التحاليل الفيزيائية والكيميائية لهذه العينات في مختبر الوحدة الجزائرية للمياه ADE ظهرت لنا في النتائج ان الخصائص الفيزيائية ان PH تتوافق مع معايير منظمة الصحة بينما المواد الذائبة تظهر بتركيز مرتفع في المياه حيث لا تتوافق مع معايير منظمة الصحة، ظهرت في نتائج التحاليل الكيميائية ان هناك خصائص تتميز بتركيز مرتفع منها Ca^{2+} , So^{2-} , Cl^- , حيث تجاوزت معايير منظمة الصحة بينما تركيز Mg^{2+} و K^+ لا تتجاوز معايير منظمة الصحة. وتم استخدام مخططات Chadha و Piper و Gibbs، لتحليل كميات المياه الهيدروكيميائية في هذه الدراسة، ظهرت نتائج ان هذه المياه شابة تتأثر بعمليات تحلل وترسب المعادن. عموما تنتمي هذه المياه الى سحنات كلوريد-كبريتات-الكالسيوم-الكالسيوم، ولتقييم جودة المياه استخدمنا مؤشرات تصنيف جودة المياه CCME-WQI و PIG، نلاحظ ان نوعية المياه في غرداية تنتمي الى صنفين صنف جيد ومقبول (ضعيف التلوث) غرب المنطقة وصنف متوسط (متوسط التلوث) شرق المنطقة. الاستفتاءات المكانية للعناصر الكيميائية أثبتت ان جودة هذه المياه تتأثر جيولوجيا المنطقة وتلامس المياه مع الصخور المحيطة

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، غرداية، التحاليل الفيزيائية والكيميائية، مؤشر جودة المياه CCME-WQI، مؤشر تلوث المياه PIG

Table des matières

<i>Remerciements</i>	II
<i>Dédicace</i>	II
ملخص	Error! Bookmark not defined.
Résumé.....	Error! Bookmark not defined.
Abstract	Error! Bookmark not defined.
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des Abréviations	VIII
Introduction générale	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation de la région d'étude	
I.1. Introduction	Error! Bookmark not defined.
I.2. Situation géographique de la région de Ghardaïa	Error! Bookmark not defined.
I.3. Facteurs abiotiques des régions d'étude	3
I.3.1. Relief.....	3
I.3.2. Sol de région de Ghardaïa.....	4
I.3.3. Facteurs climatiques des régions d'étude.....	4
I.3.3.1. Température	4
I.3.3.2. Vents	5
I.3.3.3. Humidité.....	6
I.3.3.4. Pluviométrie	6
I.3.4. Synthèse climatique.....	7
I.3.4.1. Diagramme ombrothermique BAGNOULS et GAUSSEN	7
I.3.4.2. Climagramme pluviothermique d'EMBERGER.....	8
I.5. Etude géologie et hydrogéologique de la zone d'étude	90
I.5.1. Cadre géologique.....	91
I.5.2. stratigraphie.....	9
I.5.2. Cadre hydrogéologique	11
I.5.2.1. Aquifère du SASS.....	11
I.5.2.2 Continental Intercalaire.....	12
I.5.2.3 Complexe terminal.....	13
I.5.2.4. Aquifère albien dans la région de Ghardaïa	14
I.6. Conclusion	15
Chapitre II : méthodes et outils utilisé au l'étude	
II.1. Introduction.....	18
II.2. Les analyses physico-chimiques	18
II.3. Matériels et méthodes d'analyse	18
II.3.1. Choixdespointsdeprélèvement	18
II.4. Analysephysico-chimiques	20
II.5. Balance ionique	21
II.6. Faciès Hydro chimique	22
II.7. Processus Hydro chimiques	22
II.7.2. Diagramme Chaddha	22
II.7.3. Diagramme de Gibbs.....	23

II.8.2. Types de krigeage	25
II.8.2.1. Krigeage ordinaire	25
II.8.2.2. Krigeage simple	25
II.8.2.3. Krigeage universel	25
II.9. Interpolation non-géostatistiques par (IDW)	26
II.10. Indices d'évaluation de qualité d'eau	27
II.10.1. Indices d'évaluation de qualité d'eau PIG.....	27
II.10.2. Indice canadien de la qualité de l'eau (CCME-WQI).....	28
II.10.2.1. Description générale de l'indice	29
II.11. Conclusion	30
Chapitre III : Géochimie et processus contrôlant la chimie des eaux souterraines	
III.1. Introduction	30
III.2. Balance ionique des échantillons.....	30
III.3. La qualité organoleptique des eaux	30
III.4. Analyses statistiques des données de qualité.....	31
III.5. Les faciès hydro chimiques des eaux souterraines	32
III.5.1. Diagramme de Piper	32
III.5.2 Diagramme de Gibbs	33
III.5.3 Diagramme de Chadha	34
III.6. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques.....	35
III.7. Processus hydro chimiques et origine de minéralisation	36
III.8. Concluions.....	39
Chapitre IV : Prédiction et classification de qualité des eaux souterraines	
IV.1. Introduction	40
IV.2. Interpolation spatiale des paramètres par le krigeage ordinaire	40
IV.3. Indices d'évaluation de qualité d'eau	44
IV.3.1. Indice canadien de la qualité d'eau (CCME-WQI)	44
IV.3.2. Indices d'évaluation de qualité d'eau PIG.....	45
V.4. présentation géographique de la qualité globale des échantillons étudiée	46
V.4. Conclusion	46
Conclusion général	
Conclusion général	47
Références bibliographiques	
Références bibliographiques.....	48

Liste des figures

Figure I .1 Position géographique de la wilaya de Ghardaïa 2	3
Figure I.2 Température moyenne mensuelle de la région de Ghardaïa Bousaada, période de 2014-2023	5
Figure I.3. Vitesse du vent moyenne mensuelle dans la région de Ghardaïa, période de 2014-2023.....	6
Figure I4. Précipitation moyenne mensuelle de la région de Ghardaïa, période de 2014-2023.....	7
Figure I.5. Diagramme ombrothermique de la région de Ghardaïa	8
Figure I.6. Étage bioclimatique de la région Ghardaïa et selon le climagramme D'EMBERGER.....	9
Figure I.7. Carte géologique de la région de Ghardaïa	12
Figure II.8. Limites du domaine SASS (Achour, 2014).	16
Figure II.9. Exemple de diagramme de Piper	21
Figure II.10. Exemple de diagramme de chadha	22
Figure II.11. Exemple de diagramme de Gibbs	23
Figure II.12. Exemple de courbe de krigeage universel.....	25
Figure II.13. Exemple de propriété de la méthode (IDW).	25
Figure III.14. Diagramme de Piper illustre la classification des eaux souterraines	33
Figure III.15. Diagramme de Chadha illustre la classification des eaux souterraines.....	35
Figure III.16 Graphes bivariés : CE vs (Ca ²⁺ / Mg ²⁺) et (SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻).: CE vs (Cl ⁻ /Na ⁺) vs. (sous Na ⁺ réactions d'échange avec Ca ²⁺ / Mg ²⁺ dans le nombre de forage). : (Ca ²⁺ Mg ²⁺) vs so ₄ ²⁻	38
Figure III.17. Graphes bivariés de (Ca ²⁺ Mg ²⁺) / Cl ⁻) CE contre (SO ₄ ²⁻ + Cl ⁻) et (SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻)	39
Figure IV 1. Cartes d'interpolation spatiale des principaux paramètres physico-chimique par méthode de krigeage ordinaire	44
Figure IV. 2. L'indice canadien des eaux (CCME-WQI).....	45
Figure IV. 3. L'indice de pollution représentant le niveau de contamination des eaux souterraines.....	46
Figure IV 4. Carte de distribution spatiale des indices de qualité de l'eau (PIG, CCME-WQI) à l'aide de la méthode IDW.....	47

Liste des tableaux

Tableau I.1. Températures mensuelles de la région Ghardaïa (R2), période de 2014 à 2023.....	5
Tableau I.2. Vents mensuelles de la région Ghardaïa (R2), période de 2014 à 2023	6
Tableau I.3. Précipitations mensuelles enregistrées dans de la région Ghardaïa, période de 2014 à 2023.	7
Tableau II.3. Les points de prélèvement et les coordonnées des forages	19
Tableau III.1. Les valeurs de balance ionique des échantillons de l'année 2023.....	30
Tableau III .3. Données statistiques des paramètres physico-chimiques 2023.....	31

Liste des Abréviations

OMS : Organisation mondiale de la santé.

NA : Normes algériennes.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

ADE : l'Algérienne Des Eaux.

DRE : Direction des Ressources en Eau.

DSA : Direction des Services Agricole.

AEP : L'alimentation en eau potable.

C.I : Nappe du continental intercalaire.

C.T : Nappe du complexe terminal.

SASS : Système Aquifère du Sahara septentrional.

SIG : Systèmes d'Informations Géographiques.

NTU : Néphélométrie turbidité unités.

BI : Balance ionique.

wqi : Indice de la Qualité de l'Eau

PH : Potentiel d'hydrogène.

TH : Titre hydrométrique.

TAC : Titre Alcalimétrique complet.

TDS : Sels Totaux Dissous.

EDTA : Acide éthylène diamine tétra acétique.

PE : Polyéthylène.

BEA : Bile esculine azoture.

TSA : Tryptonée au soja.

Introduction générale

Introduction générale

L'eau représente un pourcentage très important dans la formation de tous les organismes vivants, car elle est considérée comme l'une des ressources naturelles les plus importantes dans toutes les régions du monde, en particulier les eaux souterraines traditionnelles, qui sont considérées comme l'une des eaux potables les plus fines. Les défis résultant du changement climatique et des activités humaines, qui provoquent un déclin quantitatif et qualitatif, sont extrêmement importants dans les zones désertiques arides, où les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau de la région de Ghardaïa, compte tenu des changements climatiques et humains. Face aux défis auxquels sont confrontées les eaux souterraines, il est nécessaire de mener une étude pour suivre la qualité et la nature des eaux souterraines et révéler l'étendue de leur exposition à la pollution.

Le but de cette étude est de prédire le type et la qualité des eaux souterraines. Pour cette étude, nous avons prélevé 12 échantillons provenant de différents endroits de la région de Ghardaïa en 2023 au laboratoire de l'Unité Algérienne des Eaux (ADE) ,Objectifs, méthodes et moyens : Etudier les caractéristiques générales de la zone d'étude ,Analyser et interpréter les propriétés physiques et chimiques des échantillons existants et les comparer aux normes de l'OMS ,Étude des types et processus hydro chimiques qui contrôlent la chimie des eaux souterraines ,Évaluer et déterminer le type et la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation ,Prédiction spatiale de la qualité des eaux souterraines

Pour cette étude :

Chapitre I : Présentation de la région d'étude

Chapitre II : méthodes et outils utilisé au l'étude

Chapitre III : Géochimie et processus contrôlant la chimie des eaux souterraines

Chapitre IV : Prédiction et classification de qualité des eaux souterraines.

Chapitre I : Présentation de la région d'étude

I.1. Introduction:

La région de Ghardaïa en Algérie occupe une position stratégique en raison de sa situation géographique au nord du Sahara algérien.

Cette région se distingue par sa diversité topographique et géologique. Elle comprend une gamme variée de caractéristiques géographiques et géologiques qui influencent la vie de ses habitants et son économie, créant à la fois des défis et des opportunités dans le contexte de l'investissement et du développement durable.

Ainsi, il est nécessaire pour nous de connaître les caractéristiques suivantes :

I.2. Présentation du site:

I.2.1. Situation géographique :(NIREF ,2009 -2010)

La Wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie nord de Sahara. À environ 600 Km de la capitale Alger. Ses coordonnées géographiques sont:

- Altitude 486 m au – dessus du niveau de la mer.
- Latitude $31^{\circ}33'$ à $33^{\circ}04'$ nord
- Longitude $2^{\circ}14'$ et $5^{\circ}00'$ Est.

La wilaya de Ghardaïa couvre une superficie de 19729 km^2 (BENYOUCEF 1991),

La wilaya de Ghardaïa est limitée: (WIKI ,GHARDAIA)

- Au Nord par la Wilaya de Laghouat (200 Km).
- Au Nord Est par la Wilaya de Djelfa (300 Km).
- Au Est par la Wilaya d'Ouargla (200 Km).
- Au Sud par la Wilaya d'El Meniaa (270 Km).
- Au Ouest par la Wilaya d 'El-Bayad (350 Km)

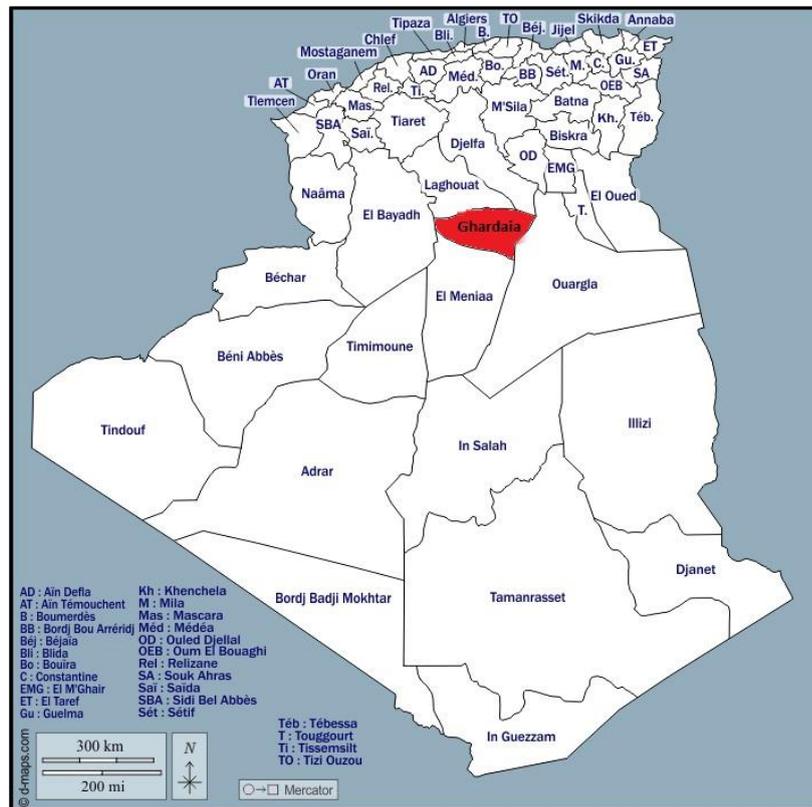


Figure I.2. Position géographique de la wilaya de Ghardaïa.

I.3. Facteurs abiotiques des régions d'étude

Les facteurs abiotiques qui sont développés dans cette partie sont le relief, le sol et les facteurs climatiques.

I.3.1. Relief

L'état de Ghardaïa se caractérise par une nature désertique car il fait partie du désert du Sahara et le terrain de l'État est relativement calme. La hauteur de la limite orientale ne dépasse pas 200 mètres. Dans le quart nord-ouest, les altitudes varient entre 200 et 600 mètres. La hauteur moyenne de l'État est de 468 mètres. Il contient également quelques dépressions, représentées par des hamadas, des chutes et des plateaux rocheux intermittents constitués de couches d'agrégats entrecoupées de vallées profondes, suivies et entrelacées. L'exemple le plus frappant en est le Wadi Mzab. Plaine, qui est située au-dessus d'une couche rocheuse intermittente constituée de couches calcaires, c'est pourquoi on l'appelle le pays du réseau. Parmi les plus importantes de ces vallées figurent l'oued M'zab, l'oued Nissa, l'oued Qadir, l'oued Balouh. Matlili, Wadi El Abyad, Wadi Aredlan et Wadi Antesa .

I.3.2. Sol de région de Ghardaïa

Les sols de La région de Ghardaïa sont squelettiques, dont généralement sont marqués par la présence en surface d'un abondant argileux de type « Hamada ». Dans les dépressions, les sols sont plus riches grâce à l'accumulation des dépôts alluviaux (Djebrit,2022).

I.3.3. Facteurs climatiques des régions d'étude

Le Sahara est caractérisé par une faiblesse et une irrégularité de précipitation, et des amplitudes thermiques entre le jour et la nuit et entre les mois. L'humidité relative de l'air est très basse, très inférieure à 10% en milieu découvert, la sécheresse du climat se traduit par une rareté extrême de la végétation. (Doumandji et Doumandji-Mitiche, 1994). La répartition de la flore et de la faune est influencée par les facteurs climatiques sans être exclusive, souvent l'action de certains facteurs est prépondérante, ils sont alors déterminants et définissent le milieu (Ozenda, 1983). Dans cette partie sont détaillés les températures, les précipitations et la synthèse climatique dans les deux régions d'étude.

I.3.3.1. Température

La température est un facteur climatique très important, c'est le facteur le premier à examiner pour comprendre l'effet écologique sur les êtres vivants (Dreux, 1974). Les températures mensuelles enregistrées durant la période de 10 ans (2014-2023) dans les stations météorologiques de Ghardaïa sont notée dans le tableau I 1. Les valeurs de la température affichées dans le tableau 1 caractérisent le climat en deux périodes. Dans la premier période, on remarque que la température moyenne durant 10 ans du mois le plus chaud est notée en Juillet (36.38°C). Par contre la température moyenne du mois le plus froid revient au mois de Janvier (11.82°C). Nous observons que les mois le plus chaud sont mai juin juillet aoute septembre et octobre

Tableau I.1. Températures mensuelles de la région Ghardaïa (R2), période de 2014 à 2023.

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	24.1	17.5	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

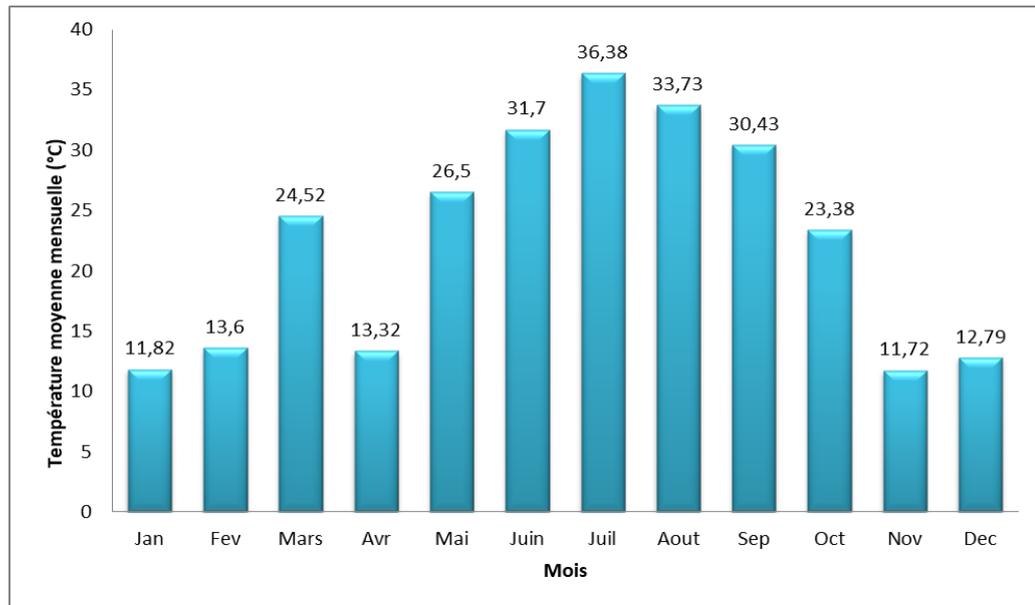


Figure I.4. Température moyenne mensuelle de la région de Ghardaïa, période de 2014-2023

I.3.3.2. Vents

Les effets du vent sont partout sensibles et se traduisent par le transport et l'accumulation du sable, le façonnement des dunes, la corrosion et le polissage des roches et surtout l'accentuation de l'évaporation...etc. (Monod, 1925). Ils sont de deux types :

- Les vents de sables en automne, printemps et hiver de direction Nord –Ouest.
- Les vents chauds (Sirocco) dominant en été, de direction Sud Nord ; sont très sec et entraînent une forte évapotranspiration, nécessitent des irrigations importantes.

Tableau I.2. Vents mensuelles de la région Ghardaïa (R2), période de 2014 à 2023

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Vent (m/s)	9.51	8.85	8.5	8.42	8.59	8.64	9.2	8.86	8.77	9.6	9.43	9.56

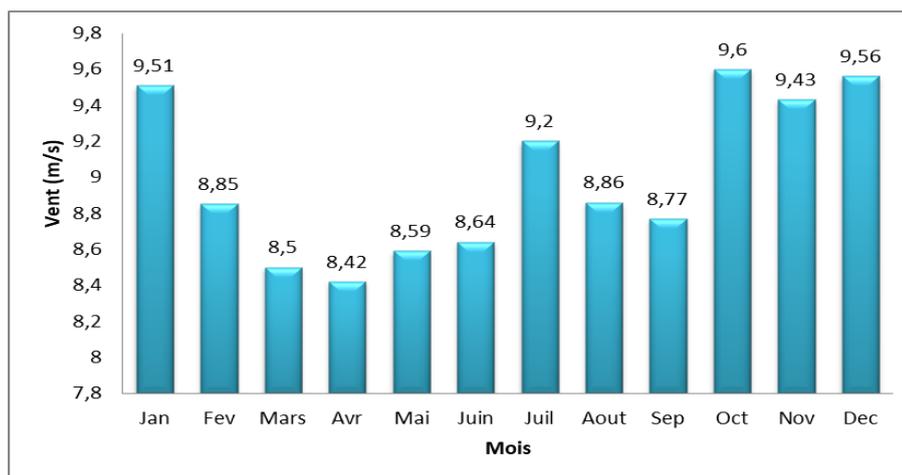


Figure I.5. Vitesse du vent moyenne mensuelle dans la région de Ghardaïa, période de 2014-2023.

I.3.3.3. Humidité

L'humidité est définie comme étant le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide et la pression de saturation à la même température. Elle est exprimée en pourcentage. En général, la région de Ghardaïa est très sèche avec une humidité très faible, presque inexistante, même si elle peut être un peu plus élevée en hiver, mais elle n'atteint pas les niveaux d'humidité que l'on trouve dans les zones côtières.

I.3.3.4. Pluviométrie

La pluviométrie est un facteur écologique fondamental pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes (Rama de, 1984). Également, Mutin (1977) note que la pluviométrie a une influence importante sur la flore et sur la biologie des espèces animales. Les quantités de précipitations mensuelles notées au cours de 10 ans (2014– 2023) dans la région de Ghardaïa sont regroupées dans le Tableau I.3.

Dans la région de Ghardaïa, les pluies sont généralement rares en raison de la nature de la région désertique et les précipitations moyennes y sont très faibles. La majeure partie se produit pendant l'hiver et leur quantité est faible et irrégulière.

Tableau I.3. Précipitations mensuelles enregistrées dans de la région Ghardaïa, période de 2014 à 2023.

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	0.10	0.10	4.68	5.46	3.35	1.16

P : Précipitation totale annuelle de pluie et/ou neige fondue (mm) (Tutie po, 2023)

Nous constatons qu'au mois d'octobre, le pourcentage de précipitations est 5,46(mm) plus élevé que le reste des mois en 10 ans.

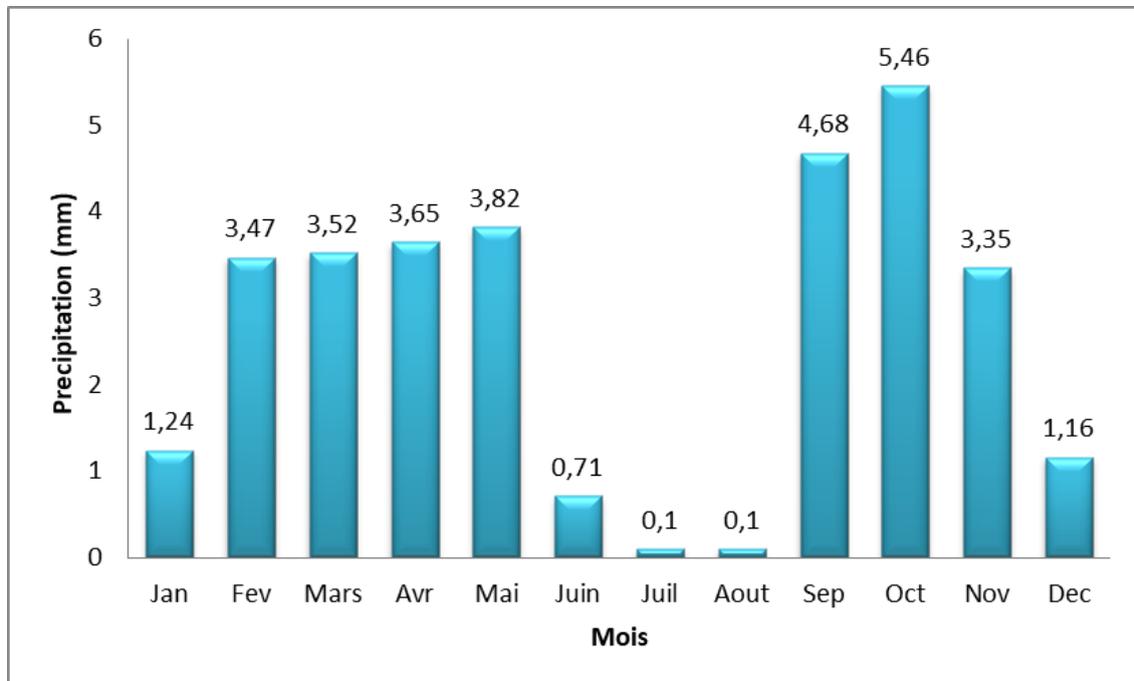


Figure I. 6. Précipitation moyenne mensuelle de la région de Ghardaïa, période de 2014-2023

I.3.4. Synthèse climatique

Il est très difficile de caractériser le climat sans l'utilisation de diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN et le diagramme clim agramme d'EMBERGER. Ces derniers sont développés dans ce qui suit.

I.3.4.1. Diagramme ombrothermique BAGNOULS et GAUSSEN

Le diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN permet de définir sur un graphique bidimensionnel, les périodes sèches et humides de n'importe quelle région à partir de leurs précipitations et températures mensuelles (Dajoz, 2003 ; Vilain, 1987). Un mois est déclaré comme sec lorsque les précipitations mensuelles (mm) sont inférieures au double des températures moyennes.

D'après les données climatiques et la figure I.6, la région Ghardaïa est caractérisée par une période sèche toute l'année.

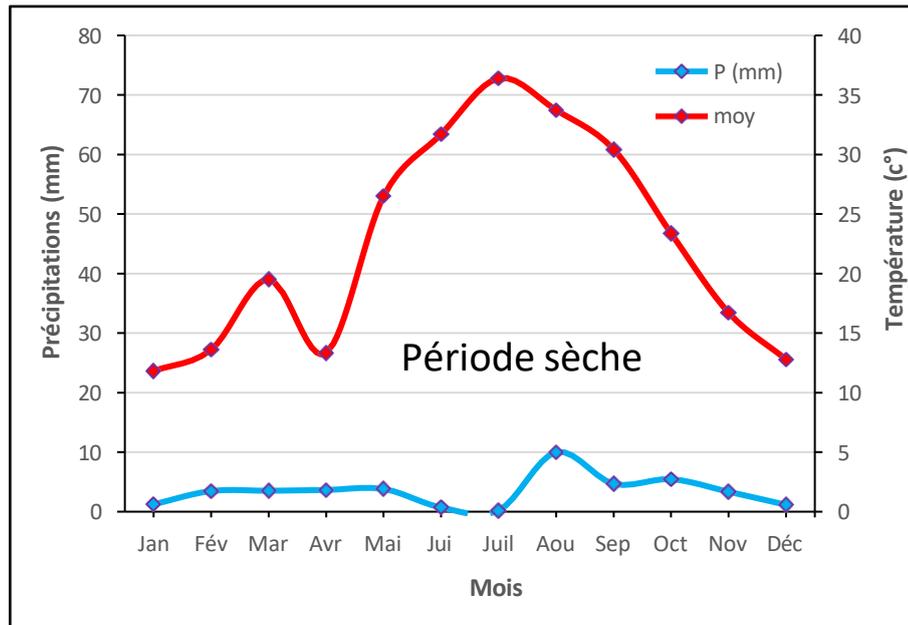


Figure I.7. Diagramme ombrothermique de la région de Ghardaïa.

I.3.4.2. Climagramme pluviothermique d'EMBERGER

Le quotient pluviométrique d'EMBERGER permet le classement des différents types de climat (Dajoz, 1971). Pour cela, il faut mettre sur le clim agramme la moyenne des températures minima des mois les plus froids en abscisse et le quotient pluviométrique (Q3) d'EMBERGER en ordonnée. Le Q3 est donné par la formule suivante (Stewart, 1969) :

$$Q3 = 3.43 \times \frac{P}{(M - m)}$$

Où :

Q3 : Quotient pluviométrique D'EMBERGER ;

P : Sommées précipitations annuelles exprimé en mm ;

M : Moyenne des températures maxima du mois le plus chaud en (°C);

m : Moyenne des températures minima du mois le plus froid en (°C).

D'après le Diagramme D'EMBERGER, on trouve que la région de Ghardaia est située dans l'étage bioclimatique saharien à hiver tempéré (Fig.I.8).

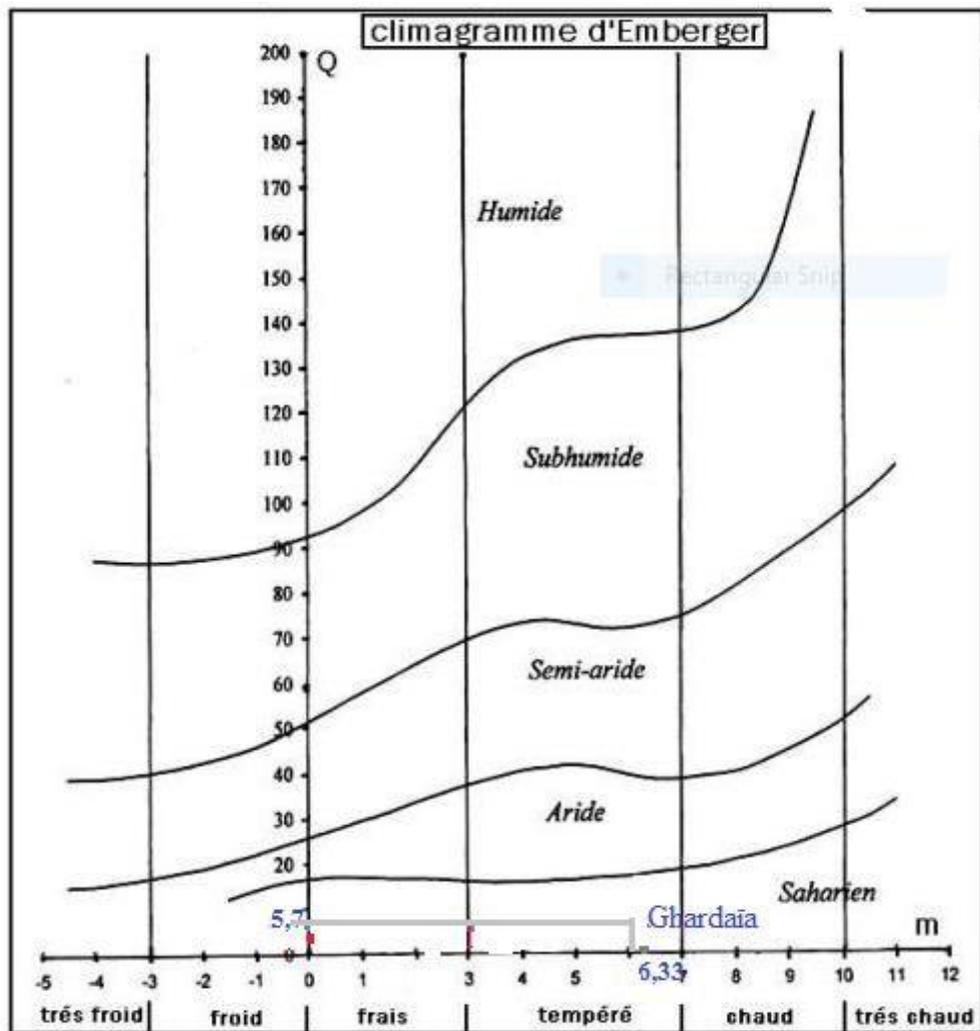


Figure I.8. Étage bioclimatique de la région Ghardaïa et selon le clim agramme D'EMBERGER

I.4. Etude géologie et hydrogéologique de la zone d'étude

I.4.1. Cadre géologique

La région de Ghardaïa fait partie du grand bassin sédimentaire du Sahara septentrional, dont les terrains en présence sont tabulaires légèrement inclinés vers le Nord-est (centre du Bassin). La stratigraphie des terrains recouvrant l'Albien dans la zone de Ghardaïa, est assez simple. Les coupures stratigraphiques sont basées essentiellement sur le caractère lithologique vue la rareté des fossiles.

I.4.2. stratigraphie

❖ *Albien*

Dépôt continental argilo-détritique d'une épaisseur qui peut atteindre plus 400 mètres, Composé de sable et grès à passage d'argile multicolore sableuse. Il renferme **UNE** importante réserve d'eau souterraine. (Sebti, 2015)

Cénomanién

Dépôt argilo-lagunaire ; composé d'argile grise et noire à intercalation de gypse et d'anhydrite à la partie supérieure, et d'argile multicolore à la partie inférieure. L'épaisseur du Cénomanién est de 335 mètres, par contre le Draconiens son épaisseur est de 70 mètres. (Sebti, 2015)

❖ *Turonien*

Dépôt carbonaté de 120 mètres d'épaisseur, formé essentiellement de calcaire gris dolomitique massif. (Sebti, 2015)

❖ *Sénonien*

Sénonien carbonaté : Dépôt carbonaté de 25 mètres d'épaisseur constitué d'une alternance de calcaire blanc Fissuré et karstique, argile jaune et de dolomie (Sebti, 2015)

Sénonien lagunaire : Dépôt lagunaire de 75 mètres d'épaisseur, représenté par une alternance de marne bariolée, anhydrite et calcaire marneux jaune et rouge (Sebti, 2015)

❖ *Mi pliocène*

Dépôt continental détritique constitué de sables moyens à grossiers rouges argileux ; relativement épais de 65 mètres d'épaisseur. (Sebti.2015)

❖ *Quaternaire*

Ces formations sédimentaires spécifiquement sahariennes sont des alluvions Quaternaire fluviale qui ne se trouvent pas exclusivement dans les vallées de Ruissellement mais elles remplissent aussi de grandes aires déprimées dans les chaînes Plissées de l'atlas saharien (Sebti, 2015)

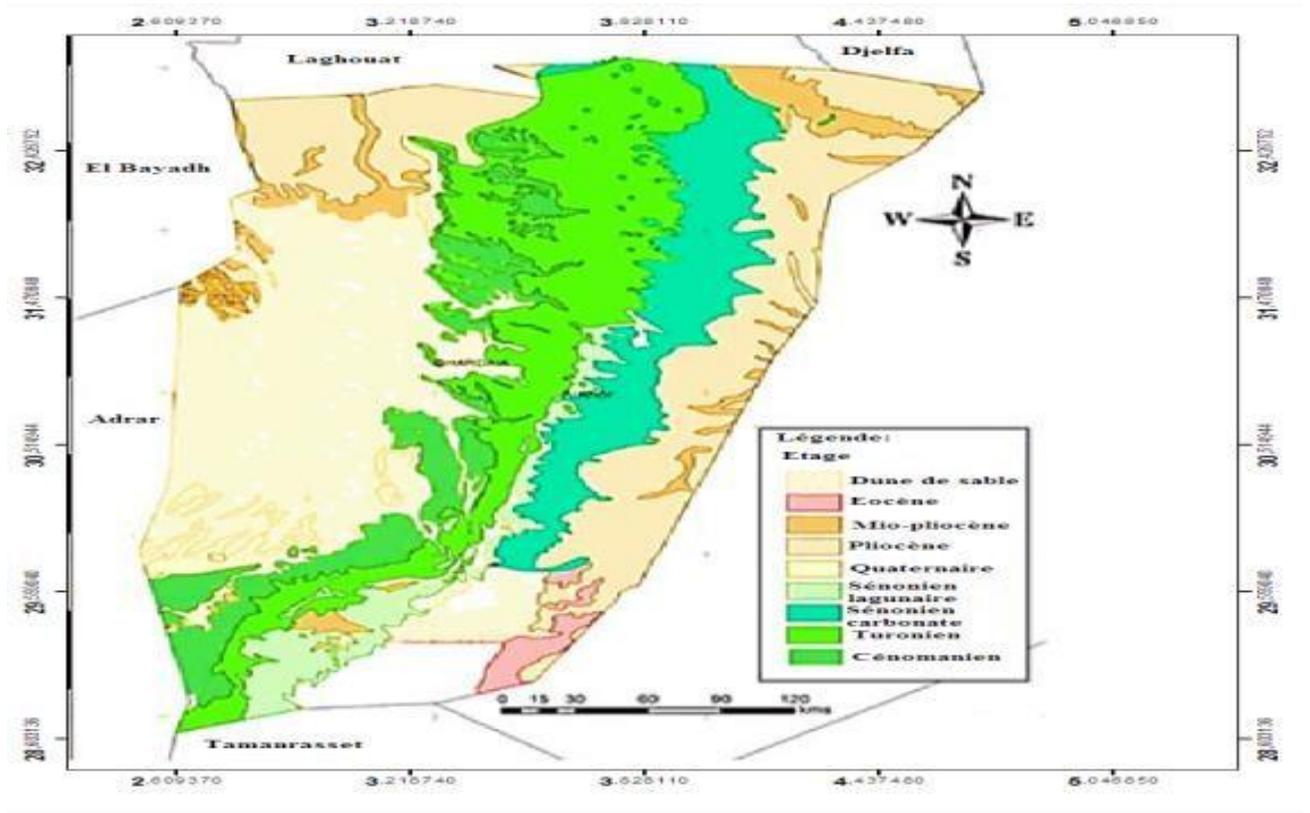


Figure I.9. Carte géologique de la région de Ghardaïa.

I.4.2. Cadre hydrogéologique

I.4.2.1. Aquifère du SASS

L'immense aquifère du bassin du Sahara septentrional est connu pour être l'un des plus grands réservoirs aquifères du monde. Selon les recherches actuelles, il est démontré que le système aquifère du Sahara septentrional, appelé SASS, Il s'agit d'un vaste réservoir composé de plusieurs

Couches. De manière spatiale, ces frontières hydrogéologiques couvrent une superficie considérable de 1100.000 km² (SASS, 2003), réparties en Algérie pour 60%, en Lybie pour 30% et un peu moins en Tunisie pour 10%. Ces frontières constituent une ceinture continue de la frontière marocaine au Nord-Ouest du bassin, jusqu'à la ville d'Hun dans l'extrême Sud-Est de la Lybie. La dorsale du M'Zabdi divise le domaine du SASS en deux bassins hydrographiques : le bassin occidental, qui couvre 280 000 km², est drainé vers le Sud, tandis que le bassin oriental, qui couvre 500 000 km², est drainé vers le Nord-Est. (Achour, 2014)

Le Sahara septentrional SASS est un système aquifère qui s'étend du Nord au Sud, de l'Atlas saharien aux plateaux de Tidikelt et Tinrhert, et d'Ouest en Est, depuis la vallée Guir-Saoura en Algérie jusqu'au Graben de Hun en Lybie. Les recherches montrent que cela Il y a deux principaux

réservoirs aquifères dans le système aquifère : le complexe terminal situé au-dessus, avec une nappe de sub-surface, et le continental intercalaire le plus étendu, avec une nappe profonde captive. (Achour, 2014).

I.4.2.2 Continental Intercalaire

L'aquifère le plus vaste du bassin est le continental intercalaire, ses extensions déterminent également les limites qui ont été établies pour le domaine du SASS. Il englobe principalement toutes les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses du territoire. Crétacé inférieur. L'aquifère est couvert par des séries argilo-évaporitiques épaisses qui donnent un toit imperméable. (Achour, 2014).

A- Limites et structure du CI

Le domaine du CI est divisé en deux sous-bassins hydrogéologiques par la dorsale du M'zab, orientée approximativement Nord-Sud : le bassin oriental et le bassin occidental. La superficie totale de l'ensemble est de 1100.000 km², avec une épaisseur moyenne de 358 mètres (Ould Baba .2005) Les accidents Nord-Sud d'Amguid El Biod, qui se prolongent du socle primaire d'El Hoggar, ont un impact considérable sur la partie Sud du réservoir du CI.

B- Piézométrie et alimentation du CI

(OSS 2003) met en évidence que les flux d'eau de la nappe en provenance de l'Atlas saharien étaient divisés en deux directions principales. Cette eau coule vers le Sud et le Sud-Ouest, dans les régions de Tidikelt, Touat et Adrar. Au Nord-Est, vers la région des chotts et vers la nappe de la région côtière de la Tunisie(OSS 2003) Bien qu'il soit situé en zone aride, il est admis que le CI est directement alimenté par l'infiltration des eaux de ruissellement sur les zones périphériques d'affleurement, dans les piedmonts de l'Atlas saharien et les rebords sud des plateaux de Tidikelt et Tinihert.

L'alimentation du CI s'effectue aussi indirectement dans le grand erg occidental, à travers les dunes de sables.

C- Structure du ci dans la région du m'zab

Dans la région du M'zab, le continental intercalaire est constitué de sables fins et de grés jaunâtres à gris avec des intercalations d'argiles. L'Aquifère est une masse gréso-sableuse, dont l'Albien est l'étage qui est récupéré et exploité avec succès par plusieurs forages à travers le pays. Situé dans la wilaya de Ghardaïa. Le toit de l'aquifère a une profondeur variable en fonction de la région. Il se situe entre 80 et 150 mètres au sud de la wilaya dans la région d'El Meniaa, tandis qu'à l'Est, il n'est atteint qu'à partir de 650 à 700 mètres de profondeur (région de Zelfana et Guerrara).

Le toit de l'aquifère albien est atteint à 290 à 300 mètres dans la vallée du M'zab. La profondeur moyenne de tous les forages exploitant l'aquifère dans la vallée est de 500 mètres. L'altitude de la zone et l'épaisseur des formations sous-jacentes formant le toit de la nappe influencent l'hydrodynamisme de la nappe. Dans les régions Sud et Est du territoire de la wilaya, la nappe est artésienne jaillissante, ce qui entraîne des pressions en tête des ouvrages de captage allant de 0,5 à 4 bars. Au Nord et à l'Ouest, la nappe est utilisée par pompage. (Moulay et Benhamadi, 2020)

I.4.2.3 Complexe terminal

Le complexe final s'étend sur une superficie de 665.000 km² et regroupe divers aquifères ayant des formations géologiques variées, allant du Turonien au Sénonien, en passant par l'Eocène et le Miopliocène. Interconnectés, ils forment un système hydraulique unique. Ces contraintes d'apparition sont ;

Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens.

A l'Est, le long du flanc oriental du Dahar et du J. Nafusa en Tunisie,

Au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït,

A l'Ouest, sur la dorsale du M'zab (calcaires du Turonien), considérée comme une zone d'alimentation du CT.

Comme la limite de la nappe du CT se trouve plus à l'Est de la région du M'zab, elle n'est pas réussie à être capturée dans la région de Ghardaïa. Par conséquent, nous ne nous concentrons que sur la nappe du CI (Achour, 2014).

A Alimentation -écoulement

Le remplissage le plus important du réservoir a été principalement effectué pendant les périodes de pluie du Quaternaire pour la nappe du Complexe Terminal. La recharge de la nappe se poursuit actuellement grâce à des quantités d'eau considérables :

Soit grâce à l'infiltration des eaux de ruissellement provenant des massifs montagneux. Les formations perméables affleurées, telles que l'atlas saharien, le M'zab et le Dahar, sont traversées par ces derniers, soit par des infiltrations exceptionnelles de pluies dans les sables du grand Erg oriental, qui reposent en partie sur des horizons perméables du Complexe Terminal. (Ouali, 2005)

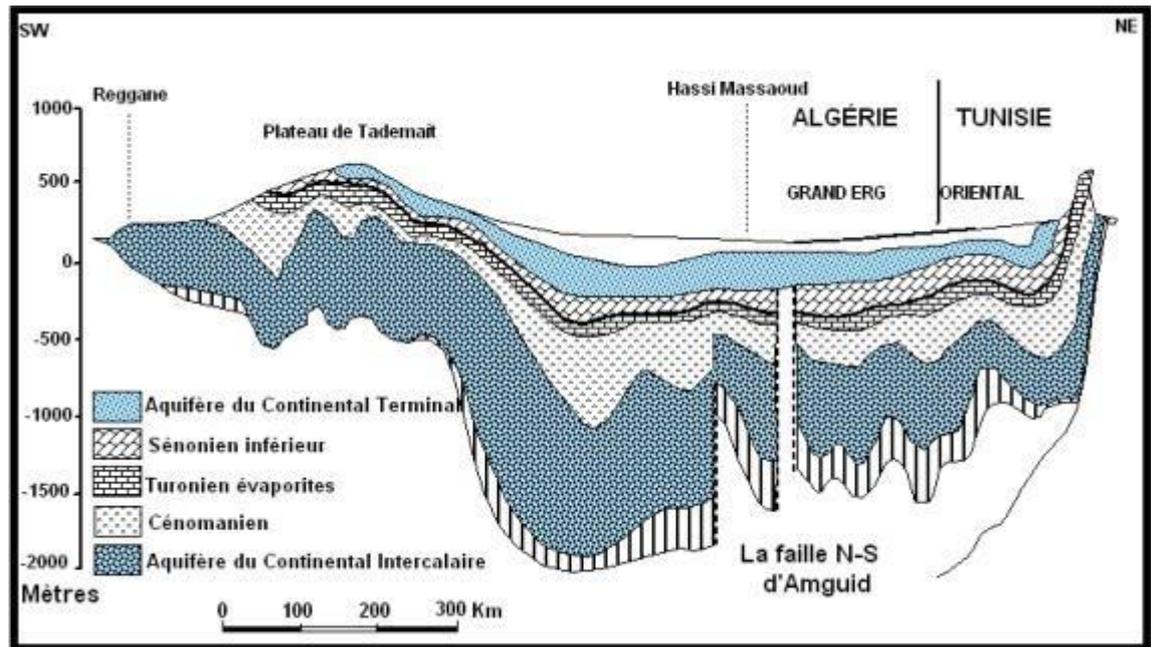


Figure II.10. Coupe hydrogéologique transversale du "CT"(Unesco, 1972)

I.4.2.4. Aquifère albien dans la région de Ghardaïa

Elle représente une nappe chaude, ce qui en fait le plus grand réservoir géothermique du Sahara algérien.

D'un point de vue général, la nappe du Continental Intercalaire du Sahara septentrional, les formations sableuses et résiduelles de sable et d'argile du Barrémien à l'Albien. La couche aquifère argilo-gréuse d'âge Albien est cependant la seule atteinte et exploitée avec succès dans la wilaya de Ghardaïa.

La profondeur de l'Albien varie de 160 à 500 mètres en fonction de la région et de la pente de la couche, en allant de l'Ouest vers l'Est de la wilaya.

Le toit des aquifères est moins profond, allant de 60 à 150 mètres dans les régions sud-ouest, comme Hassi-fhal et El-Menia, ce qui explique le nombre élevé de forages dans ces régions, en particulier pour les activités agricoles. Toutefois, la profondeur du toit varie. Les zones nord telles que Guerrara et Zelfana présentent une altitude plus élevée, allant de 650 à 700 mètres, ce qui explique le nombre modéré de forages albiens dans ces régions. Dans les communes environnantes du chef-lieu, telles que Metlili, Daya, Bonoura, Atteuf, Berriane, Sebseb et Mansoura, les toits varient de 250 à 320 mètres de profondeur.

Au niveau local, l'écoulement global des eaux est d'Ouest en Est. L'alimentation de la nappe bien qu'elle soit minime, provient directement des eaux de pluie au piémont Sud de l'Atlas Saharien en faveur de l'accident Sud-Atlasique. (Sebti, 2015)

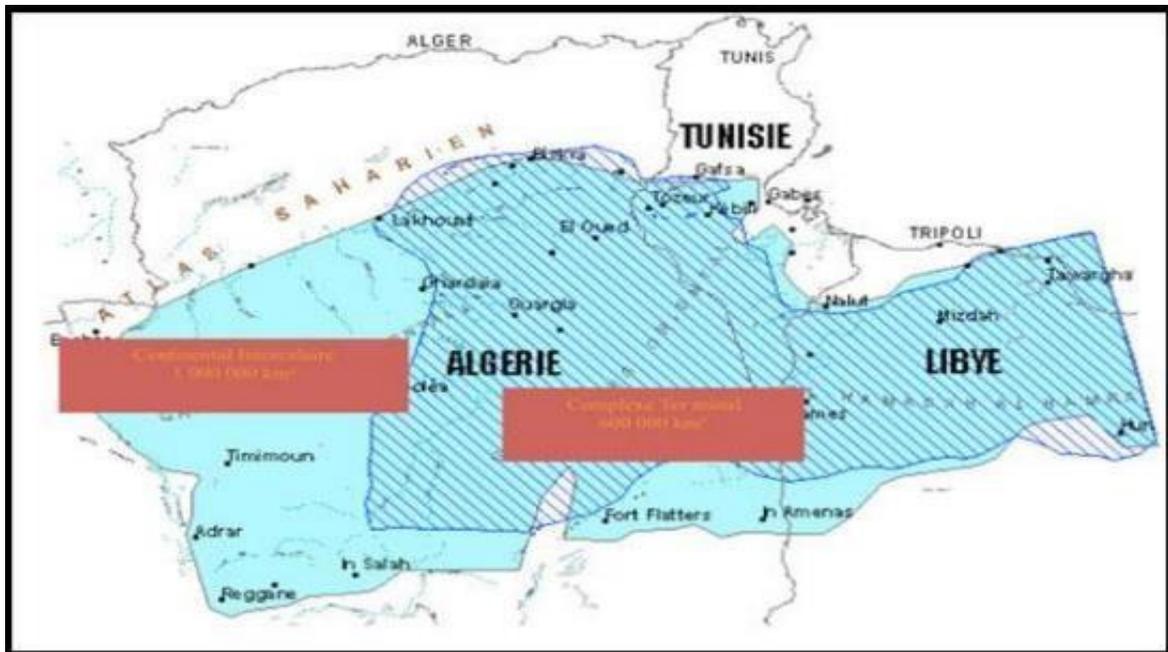


Figure II.11.Limites du domaine SASS(Achour, 2014).

I.5. Conclusion

Ghardaïa est caractérisée par un climat à dominante désertique, caractérisé par des hivers courts et froids et des étés longs et chauds. La température est élevée en été, atteignant 40 degrés. La région de Ghardaïa fait partie du système aquifère désertique et des principales ressources en eau de la région, car elle est stockée dans deux types d'aquifères : aquifères superficiels protégés par du calcaire Calcaires docinoniens carbonatés, calcaires dotoroniens fracturés et alluvions des vallées de la région, alimentés directement par les eaux de pluie, ainsi que par le ruissellement fréquent. Les vallées, aquifère profond souvent captif de bitume continental, constitué de Sable, grès et argilo-sableux de la période albanaise

Chapitre II : méthodes et outils utilisé au l'étude

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons effectué des analyses physico-chimiques de 12 forages de la région de Ghardaïa. Des échantillons ont été prélevés au laboratoire de l'Unité Algérienne des Eaux de Ghardaïa (ADE). Pour étudier les résultats, nous avons abordé plusieurs programmes, dont. Chadha. Et Gibbs. Piper et indicateurs pour déterminer la qualité de l'eau, compris PIG et CCME-WQI.

II.2. Les analyses physico-chimiques

Les analyses physiques, chimiques et bactériologiques que nous avons menées dans un laboratoire à Ghardaïa pour 12 puits en 2023 visent à suivre l'évolution des différentes normes destinées à la consommation humaine. Les propriétés physiques et chimiques de l'eau dépendent de facteurs tels que la composition chimique et minérale du sous-sol. Lors du prélèvement d'échantillons dans des puits, cela est considéré comme une question importante car elle affecte directement les résultats de l'analyse. Sans modifier ses propriétés physiques et chimiques, telles que les matières en suspension et les gaz dissous, car la qualité n'est pas affectée. Résultats(Rodier et al 2009). Où l'échantillon est prélevé et quand il est stocké au moment de l'analyse de l'eau pour garantir la fiabilité de l'analyse résultats.

II.3. Matériels et méthodes d'analyse

II.3.1. Choix des points de prélèvement

Les points de prélèvement sont situés dans différentes communes de la wilaya de Ghardaïa :

Tableau II.3.Les points de prélèvement et les coordonnées des puits.

N	X	Y	Nom
1	3,685	32,48555556	Melika haut
2	3,663049	32,497741	Ben smara 01
3	3,664444444	32,50611111	Ben smara 02
4	3,668963	32,48148	TEM (RTA N° Tidhaft
5	3,67919	32,4799	Melika bas (Parc)
6	3,680433	32,497967	Bouhraoua bas
7	3,688055556	32,49194444	Hadj Messaoud
8	3,683611111	32,50666667	Bouhraoua N°3 (Sonelgaz)
9	3,677251	32,489076	HAI EL MOUJAHIDINE

10	3,681944444	32,47472222	TEM 03
11	3,664722222	32,48666667	Baba saad
12	3,6725	32,49944444	Bouhraoua N°5 (Chaabet Tobi)

Figure II.13 : Les points de prélèvement et les coordonnées des forages

II.4. Analyse physico-chimiques

Afin d'évaluer la qualité des eaux destinées à la consommation humaine dans la région Ghardaïa. 12 points d'eau ont été échantillonnés à partir des forages bien répartis dans la région d'étude durant le mois de décembre 2023. Une analyse Physico-chimique et bactériologie a été réalisée sur ces échantillons. Tout d'abord, nous mesurons la température, la conductivité et le pH par des appareils Multi-paramètre. Ensuite, nous collectons selon la méthode standard du protocole (Rodier et al. 2016). A été utilisé pour prélever les échantillons, puis ils ont été immédiatement transférés au laboratoire de l'Autorité algérienne des eaux ADE pour leur analyse. L'analyse des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et Cl^- a été réalisée à l'aide d'un titrage volumétrique. Murexide, tandis que pour le TH, on utilise du NH_4OH et du réactif ériochrome. La quantité de Mg^{2+} est le résultat de la disparité entre la quantité de TH et de Ca^{2+} . On a mesuré la concentration de Cl^- en utilisant la méthode de Mohr; on ajoute une solution de chromate de potassium à l'échantillon et on le titre avec une solution d' AgNO_3 (0.01 N). Afin d'évaluer la concentration de HCO_3^- , on titre l'échantillon en utilisant une solution de HCl (0.1 N) Jusqu'à ce que le pH de l'échantillon atteigne 4.3. On a mesuré les concentrations en Na^+ et K^+ en utilisant un photomètre à flamme JENWAY 6850. On a procédé à l'analyse des nitrates, sulfate, nitrite et ammonium en utilisant la spectrophotométrie visible UV/vis ODYSSEY DR 2500.

Chaque analyse des paramètres nécessite une répétition de la mesure au moins deux fois. Le poids des dépôts laissés après l'évaporation à sec d'un échantillon d'eau est utilisé pour évaluer le total des solides dissous (TDS) dans l'eau (techniques Gravimétriques).

II.5. Balance ionique

L'étude de la fiabilité des données comprend, d'une part, la vérification de l'équilibre ionique. Avant cette validation, les principaux ions impliqués dans l'évaluation du bilan ionique ont été analysés. Sachant que l'analyse chimique de l'eau n'est représentative que lorsque le bilan ionique est inférieur ou égal à 10%, le bilan ionique de tous les échantillons analysés a été systématiquement vérifié. L'erreur de balance ionique (BI) est donnée en pourcentage et est calculée par la relation suivante (kouassi et al,2013).

$$\text{BI} (\%) = \frac{(\text{cations} - \text{anions})}{(\text{cations} + \text{anions})} \times 100$$

On peut considérer une analyse comme:

excellent lorsque $\text{BI} \leq 5\%$;

acceptable lorsque $5\% < BI < 10\%$;

douteuse lorsque $BI \geq 10\%$ (Aristide)

II .6. Faciès Hydro chimique

II.6.1. Diagrammes Piper

Les diagrammes Piper utilisent des éléments principaux pour représenter les différentes phases des eaux souterraines. Les diagrammes de Piper permettent de représenter les anions et les cations sur deux triangles définis dont les côtés montrent la teneur relative de chaque ion majeur par rapport à la somme de ces ions (cations dans le triangle de gauche et anions dans le triangle de droite). Les diagrammes de Piper sont idéaux pour les études comparatives d'un grand nombre d'échantillons. (Zereg ,2019) et (Mente-Nedelec et Grouhel-Pellouin,2019)

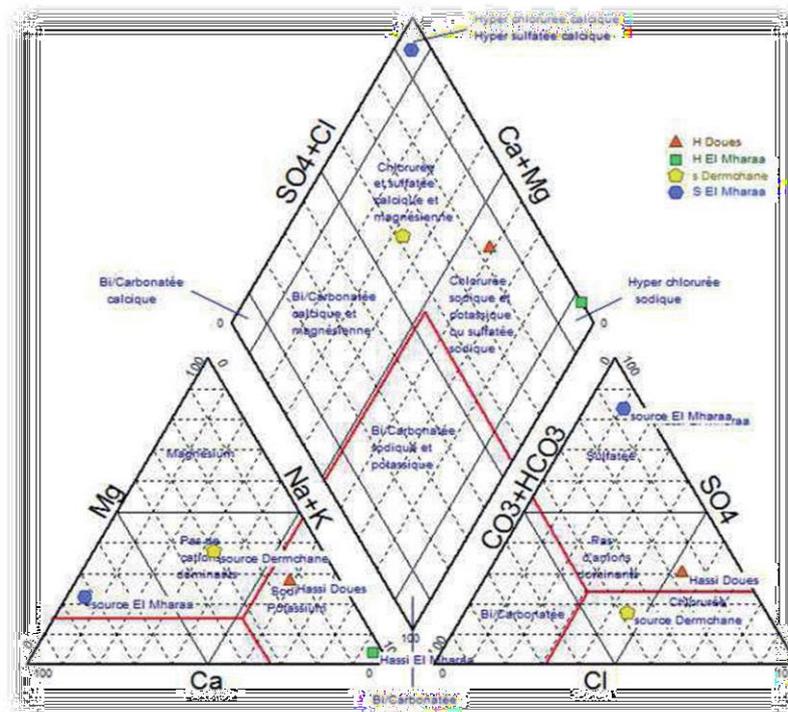


Figure II. 1. Exemple dediagramme de Piper

II.7. Processus Hydro chimiques

II.7.1. Diagramme Chaddha

Le diagramme chimique de l'eau proposé par (Chadha 1999) permet également Fournir des éléments qui aident à mieux comprendre le processus Chimie des eaux de la nappe aquifère d'Ain

Djacer. Ce schéma s'applique à Karmegam et al. (2010), ont connu du succès dans le monde entier, (2010), Thilagavathi (2012) et Alligui algérien (2011) ont déterminé Evolution de différents processus hydrogéochimiques. Le processus de chimie de l'eau proposé par Chadha (1999) permet de diviser les eaux en quatre catégories :

Groupe 1 : Eau d'appoint de type Ca-HCO₃

Groupe 2 : Eau échangée avec excès de Ca-Mg-Cl Contre -ion

Groupe 3 : Eau salée riche en Na-Cl, peut-être de l'eau de mer Ou contact avec des formations salées.

Groupe 4 : Eau soumise à un échange d'ions Na - HCO₃ (DJENBA S, BOUDOUKHA A, BENCER S.2015)

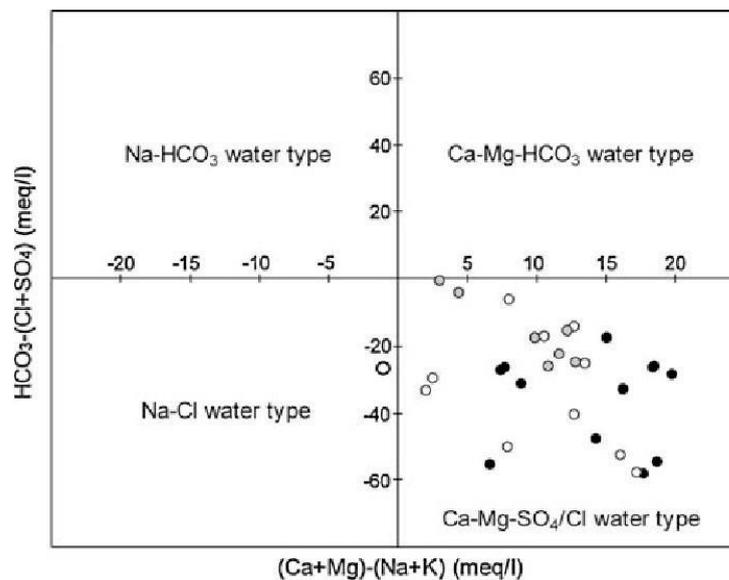


Figure II.2.Exemple de diagramme de chadha

II.7.3. Diagramme de Gibbs

Les diagrammes de Gibbs sont utilisés depuis longtemps avec succès pour décrire les processus géochimiques. Basé sur la minéralisation des eaux souterraines (NASEEM et al., 2010 ; RAVIKUMAR et SOMASHEKAR,2011, Maghad et al., 2012 ; MERLIN et al., 2017 ; XING et al., 2013 ;Ce diagramme a été initialement conçu pour les eaux de surface et ensuite appliqué aux eaux souterraines ,est actuellement remise en question (MARADI A & SHAND P., 2018) car elle n'est pas présentée de manière exhaustive Processus géochimiques contrôlant la minéralisation des eaux souterraines (M. MURHULA, Succès M. KUTANGILA ,2019)

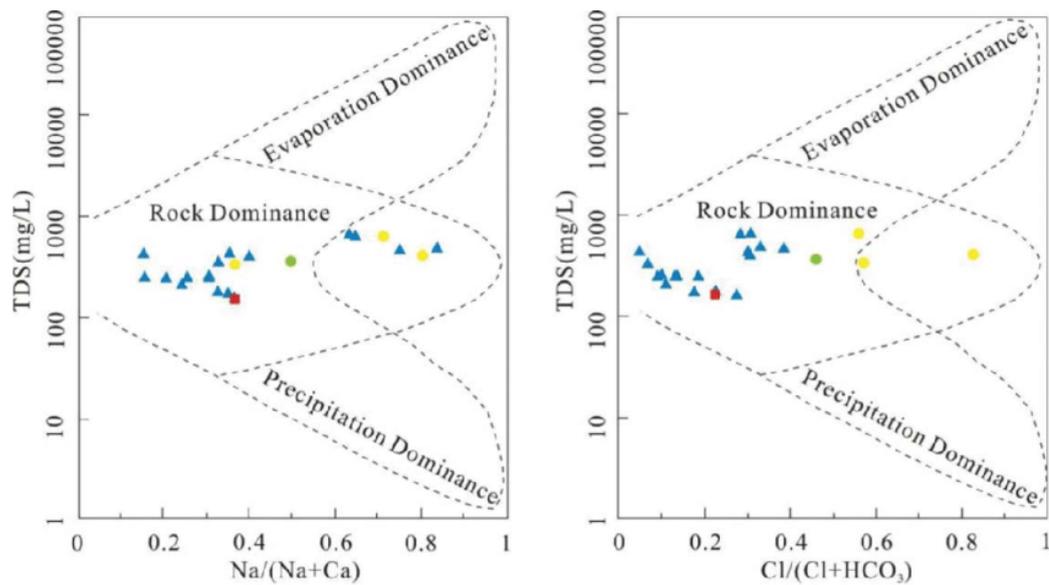


Figure II.3. Exemple de diagramme de Gibbs

II.8. Interpolation géostatistique par krigeage

Les méthodes probabilistes (ou stochastiques) d'interpolation sont appelées méthodes des géostatistiques, puisqu'elles découlent directement de l'analyse géostatistique des données d'observation et incorporent le concept du phénomène naturel (CRESSIE, 1993 ; GOOVAERTS, 1997). Parmi les méthodes géostatistiques, il est possible d'utiliser les techniques de régression classique, de régression locale et de krigeage (FLORENT, 2015).

Le Krigeage est une méthode d'interpolation issue de la géostatistique. Cette méthode porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige. Dans les années 1950, Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale des minerais à partir d'un ensemble de forages. C'est cependant le français Matheron qui a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale. Matheron a également assuré le développement de cette méthode au Centre de Géostatistique de l'école des Mines de Paris et lui a donné le nom de « Krigeage » (BUSLIG, 2014).

Une fois connu le variogramme, il est possible de calculer la variance d'estimation associée à tout estimateur linéaire, et de plus de déterminer les pondérateurs qui conduisent à la variance d'estimation minimale tout en assurant une absence de biais : c'est le krigeage (JEAN-PAULCHILES, 2004).

II.8.2. Types de krigeage

II.8.2.1. Krigeage ordinaire

Il est rarement vérifié que l'hypothèse du krigeage simple implique que l'espérance de la fonction Aléatoire $Z(\cdot)$ soit connue. Ainsi, cette méthode a été utilisée lorsque l'espèce est inconnue et constante localement, c'est-à-dire dans le voisinage du krigeage. Le krigeage classique (Matheron, 1970) est la méthode de krigeage la plus couramment employée d'après Gratton (2002). Ce genre de carrière ne nécessite pas une hypothèse de stationnement d'ordre deux. De cette manière, il sera développé ici en se basant sur l'hypothèse plus générale de stationnarité intrinsèque. Le modèle fondamental de cette méthode est le Suivant (Sophie Baillargeon, 2005) :

$$\mathbf{Z(s)} = \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\delta(s)}, \mathbf{s} \in \mathbf{D}$$

II.8.2.2. Krigeage simple

La théorie du krigeage a d'abord t'es d'enveloppée dans un cadre stationnaire de second ordre. Sous ces hypothèses, le krigeage le moins complexe est celui dans lequel la stationnarité postulée est de deuxième ordre et l'espérance de la fonction aléatoire étudiée est supposée connue et constante sur tout le champ. Il s'agit du krigeage simple Ce krigeage repose sur la modélisation suivante de la fonction aléatoire d'intérêt (Sophie Baillargeon, 2005) :

$$\mathbf{Z(s)} = \mathbf{m} + \boldsymbol{\delta(s)}, \mathbf{s} \in \mathbf{D}$$

II.8.2.3. Krigeage universel

Le modèle du krigeage universel est le suivant :

$$\mathbf{Z(s)} = \boldsymbol{\mu(s)} + \boldsymbol{\varepsilon(s)}$$

Où $\boldsymbol{\mu(s)}$ est un déterminant. Prenons l'exemple de la figure ci-dessous, qui utilise les mêmes données que celles utilisées pour expliquer les concepts du krigeage ordinaire, les données observées sont représentées par les cercles pleins. (Sophie Baillargeon, 2005)

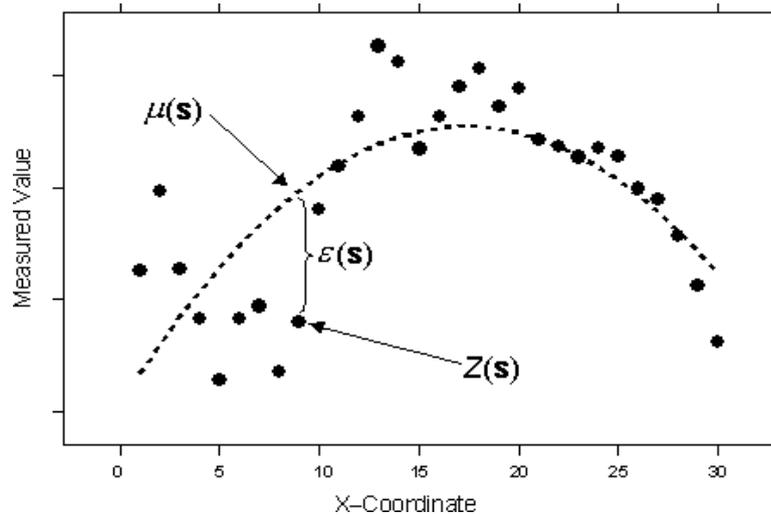


Figure II.4. Exemple de courbe de krigage universel.

II.9. Interpolation non-géostatistiques par (IDW)

L'hypothèse selon laquelle les éléments proches les uns des autres se ressemblent davantage que ceux plus éloignés est explicitement mise en œuvre par l'interpolation à pondération inverse de la Distance (IDW). IDW utilise les valeurs mesurées autour de l'emplacement de prédiction pour prédire une valeur pour tout emplacement non mesuré. La valeur prédite est plus influencée par les valeurs mesurées les plus proches de l'emplacement de prédiction que par celles qui en sont plus éloignées. Selon IDW, chaque point mesuré possède une influence locale qui diminue en Fonction de la distance. Les points les plus proches de l'emplacement de prédiction reçoivent des poids plus élevés, tandis que les poids diminuent en fonction de la distance, d'où le terme de pondération inverse de la distance. L'exemple suivant présente les pondérations attribuées aux l'exemple suivant (<https://pro.arcgis.com> .28/05/2024)

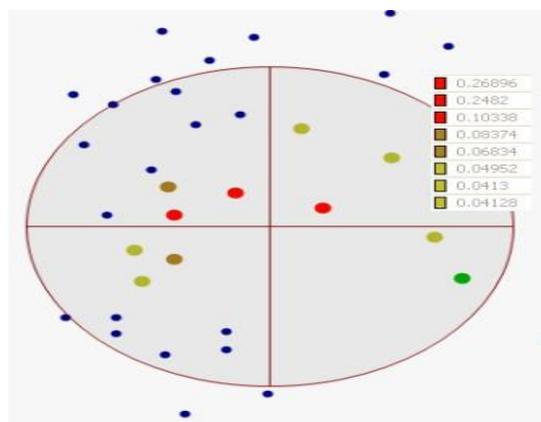


Figure II.5. Exemple de propriété de la méthode (IDW).

Les poids attribués à chaque point de données sont affichés dans la fenêtre Poids, qui permet de Générer une valeur prédite à l'emplacement indiqué par le réticule.

II.10. Indices d'évaluation de qualité d'eau

II.10.1. Indices d'évaluation de qualité d'eau PIG

La détermination de l'indice de contamination des eaux souterraines PIG permet de mesurer l'ampleur de la contamination. Cela témoigne d'une interaction complexe entre les paramètres de qualité de l'eau et la qualité globale de l'eau de l'aquifère. la méthode de calcul du PIG est fourni de la manière suivante :

Étape I : Un poids relatif (Rw) est attribué à chaque paramètre chimique en fonction de son influence sur la santé humaine. Le poids relatif varie de 1 à 5, avec une valeur de 5 du Rw qui correspond au PH, au TDS, au NO₂, au NH₄ et au NO₃ ; 4 à Na⁺, Cl⁻, PO₄, Fe, Mn et Pb ; 3 à HCO₃⁻; 2 à Ca²⁺ et Mg²⁺ et 1 à K⁺. Selon les valeurs de Rw, les paramètres chimiques respectifs ont un impact moindre sur la santé, tandis .que les valeurs plus élevées ont un impact plus significatif sur la santé humaine.

Étape II : Évaluation de la valeur du poids (Wp) Le paramètre de poids correspond au rapport entre Le Rw de chaque mesure de qualité de l'eau et la somme de tous les poids relatifs. Grâce au paramètre de poids, il est possible de déterminer la proportion relative de chaque mesure de qualité d'eau dans la qualité globale.

$$Wp = \frac{Rw}{\sum Rw}$$

Étape III : État de la concentration (Sc) La qualité de l'eau de chaque échantillon d'eau est évaluée en fonction de sa concentration (C) par rapport à sa norme de qualité de l'eau potable (Ds). La concentration (Sc) de chaque mesure de la qualité de l'eau de chaque échantillon d'eau est divisée par sa norme de qualité d'eau potable (Ds) :

$$Sc = C / Ds$$

Étape IV : La qualité globale de l'eau (Ow) est calculée en prenant le produit de chaque mesure de qualité de l'eau avec son état de concentration correspondant. Ow reflète la qualité globale de l'eau et permet également de comprendre la nature du paramètre de poids par rapport à la concentration de chaque mesure de qualité de l'eau. Ow est calculé par :

$$Ow = Wp * Sc$$

Étape IV : Indice de contamination des eaux souterraines (PIG) Le calcul de l'indice de pollution des eaux souterraines consiste à ajouter toutes les valeurs d' O w obtenues à partir de toutes les mesures de qualité de l'eau de chaque échantillon d'eau. Les valeurs de PIG sont :

$$PIG = \sum OW$$

Étape VI : consiste à classer le PIG. Le PIG est classé en fonction de la norme de qualité de l'eau Pour la consommation. Il serait également possible d'utiliser la classification PIG pour évaluer la contamination des eaux souterraines. Quand la qualité d'un échantillon d'eau spécifique et la concentration de la mesure de qualité de l'eau sont les mêmes, leur influence sur la santé pour ait être minime. Par conséquent, la valeur PIG peut être considérée comme un indicateur de non-Pollution, tandis que la valeur PIG supérieure à 1,0 peut être considérée comme une contribution de concentrations supplémentaires de mesures de qualité de l'eau dans les eaux souterraines. Base de connaissances pour l'intensité du PIG:

Si $PIG < 1,0$ Alors Pollution insignifiante

Si $1,0 < PIG < 1,5$ puis faible pollution

Si $1,5 < PIG < 2,0$ puis pollution modérée

Si $2,0 < PIG < 2,5$ puis forte pollution

2,5 puis très forte pollution (Djebassi, 2021)

II.10.2. Indice canadien de la qualité de l'eau (CCME-WQI)

L'indice de qualité de l'eau du CCME (WQI CCME) est un outil pratique pour synthétiser les données complexes sur la qualité de l'eau et faciliter leur diffusion au grand public. Les trois Éléments de l'indice sont : le domaine d'application - le nombre de paramètres qui ne respectent pas les directives sur la qualité de l'eau ; la fréquence - le nombre de fois où ces directives ne sont pas observées ; et l'ampleur - la mesure dans laquelle les directives ne sont pas rencontrées. L'indice génère un nombre allant de 0 (la qualité de l'eau est pire) à 100 (la qualité de l'eau est Meilleure). On subdivise ces chiffres en cinq catégories descriptives afin de faciliter la présentation. En 2001, WQI du CCME a été validé. WQI du CCME a été largement employé au Canada et à travers le monde depuis 2001 pour évaluer la qualité de l'eau. Plusieurs chercheurs ont Effectué de nombreux tests et évaluations de WQI du CCME au fil du temps. Ce guide de L'utilisateur a été élaboré en utilisant le travail de développement initial sur WQI du CCME et les Connaissances ajoutées depuis 2001. Deux documents du CCME sont mis à jour par le Manuel de L'utilisateur : le Rapport technique (2001) et le Manuel de l'utilisateur (2001). (St. Joseph Blvd,2001).

Calcul du CCME-WQI

Après avoir défini le type de masse d'eau, la période d'étude, les paramètres observés et les valeurs recommandées correspondantes, il faut chiffrer chacun des trois facteurs qui composent l'IQE. Le calcul de F1 et de F2 est relativement simple, mais celui de F3 nécessite quelques étapes supplémentaires. On a établi que la contribution du premier terme (F1) à la valeur de l'IQE était supérieure à celle des deux autres termes (F2 et F3). (St. Joseph Blvd, 2001)

$$F1 = \left(\frac{\text{nombre de paramètres non conformes}}{\text{nombre total de paramètres}} \right) \times 100$$

$$F2 = \left(\frac{\text{nombre de résultats non conformes}}{\text{nombre total de résultats}} \right) \times 100$$

$$F3 = \left(\frac{\text{sncé}}{0,01 \text{ sncé} + 0,01} \right)$$

$$CCME - WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

II.10.2.1. Description générale de l'indice

Le CCME-WQI repose sur la mesure de l'étendue, de la fréquence et de l'amplitude des coefficients d'écart par rapport aux valeurs recommandées (voir la section suivante). Une fois la valeur de l'IQE déterminée, on peut la classer dans une des catégories de qualité de l'eau suivantes :

Excellente : (Valeur de CCME-WQI de 95 à 100) – La qualité de l'eau est préservée, pratiquement aucune menace ni détérioration n'étant décelée; les conditions sont très proches des niveaux naturels ou originels.

Bonne : (Valeur de CCME-WQI de 80 à 94) – La qualité de l'eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineure étant observée ; les conditions s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables.

Passable : (Valeur de CCME-WQI de 65 à 79) – La qualité de l'eau est ordinairement préservée, mais elle est occasionnellement menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent parfois des niveaux naturels ou souhaitables.

Marginal : (Valeur de CCME-WQI de 45 à 64) – La qualité de l'eau est fréquemment menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent souvent des niveaux naturels ou souhaitables.

Mauvaise : (Valeur de CCME-WQI de 0 à 44) – La qualité de l'eau est presque toujours menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent généralement des niveaux naturels ou souhaitables. (Joseph Blvd ,2001)

II.11. Conclusion

Nous avons effectué des analyses physiques et chimiques au laboratoire d'ADE afin de suivre les paramètres de l'eau allouée. Pour suivre l'eau, nous avons touché à plusieurs cartes de Piper, Gibbs et Chadha pour évaluer la qualité de l'eau dans la région de Ghardaïa pour 12 forage. Nous avons également abordé l'indice porcin CCME-WQI pour évaluer la qualité des eaux souterraines allouées à la consommation humaine.

**Chapitre III : Géochimie et
processus contrôlant la chimie
des eaux souterraines**

III.1. Introduction

Le comportement chimique naturel des eaux souterraines est principalement affecté par la composition géologique de l'aquifère. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les propriétés chimiques des eaux souterraines et leur aptitude à la consommation, mieux comprendre les processus hydrogéochimiques qui contrôlent l'aquifère. Cette étude présente également la possibilité de suivre l'évaluation de l'origine minérale des eaux souterraines de 12 forages dans la région de Ghardaïa. Pour atteindre ces objectifs nous utilisons différents outils et méthodes statistiques.

III.2. Balance ionique des échantillons

La mesure de la balance ionique assure la précision des analyses réalisées au laboratoire Algérien d'analyse des eaux (ADE) et met en évidence les erreurs courantes. Les résultats des Échantillons pour la région de Ghardaïa de l'année 2023 sont présentés dans le tableau 1. Les résultats se situent toujours entre (+10 et -10), indique que les erreurs systématiques sont d'acceptable. Les échantillons caractérisés par la dominance des cations, sauf les forages 5 et 9 sont dominés par les anions

Tableau III.1. Les valeurs de balance ionique des échantillons de l'année 2023.

N	Nom	Q production (L/S)	Prof	N statique	N dynamique	BI %
1	Melika haut	27.77	394	110	114	8.83
2	Ben smara 01	19.44	490	115	119	9.78
3	Ben smara 02	23.61	500	120	125	7.26
4	TEM (RTA N° Tidhaft	26.38	510	190	194	9.30
5	Melika bas (Parc)	21.94	433	110	115	-4.59
6	Bouhraoua bas	25	450	180	185	4.06
7	Hadj Messaoud	25	500	108	112	1.83
8	Bouhraoua N°3 (Son el gaz)	13.88	470	125	129	8.16
9	HAI EL MOUJAHIDINE	18.05	500	108	111	-3.10
10	TEM 03	13.05	530	180	184	9.23
11	Baba saad	19	500	120	123	1.23
12	Bouhraoua N°5 (Chaab et Tobi)	19.44	535	160	165	3.99

III.3. La qualité organoleptique des eaux

Pour qu'une eau soit potable, elle ne doit avoir ni odeur, ni couleur, ni goût et ni saveur. Lorsque nous avons prélevé des échantillons d'eau souterraine dans la région de Ghardaïa, généralement les résultats trouvés à partir de ces échantillons est claire (sans couleur, sans saveur, et sans odeur). Cela indique que les forages étudiés ont une bonne qualité organoleptique.

III.4. Analyses statistiques des données de qualité

L'analyse statistique des données concernant la qualité des eaux souterraines en termes physico-chimiques est exposée dans le tableau VI 3 pour l'année 2023. Les eaux souterraines ont des Températures allant de 12.3 °C à 26.7 °C, avec une moyenne de 19.79°C respectivement. Le pH est compris entre 6.5 et 8.5. Ces valeurs sont répondues aux normes de qualité. Les eaux souterraines présentent une conductivité Allant de 1125 μ S/cm à 2760 μ S/cm, avec une moyenne de 2194 μ S/cm, un pourcentage de 75 % des échantillons qui dépassent la norme d'OMS. La concentration TDS varie de 984 mg/L à 1991 mg/L, avec une moyenne de 1301.2 mg/L, où 91% des échantillons dépassent la norme d'OMS .En ce qui concerne le groupe cationique, il présente une concentration de calcium allant de 104.21 mg/L à 208.41 mg/L, avec une moyenne de 163.39 mg/L qui est la plus importante dans ce groupe, où 16 % des échantillons dépassent la norme d'OMS. Il y a une Variation de 65.12 à 116.64 mg/L pour le magnésium, avec 16 % des échantillons dépassant la norme d'OMS .Le taux de sodium varié entre 100 mg/L et 325mg/L, avec une valeur Moyenne de 250.26 mg/L, un pourcentage de 75 % des échantillons supérieurs à la quantité recommandée. Le taux de potassium varié entre 8 mg/L et 15.45 mg/L, avec une moyenne de 9.710 mg/L, 16 % des échantillons supérieurs à la norme d'OMS .Il est observé ici que le magnésium et le potassium sont deux substances présentes dans les eaux souterraines à des niveaux faibles.

L'écart-type sert à déterminer la dispersion des données physico-chimique des échantillons étudiée par rapport à la moyenne. Nous observe que CE, TDS, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ et K^+ Il a des valeurs élevées de Ecart-type, indique que la présence d'une variance important des concentrations dans les échantillons observées (pas proche de la moyenne). Par contre les reste des paramètres présente des écart-types faible et proche de la moyenne indique que les concentrations dans les échantillons observées sont proches les unes des autres

Les pourcentages élevées et faibles de coefficient de variation (CV) confirme les résultats trouvée par l'Ecart-type

Tableau III .2. Données statistiques des paramètres physico-chimiques 2023.

paramètre	Norme algérienne 2011	Norme OMS 2011	min	max	Moye	Ecart-type	CV %	% d'échantillon dépasse la norme OMS
CE	2800	1500a	1125	2760	2194	424.91	19.37	75
TDS	/	1000	984	1991	1301	246.61	18.95	91
Ca^{2+}	200	75a	104.21	208.416	163.4	28.139	17.22	16
Mg^{2+}	150	100a	65.12	116.64	87.16	13.536	15.53	16
Cl^-	500	250	307.044	496.342	404.8	57.464	14.20	100
SO_4^{2-}	400	250	378.6	799.2	600.9	133.36	22.20	66
NO_3^-	50	50	27.802	30.6	28.69	1.1226	3.91	0

Na ⁺	200	60a	100	325	250.3	63.878	25.52	75
K ⁺	12	20a	8	15.45	9.711	1.9640	20.23	8
NO ₂	0-0.1	/	0	0.109	0.02	0.0395	193.38	0
T (°C)	25	/	12.3	26.7	19.79	5.8000	29.31	-
TH	200	500	600	1000	759.7	115.64	15.22	91
P			0	0.009	0.001	0.0031	282.84	0

III.5. Les faciès hydro chimiques des eaux souterraines

III.5.1. Diagramme de Piper

La figure III.1 montre que le diagramme de Piper pour les eaux souterraines de la zone d'étude (Ghardaia). Nous notons que les 12 des échantillons étudiés contiennent des taux élevés de sulfate et de chlorure (de 40 à 60 %).

le diagramme de cation montrée que pas de dominances (ou dominances clair) entre Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺+K⁺, On note également que le forages 5 contiennent un taux élevée de calcium proche de 80 % et le forages 10 contiennent un taux élevée de Na⁺+K⁺. généralement les échantillons étudié présente une facier hydrochimique dominnate de type Cl-SO₄²⁻-Ca²⁺-Mg²⁺, sauf le forrage 10 présente une facier de types Ca-Mg-Na Sodium et magnézium et calcium

Ces types montrent que les eaux souterraines présentent certaines diequilibre chimique dans la région de Ghardaïa, et on remarque que l'eau n'est pas seulement affectée par la géologie et les couches rocheuses, mais aussi par les caractéristiques de la surface terrestre et les facteurs locaux tels que la thermodynamique qui se forment les couches rocheuses.

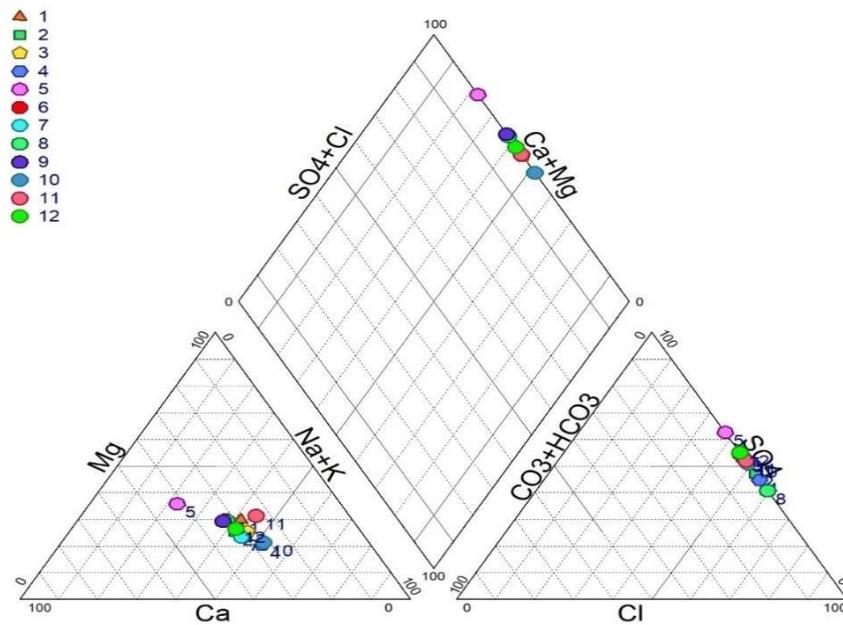


Figure III.1. Diagramme de Piper illustre la classification des eaux souterraines

III.5.2 Diagramme de Gibbs

Nous avons utilisé le diagramme de Gibbs pour classer la relation entre les propriétés lithologiques des aquifères il est divisé en trois groupes : dominance de l'évaporation, dominance d'altération de roche et dominance des précipitations. La figure III.2 montrée que $(Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-))$ et $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$ en termes de TDS, nous observons que les échantillons présente dans la zone de dominance d'évaporation

Les concentrations des ions dans les échantillons étudiées proviennent de deux sources, la dissolution (écoulement des eaux et érosion chimique) ou l'évaporation. Apes les résultats de diagramme de Gibbs le corps de ces eaux est jeune ; parce que la précipitation provient après saturation (les échantillons pas encore atteignent la saturation).

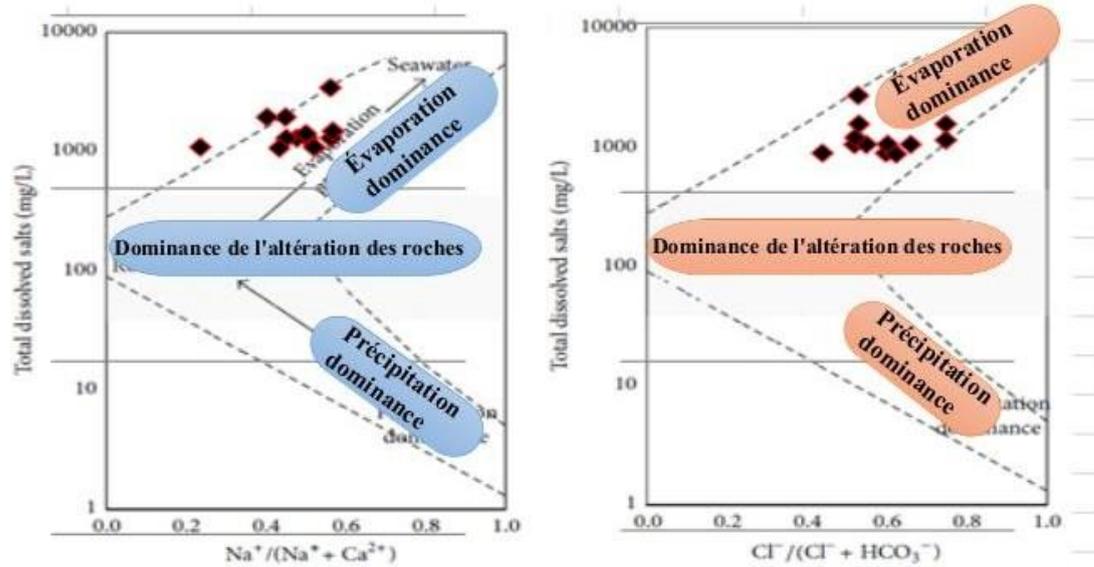


Figure III.2. Diagramme de Gibbs illustre la classification des eaux souterraines.

III.5.3 Diagramme de Chadha

Le diagramme de Chadha se compose de quatre zones qui représentent quatre types de processus hydro chimiques. La figure III. 3 détermine le faciès hydro chimique de 12 échantillons d'eaux souterraines dans la région de Ghardaïa.

Nous notons que tous les échantillons sont concentrés dans le champ de dominance de type de Ca-Mg-Cl, Ce champ indique des processus d'échange d'ions inverse. Dans cette zone, les anions acides forts (Cl^- et SO_4^{2-}) dépassent les acides anions faibles (HCO_3^-) et les ions alcalins (Ca^{2+} et Mg^{2+}) contournent les alcalis (Na^+ et K^+). D'autre part les deux forages 4 et 10 sont dominés par le type (Na-Cl), caractérisées par la dominance des acides forts (Cl^- et SO_4^{2-}) et les alcalis (Na^+ et K^+)

Les résultats du diagramme de Chadha corroborent les résultats obtenus du diagramme de Piper qui donnent les mêmes faciès hydro chimiques des eaux souterraines

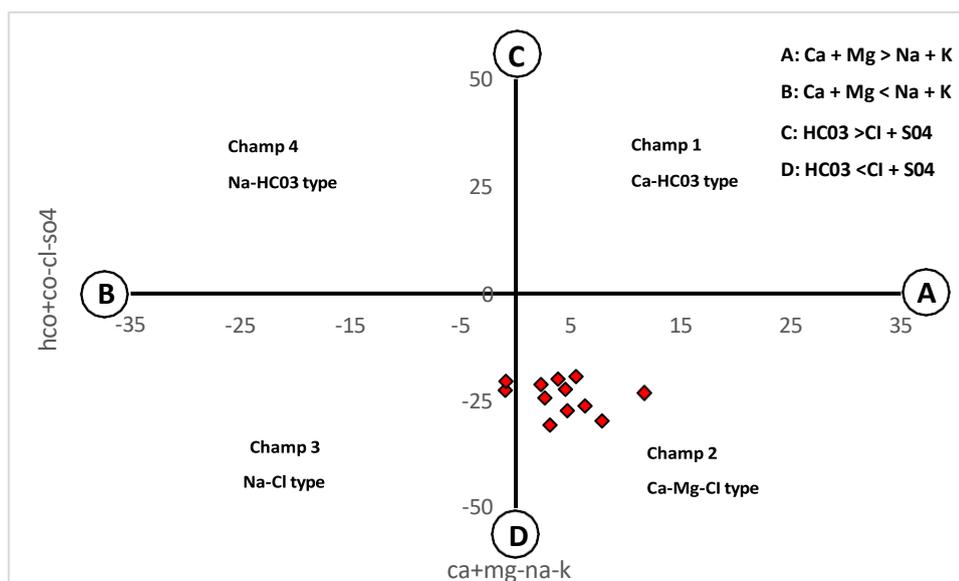


Figure III.3. Diagramme de Chadha illustre la classification des eaux souterraines.

III.6. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques

Le coefficient de corrélation (R) est un indicateur numérique de la relation entre deux variables. Il mesure la force de la relation linéaire entre ces variables. Le coefficient de corrélation entre x et y s'exprime par:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Comme le montre dans le tableau III 3. Nous notons que la CE a une corrélation inverse avec TH. Nous notons que TDS a des corrélations positives avec Cl^- (0.61) et Na^{2+} (0.65), indique que la contribution de salinité. On note que le calcium a des fortes corrélations avec le Cl^- (0.62), SO_4^{2-} (0.70) et O_2 (0.85), et corrélation inverse avec NO_3^- (-0.81) et T (-0.75), cette corrélation indique la dissolution de gypse et l'Anhydrite. Le Mg^{2+} présente une forte corrélation avec Cl^- (0.52) et Turbidité (0.80) et corrélation inverse avec NO_3^- (-0.82) et TH (-0.84)

Le Cl^- présente une forte corrélation avec Na^+ (0.66) et O_2 (0.53) et corrélation inverse avec NO_3^- , K^+ et P. le SO_4^{2-} prend une corrélation inverse avec T (-0.90) et forte corrélation avec la salinité (0.59) et O_2 (0.75) ; indique que les ions de Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} est responsable à l'augmentation de salinité. Le Na^+ présente une forte corrélation avec NO_2^- et prend une corrélation inverse avec K^+ et Fe^{2+} et P les nitrates présente une forte corrélation avec Na^+ et K^+ et une corrélation inverse avec T (-0.67) et TH (-0.98). Le Fer présente une forte corrélation avec P (0.99) et turbidité (0.54). Le P présente une forte corrélation avec turbidité (0.75) et corrélation inverse avec salinité (-0.80). Donc la turbidité est affectée par le Fer et P.

Tableau III 3. Matrice de corrélation de principaux paramètres physico-chimiques.

	CE	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	Na	K	NO ₂	Fe	T (°C)	TH	P	Sal	TAC	Turb	O ₂
CE	1																	
TDS	-0.29	1.00																
Ca ²⁺	-0.23	0.13	1.00															
Mg ²⁺	0.30	0.15	0.45	1.00														
Cl ⁻	-0.28	0.61	0.62	0.52	1.00													
SO ₄ ⁻²	-0.01	-0.03	0.70	0.49	0.42	1.00												
NO ₃ ⁻	-0.21	-0.07	-0.81	-0.82	-0.51	0.19	1.00											
Na	-0.10	0.65	0.17	0.36	0.66	0.08	0.50	1.00										
K	0.00	-0.42	0.06	-0.19	-0.62	0.09	0.95	-0.68	1.00									
NO ₂	0.33	0.58	0.34	0.99	0.56	0.52	/	0.60	-0.29	1.00								
Fe	0.06	-0.41	0.20	0.09	-0.49	0.25	0.10	-0.69	0.90	-0.06	1.00							
T	0.04	0.06	-0.75	-0.44	-0.42	-0.90	-0.67	-0.03	-0.04	-0.32	-0.22	1.00						
TH	-0.50	-0.18	0.05	-0.84	-0.22	-0.08	-0.98	-0.38	0.19	-0.92	0.01	-0.04	1.00					
P	0.07	-0.43	0.23	0.19	-0.61	0.37	/	-0.81	0.92	-0.54	0.99	-0.36	0.26	1.00				
Sal	0.01	0.17	0.27	0.28	0.30	0.59	0.32	0.46	-0.27	0.52	-0.14	-0.47	-0.15	-0.80	1.00			
TAC	-0.22	-0.07	-0.50	-0.02	-0.02	-0.10	0.77	0.01	-0.39	0.01	-0.26	0.16	-0.10	-0.27	0.11	1.00		
Turb	0.34	-0.12	0.45	0.80	0.13	0.44	-0.49	-0.01	0.25	0.81	0.54	-0.31	-0.67	0.75	0.22	-0.20	1.00	
O ₂	-0.16	0.38	0.85	0.25	0.53	0.75	/	0.33	0.03	0.15	-0.04	-0.90	0.11	0.01	0.35	-0.79	0.14	1.00

III.7. Processus hydro chimiques et origine de minéralisation

Les concentrations d'ions sont contrôlées par les interactions qui se produisent entre de nombreux ions et divers facteurs, à mesure que les eaux souterraines se déplacent à travers des formations sédimentaires telles que l'argile, le sable et le gravier.

La figure III. 4a représente l'effet des ions Ca²⁺ sur Mg²⁺ en termes de CE, ainsi que des ions SO₄⁻² sur Cl⁻ en termes de CE dans les eaux souterraines. L'effet des ions Ca²⁺ sur les ions Mg²⁺ peut être complexe et affecté par plusieurs facteurs tels que le pH et la concentration des autres ions, les ions Ca²⁺ sont plus grands en Mg²⁺. Par conséquent, les ions Mg²⁺ peuvent être substitués dans les sites actifs. Cette réaction peut affecter la conductivité électrique de la solution et peut apparaître dans les sédiments ou les dépôts d'argile.

Lorsqu'il y a des ions SO₄⁻² dans les eaux souterraines, un effet peut se produire sur les ions Cl⁻ en raison de réactions chimiques. Par exemple, une réaction d'échange d'ions peut se produire entre eux, car les ions peuvent s'échanger entre eux dans la solution. À une augmentation de la concentration de certains ions et une diminution de la concentration d'autres, ce qui affecte le CE des eaux souterraines. Cependant, cet effet est affecté par les conditions chimiques et physiques, en particulier dans les eaux souterraines.

- La figure III.4(b) Na et Cl⁻ sont généralement les ions les plus courants dans les eaux souterraines. Lorsque Na est présent en grande quantité dans les eaux souterraines, cela affecte la concentration de Cl⁻ et donc l'eau. L'effet de Na sur Cl⁻ est léger. Na²⁺ peut entrer en compétition avec Cl⁻ pour les sites actifs du chlorure, ce qui entraîne une diminution de la concentration de Cl⁻ et une modification de la répartition des charges électriques. C'est ce que nous appelons le flux inverse d'eau salée.

- La figure 4 (d) Lorsque les ions Ca²⁺, Mg²⁺ et SO₄²⁻ sont présents dans les eaux souterraines, une réaction d'échange d'ions peut se produire entre eux. Les ions Ca²⁺ et Na peuvent s'échanger avec les ions SO₄²⁻, ce qui conduit à la formation de nouveaux composés tels que le sulfate de calcium et le sulfate de magnésium. Peut entraîner une augmentation de la concentration de certains ions et une diminution de la concentration d'autres dans la solution des eaux souterraines

La figure III.4c Plusieurs facteurs affecte la concentration de calcium et la concentration de magnésium en termes de forage, notamment les propriétés physiques et chimiques du sol. La composition du sol et ses propriétés physiques et chimiques peuvent affecter la façon dont le calcium et le magnésium sont absorbés et distribués dans le puits. Le pourcentage de calcium et de magnésium peut varier dans la source d'eau (comme les puits) en fonction de la topographie et de la géologie locales. Cela peut également être dû à des facteurs environnementaux et chimiques liés au sol, à la source d'eau et à l'environnement. Environnement

- La figure III.5(d) Plusieurs facteurs affectent la concentration de Ca²⁺ et de Mg²⁺ en fonction du Cl⁻, notamment le type de source d'eau, qu'il s'agisse d'eau du robinet ordinaire ou d'eau souterraine, peut affecter la concentration de Cl⁻, et donc la concentration de Ca²⁺ et de Mg²⁺. Cela peut inclure les processus de traitement de l'eau et l'activité bactérienne. Les activités biologiques dans l'eau peuvent augmenter, comme la croissance de bactéries, et cela est possible en raison de l'alimentation agricole, qui contient l'eau utilisée pour irriguer les cultures agricoles sur des matériaux tels que les engrais qui peut affecter la concentration de Cl⁻, et son effet sur la concentration de Ca²⁺ et de Mg²⁺

- La figure III.5 (e,f) L'indication de la conductivité électrique dans les eaux souterraines est liée à la concentration d'ions SO₄²⁻ et d'ions Cl⁻ qu'elles contiennent. Habituellement, la quantité d'ions dans les eaux souterraines est égale à celle d'autres solutions. Cependant, elle peut être affectée par des facteurs tels que le débit de l'eau et son environnement. Sol. S'il y a une augmentation de la concentration de SO₄²⁻ et de Cl⁻ dans les eaux souterraines, il est probable qu'elle augmente. C'est une indication de la conductivité électrique. L'importance de la conductivité électrique augmente avec l'augmentation de la concentration d'ions SO₄²⁻ et d'ions Cl⁻ dans la solution. Les deux ions contribuent à augmenter la force de la conductivité électrique de la solution, car chacun d'eux porte une charge négative.

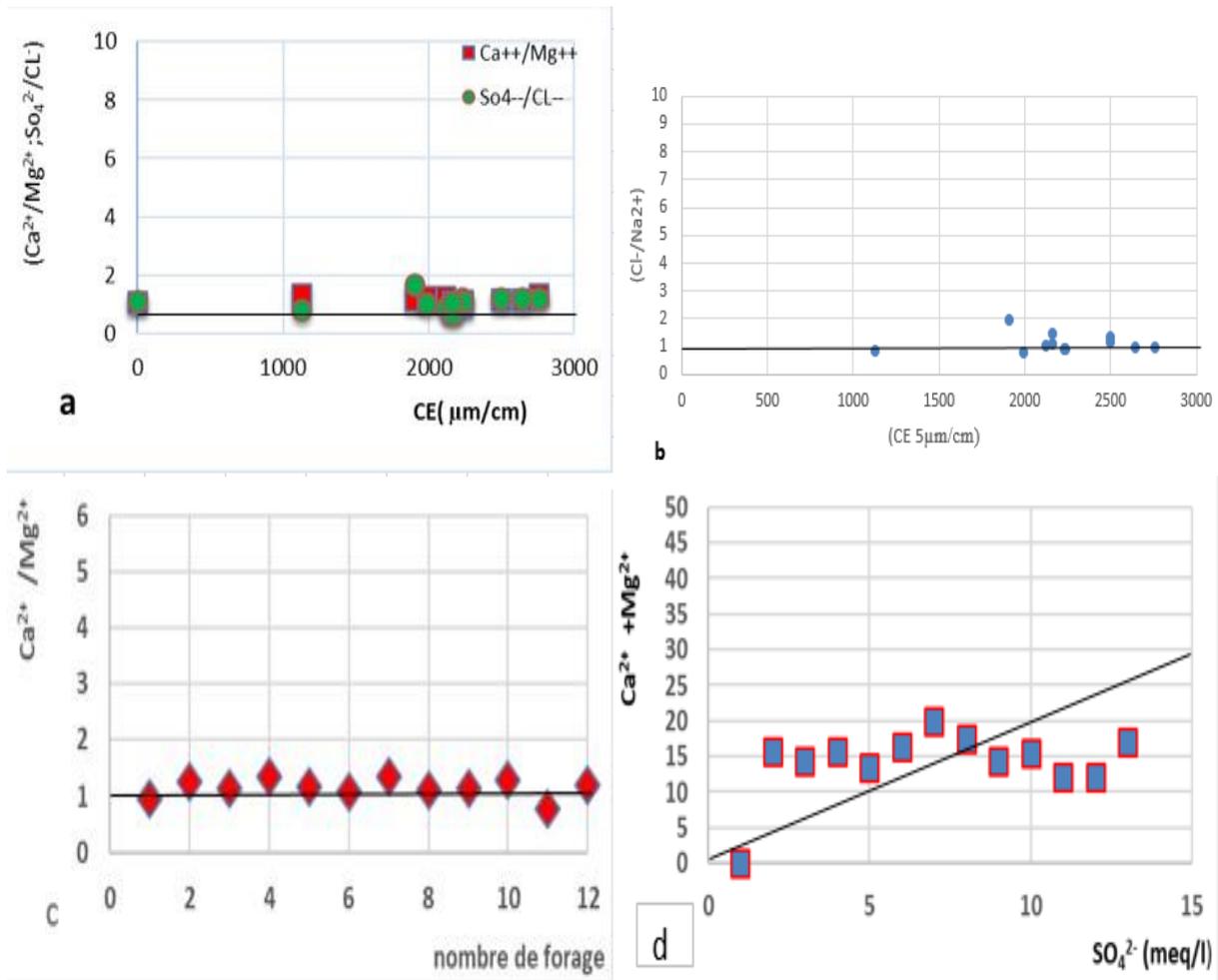


Figure III.4. Graphes bivariés : CE vs (Ca^{2+}/Mg^{2+}) et (SO_4^{2-}/Cl^-) .: CE vs (Cl^-/Na^+) vs. (sous Na^+ réactions d'échange avec Ca^{2+}/Mg^{2+} dans le nombre de forage). : $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ vs so_4^{2-}

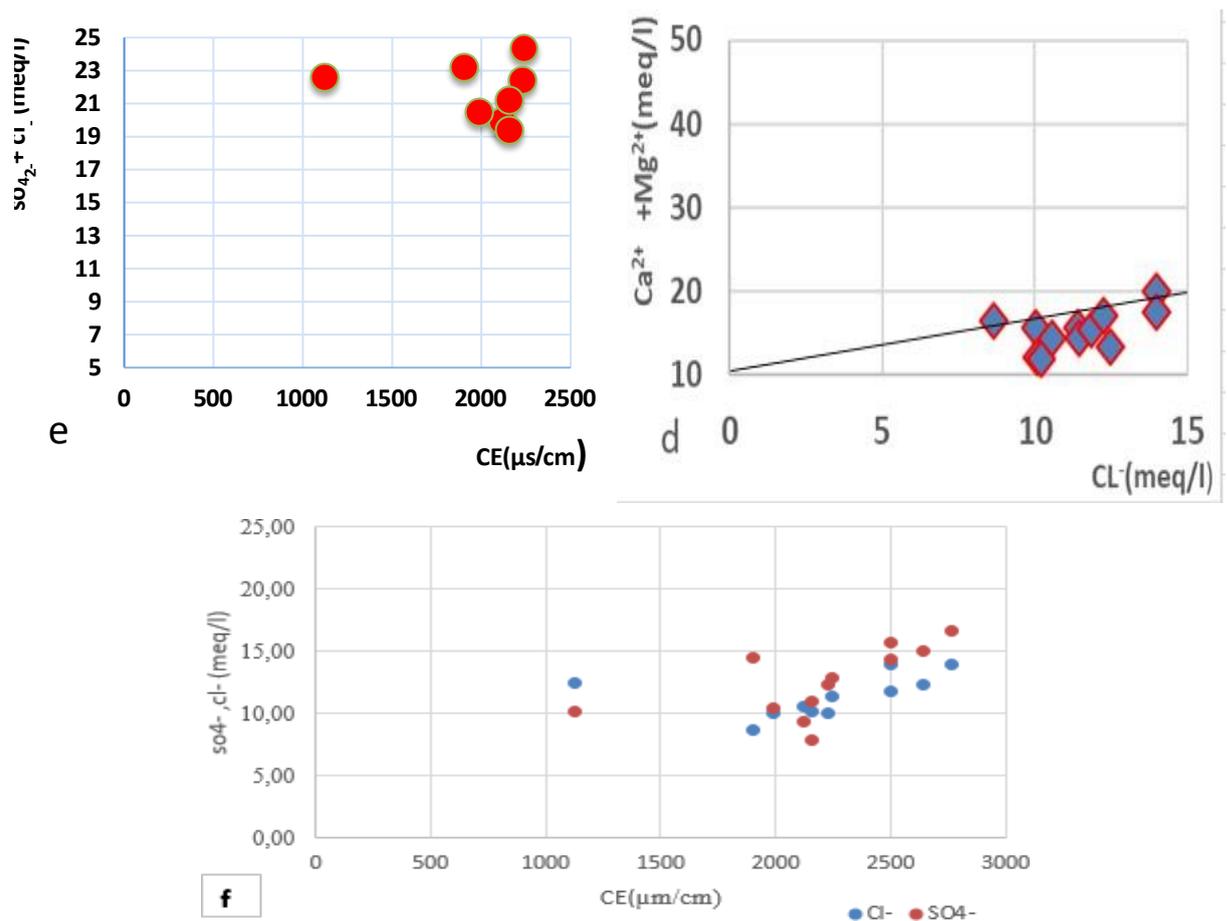


Figure III. 5. Graphes bivariés de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{Cl}^-$ CE contre $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ et $(\text{SO}_4^{2-}, \text{Cl}^-)$

III.8. Concluions

Dans ce chapitre, nous avons étudié les analyses physiques et chimiques des eaux souterraines dans la région de Ghardaïa. Pour déterminer l'origine minérale des eaux souterraines, nous avons utilisé plusieurs graphiques, dont Piper, Chadha et Gibbs. Diverses méthodes, notamment la relation entre les paramètres physiques et chimiques. et les graphiques, semblent appartenir à deux aspects chimiques dominants, le faciès chlorure de calcium et sulfate de calcium.

Chapitre IV : Prédiction et classification de qualité des eaux souterraines

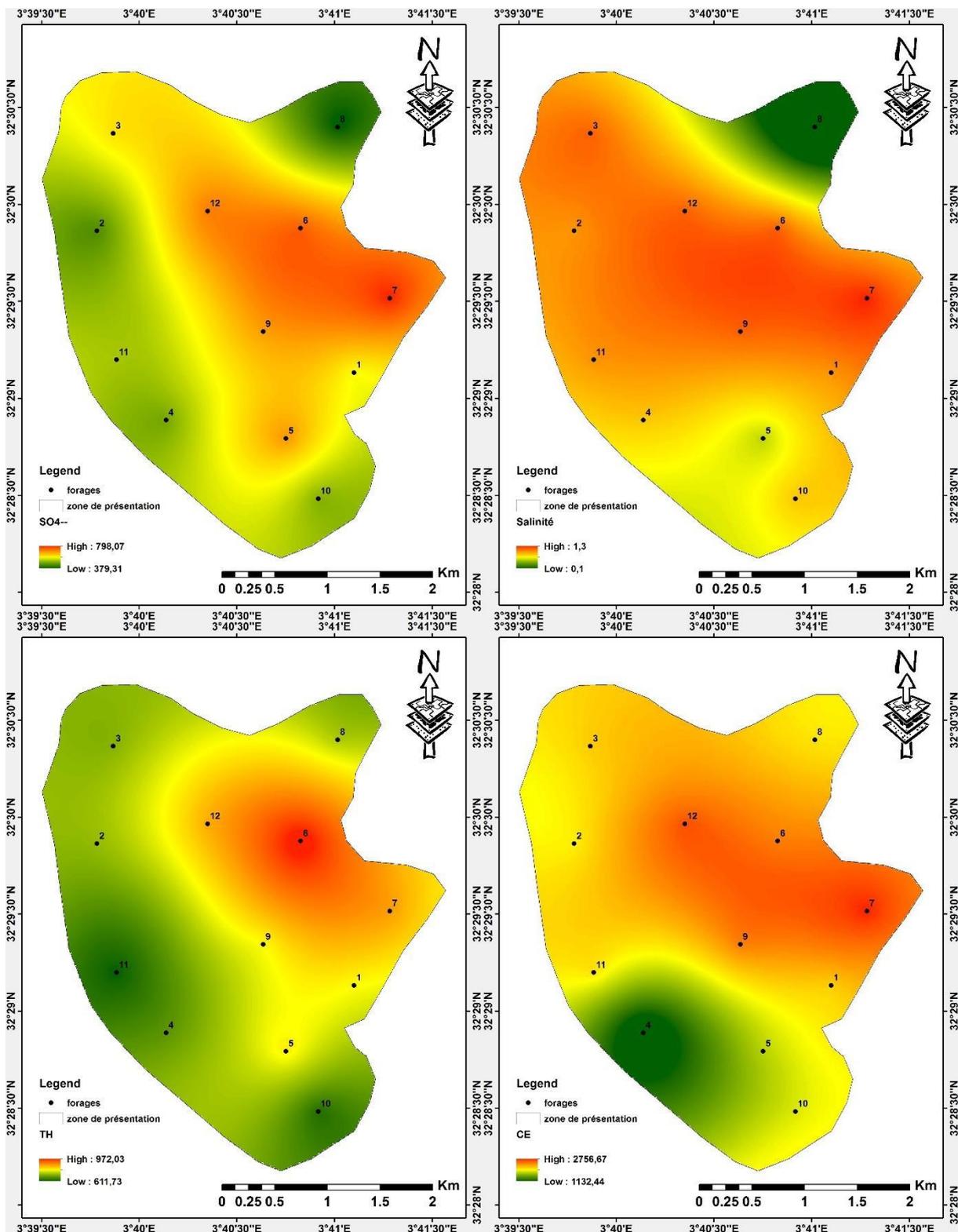
IV.1. Introduction

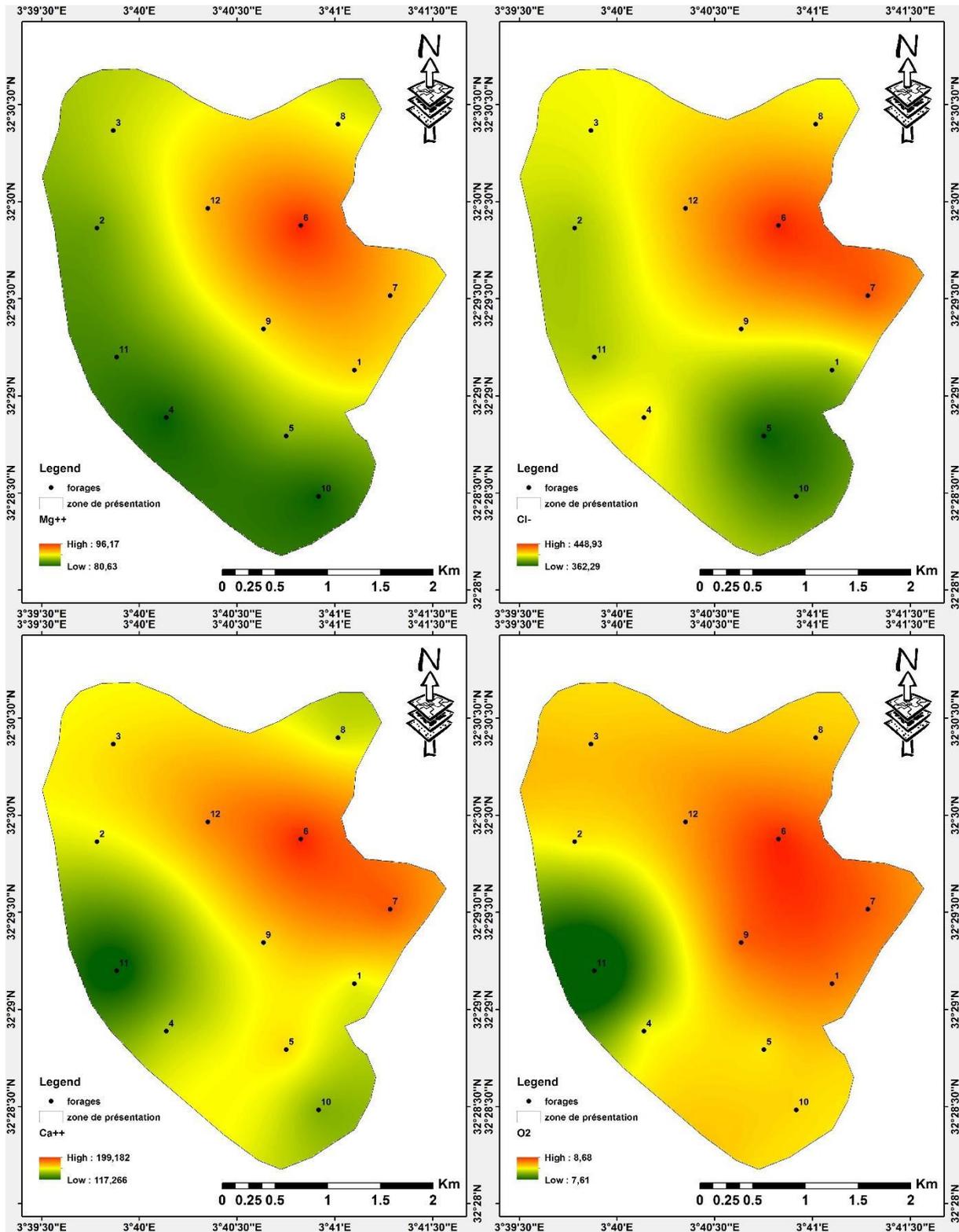
Il est possible que la qualité des eaux souterraines change et soit affectée par les changements qui se produisent dans les couches souterraines, et cela peut être dû au changement climatique et aux êtres humains.

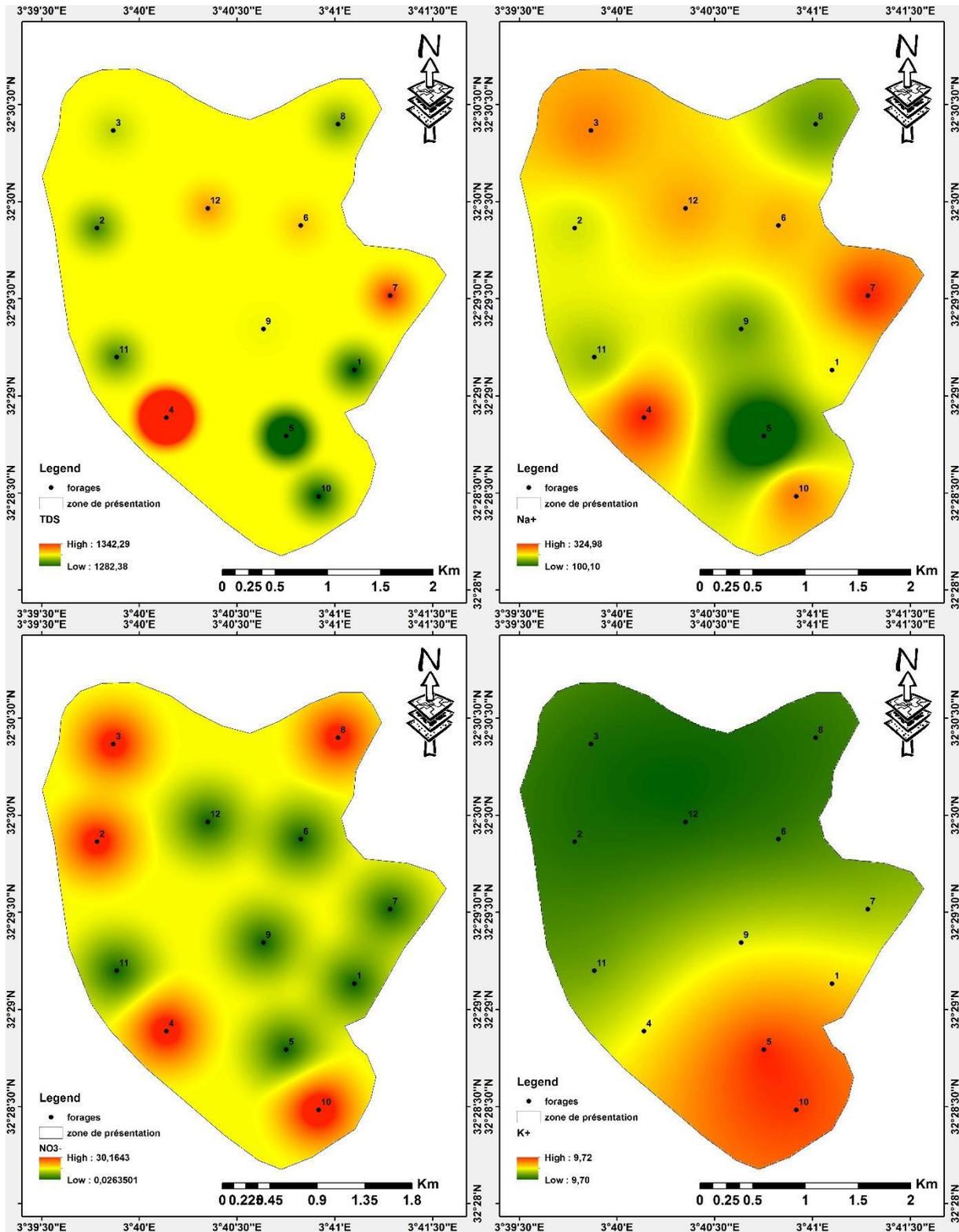
Afin d'évaluer la qualité de l'eau dans la zone d'étude, Des prédictions spatiales de divers paramètres physiques et chimiques ont été utilisées pour déterminer la variation spatiale des concentrations et ses causes. en utilisant le krigeage ordinaire; Dans ce chapitre, nous avons abordé également l'évaluation de l'eau souterraine et sa consommation, à l'aide de plusieurs types d'indices (CCME-WQL.PIG). Et présenté géographiquement la qualité globale des échantillons étudiée à l'aide de la méthode IDW.

IV.2. Interpolation spatiale des paramètres par le krigeage ordinaire

La figure IV représenté l'interpolation spatiale par krigeage ordinaire de 12 échantillons prélevés dans les aquifère des concentrations des principaux paramètres L'interpolation spatiale par krigeage ordinaire des concentrations des principaux paramètres est représentée sur la figure IV 1. SO_4^{2-} , TH, CE, Mg^{2+} , Cl, Ca^{2+} et O_2 prendre des distributions similaires ils présentent des concentrations élevées au nord-est (couleur vert) de la région d'étude spécialement dans les forages 1, 5, 6, 7, 9 et 12, et nous observe des faibles concentrations au sud West (couleur orange). Cette interpolation spatiale montrée que la même origine de minéralisation carbonatée (Anhydrite, Aragonite, Calcite, dolomite et Gypsum). L'interpolation spatiale des concentrations de TDS présente des teneurs élevée dans les forages 4, 7 et 12 et des teneurs faible dans les forages 1, 2, 5, 10 et 11, le reste de la zone d'étude présente des concentrations moyenne. Les concentrations de Na sont élevées presque dans tous les forages étudiés. Sauf les forages 2,5,8 et 9 sont faible concentration. Les concentrations de K sont élevées au sud (couleur orange)(dépassent normes d'eau potable) spécialement dans les forages 1,4,5 et 10. La Turbidité et le fer présente des interpolations spatiale similaires fortes concentrations dans les forages 2, 4 et 7 et le reste zone d'étude présente des faibles concentrations, indique le fer est un facteur influencé sur la turbidité







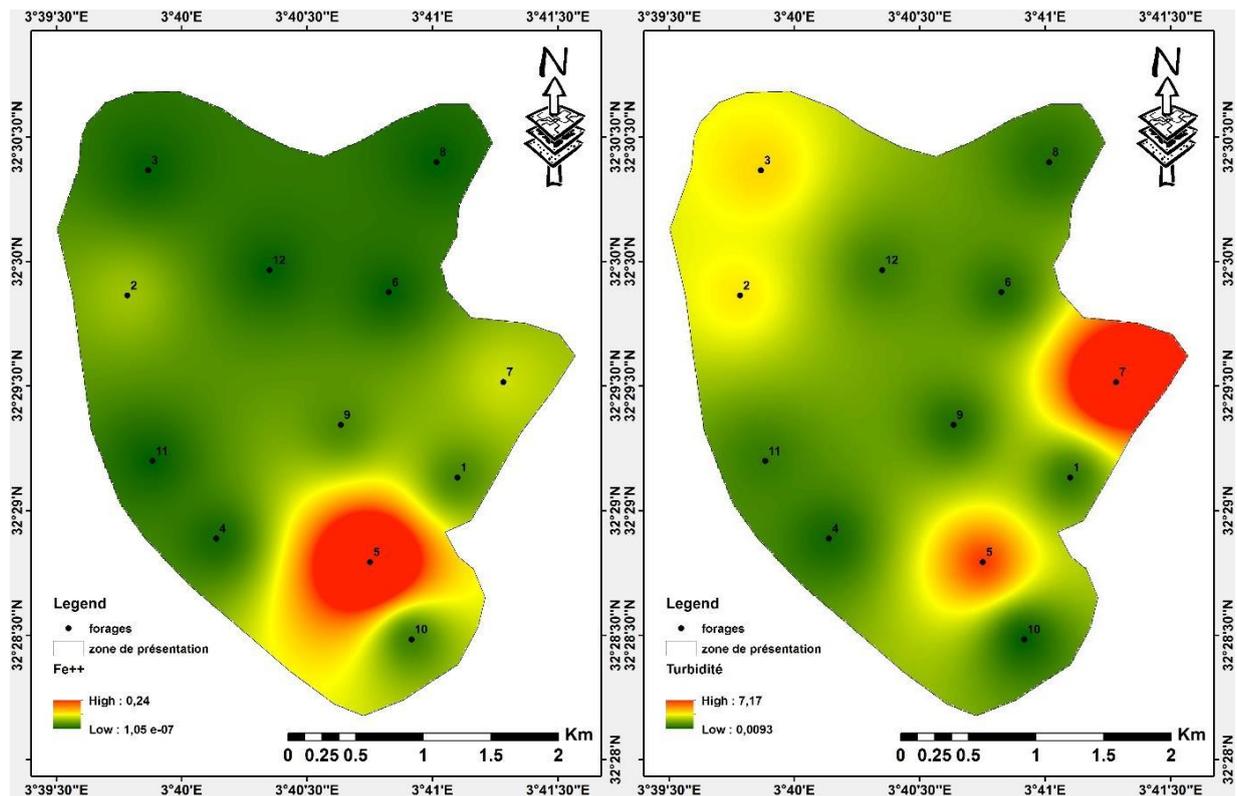


Figure IV 1. Cartes d'interpolation spatiale des principaux paramètres physico-chimique par méthode de krigeage ordinaire

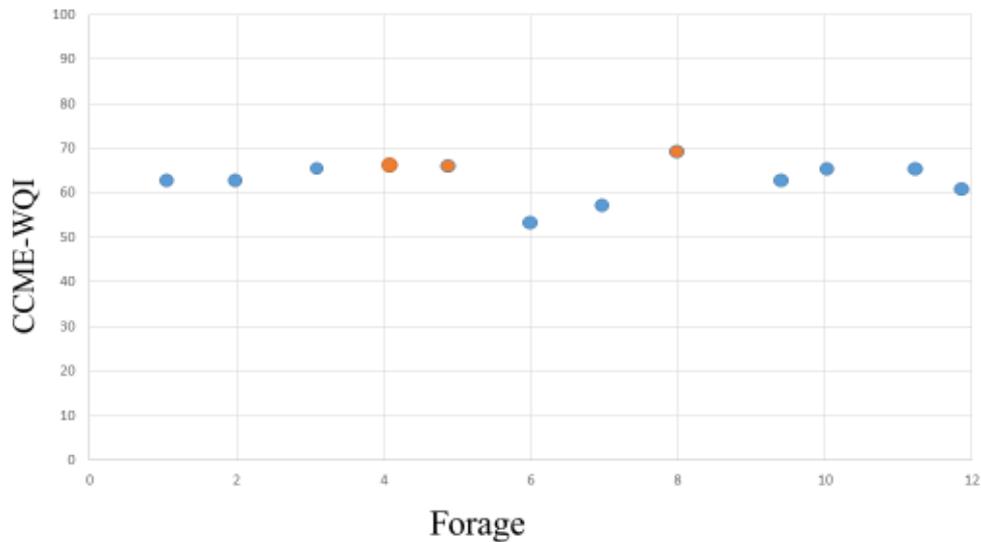
IV.3. Indices d'évaluation de qualité d'eau

IV.3.1. Indice canadien de la qualité d'eau (CCME-WQI)

L'indice canadien de la qualité d'eau (CCME-WQI) est utilisé pour évaluer la qualité globale des eaux souterraines de 12 forages étudiée dans la région de Ghardaïa. Nous avons rassemblé tous les paramètres physico-chimiques mesurés.

Les résultats ont montré une augmentation du pourcentage de solides dissous $TDS.ca^{2+}so_4^{2-}Cl^-Na^{2+}$. Cela a affecté les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (CCME-WQI), comme le montre la figure IV. 2, qui se situaient entre (54 et 70) ; Ceci nous montre que 73% des échantillons d'eau sont de type passable sauf les échantillons n 6 et 7 (0 et 40) d'eau sont des types mauvaise

Généralement la qualité des eaux souterraine étudiée sont moyenne et acceptable à la consommation



FigureIV. 2. L'indice canadien des eaux (CCME-WQI)

IV.3.2. Indices d'évaluation de qualité d'eau PIG

Les eaux souterraines sont considérées comme l'une des ressources naturelles les plus précieuses. Pour connaître ou déterminer la qualité de l'eau dans la région de Ghardaïa, nous utilisons l'indice de pollution des eaux souterraines PIG, qui permet de mesurer l'ampleur de la pollution. Interaction entre les paramètres de qualité de l'eau et la qualité globale de l'eau dans l'aquifère souterrain.

La figure 1 représente l'indice de pollution des eaux souterraines du PIG. On note que la plupart des échantillons 1.2.3. 4. 5. 8. 9. 10. 11. 12 contiennent une faible contamination, tandis que l'échantillon n°6 et 7 contient une contamination sévère. Cela est principalement dû à la géologie. Et facteurs humains

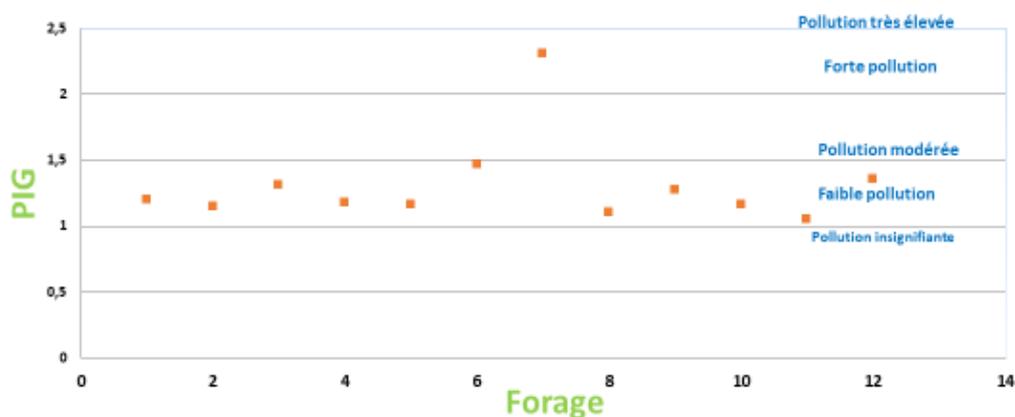


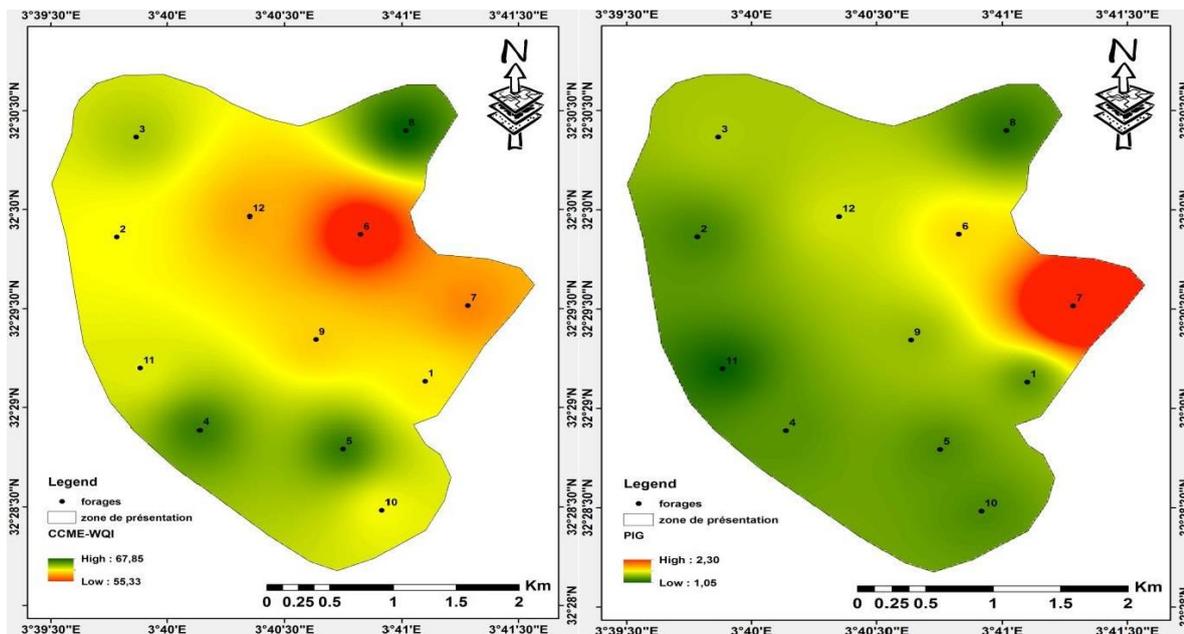
Figure IV. 3. L'indice de pollution représentant le niveau de contamination des eaux souterraines.

Comme le montre la figure IV. 3, on constate que la majorité des échantillons 85% sont faibles contaminations, sont confinés entre $1,0 < PIG < 1,5$. Sauf l'échantillon 7 est fortement pollué.

V.4. présentation géographique de la qualité globale des échantillons étudiée

La figure IIV4 montre la répartition spatiale des valeurs de l'indice de qualité des eaux souterraines (CCME-WQI) et l'indices (PIG). Dans la répartition spatiale de l'indice (PIG), il existe une grave pollution à l'est dans les forages 7 et 6. Ceci est dû principalement à des facteurs géologiques et humains. D'autre part le reste zone est caractérisé par faible pollution

Quant à l'indice CCME-WQI, les résultats de l'indices montré que les catégories d'eaux souterraines dominantes dans la région est marginal. Sauf les forages 6, 7, 12 sont de type fair. et cette détérioration de la qualité de l'eau reflète la nature de la tectonique géologique à travers laquelle l'eau passe. La conclusion est que les deux indices donnés des résultats similaires, et la qualité des eaux souterraines se situent entre moyenne et mauvaise



V.4. Conclusion

Les résultats obtenus à l'aide de l'indice des eaux souterraines CCME-WQI, de l'indice de pollution des eaux souterraines PIG et de la krigeage ordinaire ont montré dans ce chapitre que les échantillons d'eau de la région de Ghardaïa ont montré que toutes les eaux souterraines étudiées étaient de qualité modérée sauf les échantillons n 6 et 7 pour la consommation humaine.

Conclusion général

Conclusion général

Conclusion général

Dans cette étude, nous avons prélevé 12 échantillons provenant de différents forages d'eau dans plusieurs endroits de la région de Ghardaïa. Située au cœur du désert en Algérie. Nous avons présenté des analyses physiques et chimiques au niveau de laboratoire de l'Unité de l'ADE en 2023

Les résultats des analyses effectuées révèlent que les paramètres physiques étaient caractérisés par de fortes concentrations de TDS, de CE. Ils sont apparus que les ions de NO_3^- , Mg^{2+} , K^+ , Fe^+ et P se caractérisent par de faibles concentrations et ne dépassent pas les normes de l'OMS, mais les concentrations des éléments Ca^{2+} , TH, Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} sont élevées et dépassent les normes de l'OMS.

Le faciès hydrochimique dominant des échantillons étudiés est de type Cl-NA^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} . Les processus hydrochimiques contrôlant la chimie des eaux souterraines sont la dissolution et les précipitations des minéraux carbonatés et sulfatés (calcite, dolomite, aragonite, gypse et anhydrite). Quelques échantillons prennent une tendance vers la salinité. Généralement le corps de ces eaux est jeune ; car ils n'ont pas encore atteint la saturation.

Quant à l'évaluation de la qualité des eaux dans la région de Ghardaïa à l'aide de l'indice CCME-WQI et l'indice PIG, nous constatons que la qualité de l'eau peut varier d'un forage à l'autre, car il ressort des résultats en deux catégories : une catégorie passable (faible pollution) dans les forages 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11 et 12 à l'ouest de la région d'étude et une catégorie Marginal dans les forages 6 et 7 à l'ouest de la région d'étude. Cette classification est affectée par la formation géologique et le contact eau-roche.

L'interpolation spatiale par krigeage des paramètres physico-chimiques et la présentation géographique des indices de qualité confirment que la qualité globale des eaux souterraines est affectée principalement par la géochimie de l'aquifère et le contact eau-roche.

Enfin, on peut dire que les eaux souterraines de la région de Ghardaïa sont classées comme eaux acceptables pour la consommation humaine, mais il est nécessaire d'améliorer leur type et leur qualité à l'aide de techniques de traitement appropriées.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ACHOUR M., (2014).Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride: cas de la vallée du Mزاب (Ghardaia-Algérie)," Université Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2, 2014

ALIOUA Y & BOSMANS R, (2020), *Poecilochroa senilis* (O. Pickard-Cambridge, 1872) (Araneae: Gnaphosidae) recorded for the first time in Algeria and Morocco

ALIOUA Y, BEN BELHOUT Y, HACINI M, HADJ MAHAMED A, (2022), *Menemerus soldani* (Audouin, 1826) (Araneae: Salticidae) newly recorded in Algeria with the proposition of a new synonym, *Arachnology* 19 (1), 28–30.

ALIOUA Y, BISSATI S, KHERBOUCHE O & BOSMANS R,(2016) „Spiders of Sebket El Melah (Northern Sahara, Algeria): Review and new records, *Serket* vol. 15(1): 33-40.

ALIOUA Y, BOSMANS B, 2022., First record of the genus *Nita* Huber & El-Hennawy, 2007(Araneae: Pholcidae) from Algeria, *Serket* ,vol. 18(3): 282-286.

ALIOUA Y, BOSMANS Y, KHERBOUCHE & BISSATI S, 2020, Distribution of the genus *Larinia* in the Maghreb, with the first record of *Larinia chloris* in Algeria (Araneae:Araneidae), *Arachnologische Mitteilungen / Arachnology Letters* 59 : 1-4 Karlsruhe.

B. Hasnia, (2018)"Chimie des eaux,"

B. Zineddine, Z. Mehdadi, H. Benhassaini, and L. J. R. L. Hamel,(2015) "lutte contre la dégradation de la qualité des eaux de boisson au niveau du réseau de distribution . cas de la source ain skhouna de sida li ben youb . (w. desidi bel abbes)," 2015.

Brahim ben yocef, 1991 in bichi et la 2006) les pucerons dans la région de Ghardaïa en Algérie : biodiversité et importance dans un champ de fève (*vicia faba* L.) mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master académique en sciences agronomiques 2013 université de Ghardaïa

DAJOZ R., 1971– Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 434 p

Djebrithizia ,Khamedfatima , (KADI et KORICHI, 1993) etude des rongeurs de la wilaya ghardaia/ el mènèa MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme d master en sciences agronomiques 2022.

Djebrithizia ,Khamedfatima , 2022 etude des rongeurs de la wilaya ghardaia/ el mènèa MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme d master en sciences agronomiques.

Références bibliographiques

DJENBA S, BOUDOUKHA A. , BENCER S. APPROCHE HYDROCHIMIQUE DE L'AQUIFERE SUPERFICIEL DE AIN DJACER. EST ALGERIEN, Département des Sciences de la Terre. Université de Batna 2.

F. Menet-Nedelec and A. Grouhel-Pellouin, 2019 "Evaluation de l'état chimique DCE des masses d'eau littorales du bassin Seine-Normandie,"

J.Rodier,B.Legube,andN.Merlet,2011 "L'analyse de l'eau"DunodParis,"ed,2009.

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N 1818 Rab hie Ethnie 1432..

Kouassi, A. Mamadou, K. E. Ahoussi, and J. J. R. I. d. S. e. T. Biemi, 2013 "Simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines en relation avec leurs propriétés géologiques: cas de la Côte d'Ivoire," vol. 21, pp. 138-166

M. MURHULA ,2019 Succès M. KUTANGILA, Espoir M. BIRHENJIRA, Séverin K. MUYISA Hydrogéochimie et susceptibilité à la contamination des eaux souterraines dans le secteur de Panzi, ville de Bukavu, RD Congo

Manuel des analyses physico-chimique des eaux de boisson, LABORATOIRES DE L'ADE DE GHARDAIA ".

MOULAY OMAR Hamida & BENHAMADI Ryma 2020 contribution de la géomatique à des indices de la qualité des eaux de la nappe albienne dans la région de Ghardaia , Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master Faculté des Sciences et de la Technologie université de Ghardaia p 23 p25

NIREF /monographie de la wilaya de Ghardaia CNAM CGP113 2009 2010

OSS (2003b):Système Aquifère du Sahara Septentrional. Volume 4 : Modèle Mathématique. Projet SASS ; Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p

OULD BABA SY M., (2005):Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional , Thèse de doctorat de Doctorat , faculté des sciences de tunis ,p 172

OZENDA P., (1983) -Flore du Sahara. Ed. Centre nati. Rech. Sci. (C.N.R.S.), paris, 622 p.

ROUARI Abdelmalek 2018 Modélisation de la variabilité spatiale de quelques propriétés du sol dans la région de Ghardaïa (cas de Hassi F'Hel) Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre Département de Biologie Université de Ghardaïa 2018.

Références bibliographiques

S. ZEREG, 2019 "Impacts de l'irrigation sur la qualité des eaux souterraines des régions semi-arides. Cas de la région de Tébesa," Université de Batna septentrional. Thèse de doctorat, faculté des sciences de Tunis, 271p.

Sophie Baillargeon, 2005 Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations Mémoire présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval 2005

St. Joseph Blvd, 2001 Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Technical Report Canadian Environmental Quality Guidelines, Canada.

STEWART P., 1969- Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. Bull the genus *Larinia* in the Maghreb, with the first record of *Lariniachloris* in Algeria the proposition of a new synonym, *Serket*, vol. 17(2): 121-126

T. Djebassi, I. Abdeslam, Ch. Fehdi 2021 Groundwater quality assessment, using pollution index of groundwater (PIG) from a semi-arid basin, Tebesa region (north-east of Algeria) *Journal of Materials and Environmental Science* Vol 12 University of Mohammed Premier Oujda Morocco

the proposition of a new synonym, *Serket*, vol. 17(2): 121-126.

Y. K. S. Aristide, "Caractérisation Physico-Chimique Des Eaux De Surface Dans Un Environnement Minier Du Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire: Cas Du Département De Divo.

ZOUIDJA Hadjer HEMAZA Marwa 2022 Etude de qualité des eaux de consommation de la région de Ghardaïa Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master Faculté des Sciences et Technologies Université de Ghardaïa

Web scientifiques :

<https://pro.arcgis.com> .28/05/2024 ,13 ;00)

<https://ar.WIKIPEDIA.Org/WIKI/wilaya> de ghardaia

Faculté des sciences et de la
technologie
Département d'Hydraulique et
Génie Civil

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الري والهندسة المدنية

ترخيص بإيداع مذكرة الماستر

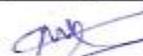
بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف:

الطالب(ة): مصاطفي إيمان

الشعبة: ري

التخصص: ري حضري

نحن الأساتذة:

الإمضاء	الصفة	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الإسم واللقب
	رئيس	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	شبيحي لخضر
	ممتحن	أستاذ محاضر أ (جامعة غرداية)	بويلي سليم
	مؤطر	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	سلمان الطاهر
	مؤطر مساعد	أستاذ محاضر ب (جامعة غرداية)	لشهب السنة

نرخص بإيداع النسخة النهائية لمذكرة الماستر بعنوان:

Origine chimique, classification et prédiction de qualité des eaux souterraines à l'aide
de CCME-WQI, PIG et Krigeager : cas de la région de Ghardaïa


رئيس القسم
بويلي سليم
رئيس قسم الري
والهندسة المدنية