



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري و الهندسة المدنية

Département Hydraulique et Génie Civile

N° d'enregistrement

/...../...../...../...../.....

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : ST

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

THEME

*Variation spatio-temporelle et statistique de la qualité
des eaux souterraines de la ville de Ghardaïa*

Déposé le : 03/06/2025

Par

BEN SEDIRA Abdelkader

Par le jury composé de :

Abdelkebir Brahim	Univ Ghardaïa	Président
Amieur Reikia	Univ Ghardaïa	Examinateur
BEN BITOUR Selma	Univ Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

*Nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant pour Son aide et Sa guidance
tout au long de ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble du corps
enseignant de l'Université de Ghardaïa pour leur soutien constant.*

*Nos remerciements particuliers vont à notre encadrante, Madame
Salma Ben Bitour, pour ses précieux conseils et son accompagnement
durant la réalisation de cette étude.*

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes parents et à mon épouse pour
leur soutien exceptionnel tout au long de ce parcours
académique. À mes frères, mes sœurs et mes quatre enfants. À
mes amis, mes collègues de travail ainsi que mes camarades à
l'université pour leur encouragement constant.*

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse physico-chimique et statistique des eaux souterraines d'une nappe fermée, basée sur des données recueillies sur 57 puits artésiens entre 2021 et 2025. L'objectif principal est d'évaluer la qualité de l'eau, d'identifier les variations spatiales et temporelles, et de proposer des recommandations pour une gestion durable.

Les résultats montrent une qualité d'eau globalement bonne à acceptable, avec des fluctuations marquées dans certains paramètres, notamment le potassium et le magnésium, qui dépassent parfois les normes recommandées. L'analyse statistique (ANOVA) révèle des différences significatives entre les années, attribuées à des processus naturels tels que les variations climatiques et la recharge de la nappe, sans impact anthropique direct.

Les analyses hydro chimiques indiquent un faciès calcique-magnésien et chloruré-sulfaté stable, caractéristique d'une influence géologique locale, notamment par la dissolution de roches évaporitiques. La distribution spatiale des ions majeurs met en lumière des zones à surveiller en raison de concentrations élevées.

L'indice IQES classe la qualité de l'eau entre « mauvaise » et « très mauvaise » selon les années, sans atteindre des seuils critiques, suggérant que la ressource reste exploitable avec une gestion appropriée.

Cette étude constitue une base essentielle pour la surveillance continue et la gestion durable des eaux souterraines dans la région, tout en soulignant la nécessité de recherches futures pour mieux comprendre les impacts climatiques et géologiques sur cette ressource.

Mots-clés : Eaux souterraines, qualité de l'eau, analyse chimique, distribution spatiale, gestion durable.

الملخص

تركزت هذه الدراسة على التحليل الفيزيائي والكيميائي والإحصائي لمياه المياه الجوفية في طبقة مائية مغلقة، بناءً على بيانات جمعت من 57 بئرًا ارتوازيًا خلال الفترة من 2021 إلى 2025. الهدف الرئيسي هو تقييم جودة المياه، تحديد التغيرات المكانية والزمنية، واقتراح توصيات لإدارة مستدامة.

تُظهر النتائج جودة مياه جيدة إلى مقبولة بشكل عام، مع تذبذبات ملحوظة في بعض المعايير، خاصة البوتاسيوم والمغنيسيوم، التي تتجاوز أحيانًا الحدود الموصى بها. تكشف التحليلات الإحصائية (ANOVA) عن اختلافات ذات دلالة إحصائية بين السنوات، تُعزى إلى عمليات طبيعية مثل التغيرات المناخية وتحدد الطبقة المائية، دون تأثير بشري مباشر.

تشير التحليلات الهيدروكيميائية إلى وجود نوعية مائية مستقرة ذات طابع كلسي-مغنيزي وكلوري-كبريتي، تعكس تأثيرًا جيولوجيًا محليًا، خاصة من إذابة الصخور المتبخرة. يبرز التوزيع المكاني للأيونات الرئيسية مناطق تستوجب المراقبة بسبب ارتفاع التركيزات.

يصنف مؤشر جودة المياه (IQES) جودة المياه بين «ضعيفة» و«ضعيفة جدًا» حسب السنوات، دون الوصول إلى مستويات حرجية، مما يشير إلى أن المورد لا يزال قابلاً للاستخدام مع إدارة مناسبة.

تشكل هذه الدراسة أساسًا هامًا للمراقبة المستمرة والإدارة المستدامة للمياه الجوفية في المنطقة، مع التأكيد على الحاجة إلى أبحاث مستقبلية لفهم أفضل لتأثيرات المناخ والجيولوجيا على هذه الموارد.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، جودة المياه، التحليل الكيميائي، التوزيع المكاني، الإدارة المستدامة.

Abstract

This study focuses on the physico-chemical and statistical analysis of groundwater from a closed aquifer based on data collected from 57 artesian wells between 2021 and 2025. The primary objective is to evaluate water quality, identify spatial and temporal variations, and provide recommendations for sustainable management.

The results indicate overall good to acceptable water quality, with notable fluctuations in specific parameters, particularly potassium, and magnesium, which occasionally exceed recommended limits. Statistical analysis (ANOVA) reveals significant differences between years attributed to natural processes such as climatic variations and aquifer recharge, with no direct anthropogenic impact.

Hydro-chemical analyses indicate stable calcium-magnesium and chloride-sulfate facies, characteristic of local geological influence, especially from the dissolution of evaporite rocks. The spatial distribution of major ions highlights areas requiring monitoring due to high concentrations.

The IQES index rates water quality as "poor" or "very poor" across the years without reaching critical thresholds, suggesting that the resource remains exploitable with appropriate management.

This study provides a solid foundation for ongoing monitoring and sustainable groundwater management in the region, highlighting the need for future research better to understand the climatic and geological impacts on this resource.

Keywords: Groundwater, water quality, chemical analysis, spatial distribution, sustainable management.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Dédicace

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

I. GÉNÉRALITÉS SUR L'EAU..... 3

I.1. INTRODUCTION..... 3

I.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE 3

I.2. GÉOMORPHOLOGIE..... 4

I.3. SITUATION GÉOLOGIQUE DE LA VILLE DE GHARDAÏA :..... 6

I.3.1. Préambule géologique :..... 6

I.3.2. Les formations géologiques : 6

I.3.3. Le calcaire et la dolomite : 6

I.3.4. Le rôle des formations géologiques dans le stockage de l'eau : 7

I.3.5. Impact géologique sur la gestion de l'eau : 7

I.3.6. Importance de l'étude des formations géologiques : 7

I.3.7. Défis géologiques : 8

I.4. HYDROGÉOLOGIE DE LA RÉGION DE GHARDAÏA 8

I.4.1. Contexte hydrogéologique 8

I.4.2. Les aquifères de Ghardaïa : 8

I.4.3. Caractéristiques hydrogéologiques et qualité de l'eau : 9

I.4.4. Rechargement et dynamique des nappes phréatiques : 9

I.4.5. Les défis liés à l'hydrogéologie de la région : 10

I.5. CLIMAT DE LA RÉGION DE GHARDAÏA : 11

I.5.1. Contexte climatique : 11

I.5.2. Températures et variations climatiques : 11

I.5.3. Précipitations : 11

I.5.4. Vents et variations climatiques : 12

I.5.5. Humidité relative et climat de Ghardaïa : 13

I.5.6. Impact du climat sur les ressources en eau : 14

I.5.7. Durabilité et adaptation au climat : 14

II. ETUDE DE MILIEU PHYSIQUE..... 15

II.1. INTRODUCTION..... 15

II.2. STRUCTURE DE L'EAU : 15

II.2.1. La molécule d'eau : 15

TABLE DES MATIÈRES

II.3.	COMPOSITION DES EAUX NATURELLES :	15
II.3.1.	Matières minérales :	15
II.3.2.	Matières organique :	15
II.3.3.	Matières dissoutes :	16
II.3.4.	Matières colloïdales :	16
II.3.5.	Matières en suspension :	16
II.4.	LES PROPRIETES DE L'EAU :	16
II.4.1.	les propriétés physiques de l'eau :	16
II.5.	PROPRIETES CHIMIQUES :	17
II.5.1.	Dissociation ionique de l'eau:	17
II.5.2.	Solubilité des gaz dans l'eau :	17
II.5.3.	L'oxydo-Réduction :	18
II.5.4.	Propriétés biologiques de l'eau :	18
II.6.	CYCLE DE L'EAU DANS LA NATURE :	18
II.7.	LES SOURCES NATURELLES DE L'EAU:	19
II.7.1.1	Eaux de pluie :	19
II.7.1.2	Eaux de mer :	19
II.7.1.3	Eaux superficielles :	19
II.7.1.4	Eaux souterraines :	19
II.8.	POLLUTION DES EAUX :	20
II.8.1.	Définition de la pollution de l'eau :	20
II.8.2	Tableau scientifique récapitulatif sur la pollution de l'eau:	20
II.9.	QUALITÉ DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE :	21
II.9.1.	Critères de qualité des eaux destinées à la consommation humaine :	21
II.9.1.1	Paramètres organoleptiques :	21
II.9.1.2	Paramètres physiques :	22
II.9.1.3	Paramètres chimiques Paramètre de pollution :	23
II.9.1.3.1	Nitrite :	23
II.9.1.3.2	Azote ammoniacal (ou Ammonium) :	24
II.9.1.3.3	Phosphates :	24
II.9.1.3.4	Minéralisation globale :	24
II.9.1.3.4.5	Dureté totale TH:	25
II.9.1.3.4.6	Paramètres indésirables.....	26
II.9.1.4	Paramètres bactériologiques :	26
II.10.	LES NORMES DE POTABILITÉ DES EAUX DESTINÉES À LA CONSOMMATION HUMAINE:	27
II.10.1.	Normes l'OMS :	27
II.11.	CONCLUSION :	29
III.	MATERIELS ET METHODES.....	30
III.1.	INTRODUCTION.....	30
III.2.	ECHANTILLONNAGE DE L'EAU :	30
III.3.	MODE DE PRELEVEMENT :	30
III.3.1.	Conservation des échantillons :	31
III.3.2.	Principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau :	31
III.4.	METHODES ET TECHNIQUES D'ANALYSES.....	32

TABLE DES MATIÈRES

III.4.1.	Mesures in situ	32
III.4.2.	Analyses en laboratoire	32
III.4.3.	Choix des points de prélèvement	32
III.4.4.	Les paramètres d'analyse d'eau :	32
III.4.5.	Analyse physico-chimiques et microbiologiques :	33
III.4.5.1	Mesure des paramètres physiques :	33
III.4.6.	Analyse des paramètres chimiques :	34
III.4.6.1	Dosage des cations :	34
III.4.7.	Paramètres de la pollution :	36
	NH ₄ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ et PO ₄ ⁻³ sont analysés par spectrophotomètre.....	36
III.4.7.1	Dosage des anions :	36
III.5.	EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX DESTINEES A LA CONSOMMATION HUMAINE:	38
III.5.1.	Les indices d'évaluation de qualité des eaux :	38
III.5.1.1	La balance ionique :	38
III.5.1.2	Indice de qualité des eaux IQE :	38
III.5.1.3	Les faciès chimiques de l'eau :	40
III.5.1.4	Diagramme de Stabler :	40
III.5.1.5	Diagramme de Piper :	40
III.5.1.6	Diagramme de Schoeller-Berkalof :	41
III.5.2.	Logiciels de traitement des résultats :	42
III.5.2.1	Logiciel diagramme :	42
III.5.2.2	Logiciel Arc gis :	42
III.6.	METHODES STATISTIQUES.....	42
III.6.1.	la statistique descriptive.	42
III.6.2.	ANOVA :	42
III.7.	CONCLUSION :	42
IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	44
IV.1.	LA STATISTIQUE DESCRIPTIVE	44
IV.2.	ANALYSE ANOVA DES DONNEES SAISONNIERES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	46
IV.3.	CONCLUSION :	47
IV.4.	INDICE DE LA QUALITE DE L'EAU (IQES)	47
IV.5.	RESULTATS POUR LA PERIODE HIVERNALE (2021–2024).....	48
IV.6.	SYNTHESE IQES POUR CHAQUE ANNEE	49
IV.7.	ANALYSE DES COURBES D'EVOLUTION (2021–2025)	51
IV.7.1	Conductivité électrique (CE).....	52
IV.7.2	Magnésium (Mg ²⁺)	53
IV.7.3.	Sodium (Na ⁺)	54
IV.7.4	Potassium (K ⁺).....	54
IV.7.5	Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).....	55
IV.7.6.	Chlorures (Cl ⁻).....	56
IV.7.7.	Sulfates (SO ₄ ²⁻).....	56
IV.7.8.	Fer :	57
IV.7.9	NH ₄ ⁺	57

TABLE DES MATIÈRES

.IV.7.10NO□	58
IV.7.10.1 Synthèse générale	58
.IV.8ANALYSE HYDRO- CHIMIQUE DES DEUX DIAGRAMMES DE PIPE	59
IV.9. ANALYSE HYDRO- CHIMIQUE DES DEUX DIAGRAMMES DE PIPER	60
IV.9.1.Analyse succincte de la qualité de l'eau potable (2024 et 2025) selon les diagrammes Wilcox : 61	
.IV.10LES CARTES DE LA REPARTITION SPATIALE HYDRO-CHIMIQUE :	63
CONCLUSION GENERALE	77
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	81
ANNEXE	91

Liste des figures

Figure I-1: Carte administrative de la wilaya d'étude [3].	3
Figure I-2: Localisation de la vallée de M'Zab	4
Figure I-3: Géomorphologie de la région de Ghardaïa	6
Figure I-4: Carte géologique de la région de Ghardaïa	10
Figure I-5: Températures moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).	11
Figure I-6: Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).	12
Figure I-7: Vents moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).	13
Figure I-8: Humidité moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).	13
Figure II-1: Cycle de l'eau	19
Figure III-1: pH mètre (HACH, AD 1000)	91
Figure III-2: Conductimètre (LF 538)	91
Figure III-3: Turbidimètre (HACH, TL2300)	91
Figure III-4: Spectrophotomètre UV- Visible (HACH, DR 6000)	92
Figure III-7: Diagramme de Stabler	40
Figure III-8: Diagramme de piper	41
Figure III-9: Diagramme de Schoeller	41
Figure IV-1: Le pH	51
Figure IV-2: Conductivité électrique	52
Figure IV-3: Calcium (Ca²⁺)	52
Figure IV-4: Magnésium	53
Figure IV-5: Sodium	54
Figure IV-6: Potassium	54
Figure IV-7: Bicarbonates	55
Figure IV-8: Chlorures	56
Figure IV-9: Sulfates (SO ₄ ²⁻)	56
Figure IV-10: Fer	57
Figure IV-11: NH₄⁺	57
Figure IV-12: NO₃⁻	58
Figure IV-13: Diagrammes de Piper des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025	59
Figure IV-14: Diagrammes de Piper des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025	59
Figure IV-15: Diagrammes de Schoeller-Berkaloff des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025	60
Figure IV-16: Diagrammes de Wilcox des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025	61
Figure IV-17: Diagrammes de Stabler des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025	62

LISTE DES FIGURES

Figure IV-18: Cartes de distribution spatiale de pH pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW	63
Figure IV-19: . Cartes de distribution spatiale de conductivité électrique (Ce) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.	64
Figure IV-20: . Cartes de distribution spatiale de calcium (Ca) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....	65
Figure IV-21: Cartes de distribution spatiale de l'ammonium (NH_4^+) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....	66
Figure IV-22: Cartes de distribution spatiale de nitrites (NO_2^-) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.	68
Figure IV-24: Cartes de distribution spatiale de magnésium (Mg) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW	69
Figure IV-25: Cartes de distribution spatiale de sodium (Na) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW	70
Figure IV-26: Cartes de distribution spatiale de potassium (K) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....	71
Figure IV-27: Cartes de distribution spatiale de chlorure (Cl^-) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....	72
Figure IV-28: Cartes de distribution spatiale de sulfate (SO_4^{2-}) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....	73
Figure IV-30: . Cartes de distribution spatiale de bicarbonates (HCO_3^-) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....	74
Figure IV-31: <i>Cartes de distribution spatiale de TAC (Titre Alcalimétrique Complet) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.....</i>	75
Figure IV-32: Cartes de distribution spatiale de fer (Fe) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW	76

Liste des Tableaux

Tableau II-1 : Tableau sur la pollution de l'eau.....	21
Tableau II-2:Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique [F. Touhari.2015]. خطأ! الإشارة المرجعية غير معروفة.	
Tableau II-3: Classification des eaux en fonction de leur dureté [B. Hasnia 2018].....	26
Tableau II-4:types de bactéries indicatrices de contamination fécale dans l'eau	27
Tableau II-5 : Les normes N.A et OMS [J. Rodier, B. Legube, and N. Merlet2009, sgg2011- B. Zineddine, Z. Mehdadi, H. Benhassaini 2015].....	28
Tableau III-1:les paramètres d'analyse d'eau	33
Tableau III-2:Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE [Chatterjee, Raziuddin ,2002- Aher, Malwade ,2016.]......	39
Tableau IV-1:Hiver – Résumé Annuel	44
Tableau IV-2:Été – Résumé Annuel	45
Tableau IV-3:Hiver – Résultats ANOVA.....	46
Tableau IV-4:Été – Résultats ANOVA	46
Tableau IV-5:: l'indice IQES.....	48
Tableau IV-6:Normes OMS et poids relatifs (W_i) ($W_i = 1/S_i$).....	48
Tableau IV-7:Résultats pour la période hivernale (2021–2024).....	49
Tableau IV-8:hiver 2021	49
Tableau IV-9:Synthèse IQES pour chaque année.....	50
Tableau IV-10:Synthèse IQES pour chaque année.....	50

Liste des Abréviations

- **OMS** Organisation mondiale de la santé
- **NA** Normes algériennes.
- **ADE** Algérienne des eaux
- **T** Température
- **Ph** Potentiel hydrogène
- **CE** Conductivité électrique
- **Ca²⁺** Calcium
- **Mg²⁺** Magnésium
- **HCO₃⁻** Bicarbonate
- **Cl⁻** Chlorure
- **SO₄²⁻** Sulfate
- **TH** Dureté totale
- **NO₃⁻** Nitrate
- **Na⁺** Sodium
- **K⁺** Potassium
- **NO₂⁻** Nitrite
- **NH₄⁺** Ammonium
- **NH₃** Ammoniac
- **PO₄⁻** Phosphate
- **IQES** Indice de qualité des eaux souterraines
- **SIG** Systèmes d'Informations Géographiques.
- **Fe** Fer
- **BI** Balance ionique.
- **N₂** Azote
- **O₂** Oxygène
- **TDS** Solides totaux dissous
- **ANRH** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
- **ACP** Analyse en composante principale
- **ANOVA** Analyse de variation
- **IDW** Pondération inverse de la distance

Introduction générale

Introduction générale

Les ressources en eau constituent des éléments fondamentaux pour le développement des sociétés humaines à travers le monde. L'accroissement démographique rapide, l'expansion industrielle et agricole, ainsi que les effets négatifs du changement climatique, exercent une pression croissante sur ces ressources, rendant leur gestion d'autant plus cruciale à tous les niveaux. Dans ce contexte, les eaux souterraines se distinguent comme une ressource vitale, en particulier dans les régions arides et semi-arides, jouant un rôle central pour répondre aux besoins en eau des populations et des activités économiques (Bouchetara & Azzouz, 2014; Benhamza & Lounis, 2018).

La ville de Ghardaïa, située au cœur de la vallée du M'zab dans le sud de l'Algérie, illustre parfaitement cette situation. Cette région, caractérisée par un climat saharien rigoureux, dépend largement des eaux souterraines pour satisfaire les besoins en eau domestique, agricole et industriel. Avec l'augmentation continue de la demande en eau souterraine en raison de l'urbanisation croissante et des activités économiques intensifiées, il devient impératif de comprendre les variations de la qualité de ces eaux au fil du temps et selon les différents sites de la ville (Mabrouki & Taïbi, 2019; Amara & Daoudi, 2016).

La qualité des eaux souterraines à Ghardaïa est influencée par plusieurs facteurs, à la fois naturels et anthropiques. Parmi les facteurs naturels, on trouve les interactions complexes entre les eaux et les roches souterraines, qui affectent la minéralisation des eaux. D'autre part, les pratiques humaines, notamment l'agriculture non durable, l'urbanisation et les industries locales, peuvent introduire des polluants qui dégradent la qualité de l'eau. De plus, les variations climatiques, telles que les changements dans les niveaux de précipitations et la température, influencent la recharge des nappes souterraines, ce qui affecte également la qualité de l'eau (Meziane & Benfekih, 2020; Fournier & Ghorbal, 2017).

Ghardaïa, située dans le sud de l'Algérie, est une région aride où les ressources en eau sont limitées et précieuses. Les eaux souterraines constituent une source essentielle pour l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture et les activités industrielles. Cependant, la qualité de ces eaux est susceptible de varier dans l'espace et dans le temps en raison de divers facteurs naturels et anthropiques.

Ainsi, plusieurs questions se posent concernant cette variabilité :

- **Comment la qualité des eaux souterraines varie-t-elle d'un point à un autre dans la région de Ghardaïa ?**
- **Quels sont les facteurs géologiques, hydrologiques et anthropiques qui influencent cette variation spatiale ?**
- **Quels sont les événements climatiques, les pratiques agricoles ou les activités industrielles qui peuvent expliquer ces variations temporelles ?**

L'étude des variations spatiotemporelles de la qualité des eaux souterraines de la ville de Ghardaïa est donc essentielle pour comprendre les dynamiques sous-jacentes à ces changements. Cette analyse repose sur la collecte et l'analyse de données physico-chimiques provenant de forages répartis dans plusieurs sites de la ville, collectées à différents moments. L'utilisation de méthodes statistiques avancées permet d'identifier les tendances temporelles et spatiales qui caractérisent ces variations et d'isoler les facteurs qui influencent la qualité des eaux souterraines (Chabane & Karoui, 2018).

L'objectif de cette étude est d'évaluer les variations de la qualité des eaux souterraines dans la ville de Ghardaïa à travers une approche spatiotemporelle, en tenant compte des facteurs géologiques, hydrologiques et anthropiques. Cette recherche vise à mieux comprendre les mécanismes hydrogéochimiques locaux, tout en fournissant des recommandations pratiques pour une gestion durable de cette ressource vitale dans un environnement saharien fragile. Par l'analyse des données recueillies, cette étude cherchera à mettre en lumière les problèmes actuels relatifs à la qualité de l'eau souterraine et à proposer des solutions concrètes pour préserver cette ressource indispensable pour la région de Ghardaïa.

CHAPITRE I

Généralités sur L'eau

I. Généralités sur l'eau

I.1. Introduction

Le premier chapitre de cette étude est consacré à la présentation du milieu physique de la région d'étude, qui est la ville de Ghardaïa et ses environs. Ce chapitre vise à fournir une compréhension détaillée du contexte géographique, géomorphologique, géologique, hydrogéologique et climatique de la région. Ces éléments sont essentiels pour comprendre les conditions dans lesquelles les ressources en eau sont gérées et pour évaluer l'impact des facteurs environnementaux sur la qualité de l'eau. L'objectif est de poser les bases nécessaires pour l'analyse approfondie des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans les chapitres suivants.

I.1. Situation géographique

La ville de Ghardaïa se situe dans le sud de l'Algérie, à environ 600 kilomètres de la capitale Alger. C'est une ville qui joue un rôle stratégique en raison de sa position géographique au cœur du Sahara algérien, où l'eau souterraine représente une ressource primordiale pour la vie et l'agriculture. Ghardaïa est située entre les latitudes 35° et 36° Nord et les longitudes 4° et 7° Est. Sa proximité avec des aquifères souterrains importants est un facteur déterminant dans l'alimentation en eau de la région (figure 1).

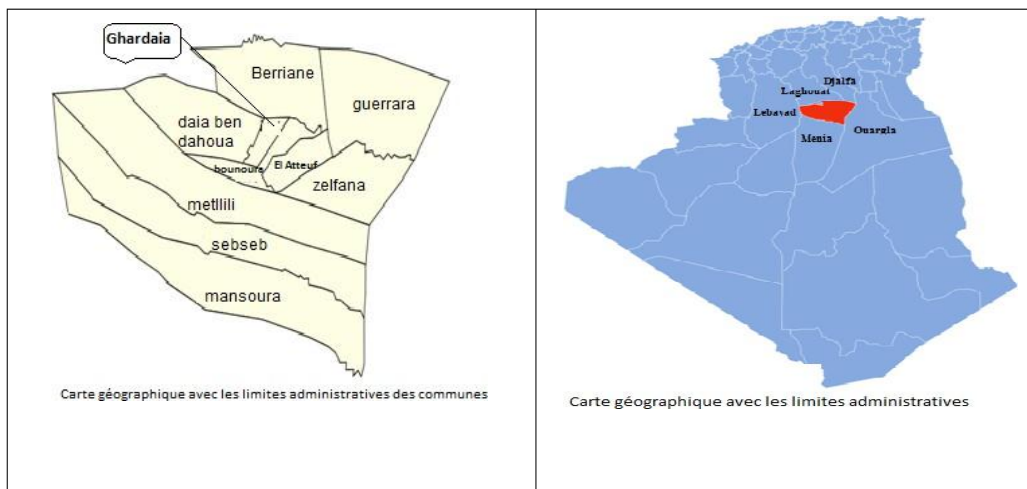


Figure I-1: Carte administrative de la wilaya d'étude [3].

La vallée du M'Zab est comprise entre 32° 26' et 32° 31' de latitude Nord et 3° 37' et 3°46'

de longitude Est. Elle est alignée approximativement Nord-Ouest, Sud-Est, en partant de Bouchen, zone de confluence de l'oued El Haimeur avec l'oued Touzouz, jusqu'à El Atteuf, dont la longueur est de 23,5 km. La largeur de la vallée varie entre 2,35 et 1,5 km en amont et diminue au fur et à mesure vers l'aval pour atteindre 0,55 km tout au sud de la ville d'El Atteuf.

La vallée du M'Zab est délimitée au Nord par la région de Daïas, au Sud, par Metlili, à l'Est, par Ouargla et à l'Ouest, par le Grand Erg Occidental [Saidani,2023].

La superficie de la vallée est de 5000 Km² et les altitudes diminuent progressivement de l'amont vers l'aval, 514 à 508 mètres à Bouchen, 505 à 485 mètres au niveau la ville de Ghardaïa, 455 à 450 mètres au niveau d'El Atteuf, et 435 mètres à Ahbas point le plus bas de l'oasis d'El Atteuf [Rahmani,2017].

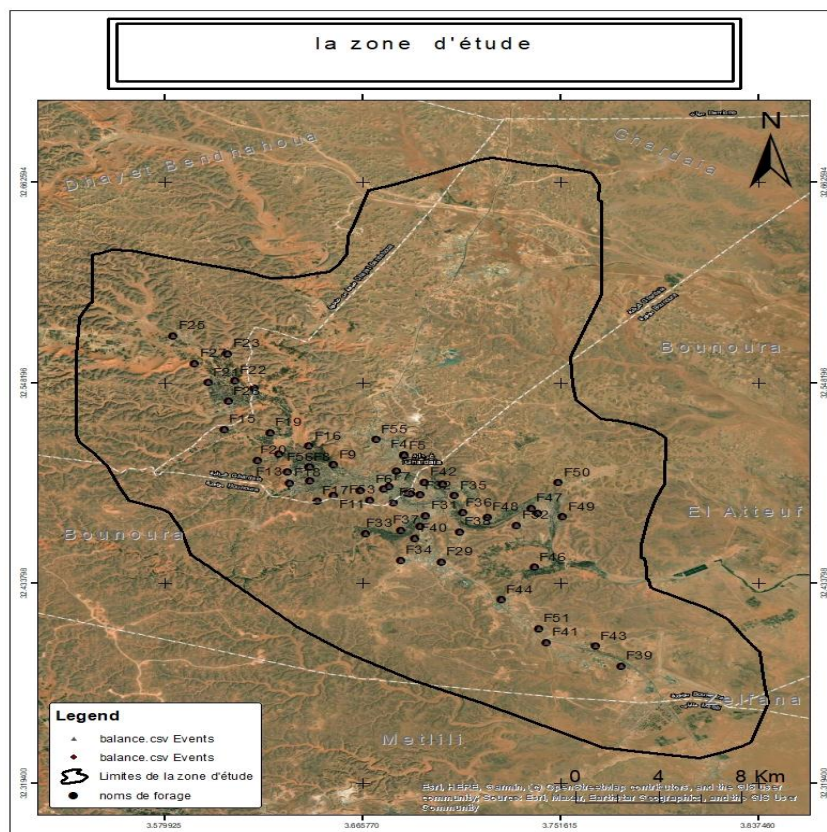


Figure I-2: Localisation de la vallée de M'Zab

I.2. Géomorphologie

La région de Ghardaïa se distingue par une grande diversité paysagère, allant des montagnes rocheuses aux vastes plaines désertiques. Cette variété de formes géographiques, combinée à une histoire géologique complexe, influence directement les conditions d'approvisionnement en eau. En effet, la région abrite des formations rocheuses calcaires et dolomitiques datant du Crétacé, qui jouent un rôle majeur dans le stockage des ressources en eau souterraine. Les montagnes et les

plaines interagissent également avec les réseaux fluviaux, créant ainsi un environnement propice à l'accumulation d'eau dans les nappes phréatiques.

La région de Ghardaïa peut être subdivisée en quatre ensembles géomorphologiques distincts, chacun ayant des caractéristiques propres :

a) La Chebka du M'Zab

Il s'agit d'un plateau crétacé rocheux, découpé par de petites vallées orientées principalement vers l'Est. Ces vallées, pouvant atteindre plusieurs kilomètres de largeur, sont bordées de formations calcaires généralement dolomitiques, superposées sur des couches de marnes. Cette zone s'étend sur une superficie d'environ 8000 km² (COYNE, 1989).

b) La Région des Dayas

Les dayas sont des dépressions de dimensions variées, situées sur un substrat géologique miopliocène. Seule la commune de Guerrara, au Nord-Est de la région, couvre une petite portion de ce plateau (BENSAHA, 2011).

c) La Région des Regs

Les regs se présentent comme de vastes étendues de sols solides, caillouteux et sans relief marqué. Ils sont localisés à l'Est de la région, notamment dans les zones de Zelfana, Bounoura et El Atteuf. Ces terrains reposent sur un substrat géologique du pliocène (KHENE, 2013).

d) La Région de l'Erg

Dominée par l'erg occidental, une vaste étendue de dunes, cette région constitue une source d'ensablement pour les périmètres agricoles, notamment dans l'axe Mansoura – El Ménéa.

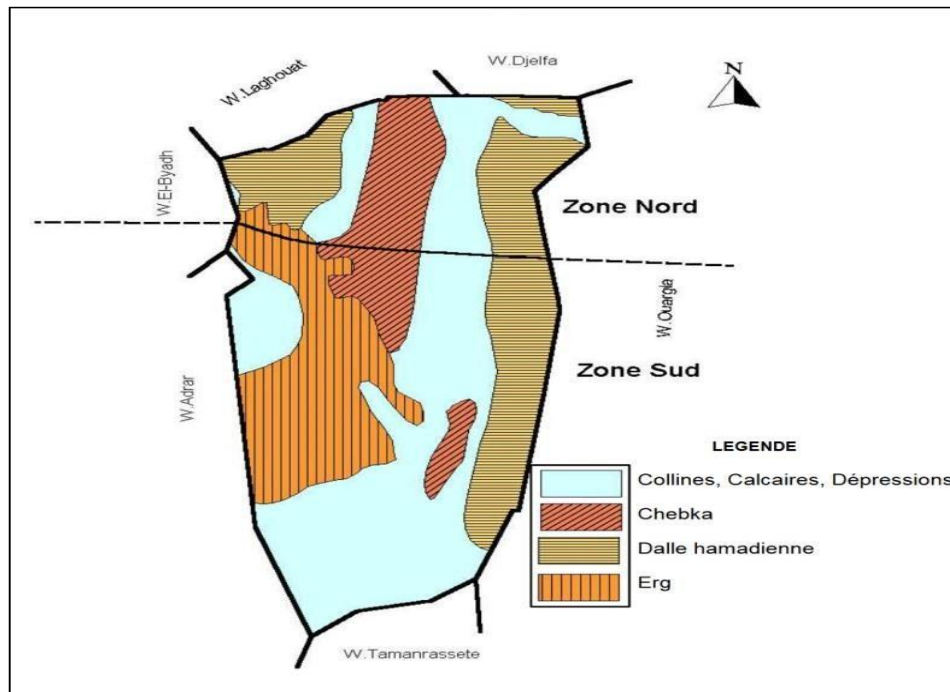


Figure I-3: Géomorphologie de la région de Ghardaïa.

I.3. Situation géologique de la ville de Ghardaïa :

I.3.1. Préambule géologique :

La ville de **Ghardaïa** est située dans la région désertique de l'Algérie, et se caractérise par une richesse géologique remontant à des périodes anciennes, notamment au **Crétacé**. Cette période géologique voit la formation de plusieurs structures géologiques qui ont un impact direct sur les ressources en eau de la région (**Benhallou & Hachani, 2016**).

I.3.2. Les formations géologiques :

La ville de Ghardaïa repose sur des **formations géologiques datant du Crétacé**, comprenant des roches **calcaires** (Calcaires) et **dolomitiques** (Dolomites). Ces roches présentent des caractéristiques physiques et chimiques uniques, jouant un rôle crucial dans le stockage et la filtration des eaux souterraines, ce qui en fait un facteur déterminant pour la durabilité des ressources en eau dans la région (**ANRH, 2019**).

I.3.3. Le calcaire et la dolomite :

- **Le calcaire** est une roche sédimentaire composée principalement de **carbonate de calcium** (CaCO_3). Le calcaire possède une grande capacité d'absorption et de stockage de l'eau en raison de sa porosité naturelle, ce qui en fait un excellent réservoir pour les eaux souterraines (**Djelloul, 2015**).

- **La dolomite** est une autre roche sédimentaire contenant du **carbonate de magnésium et de calcium** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Elle a des caractéristiques similaires au calcaire, mais elle est généralement moins perméable, ce qui influence la circulation des eaux souterraines à travers ces formations (**Benhallou & Hachani, 2016**).

I.3.4. Le rôle des formations géologiques dans le stockage de l'eau :

- **Capacité de stockage** : Grâce à la **porosité élevée** des roches calcaires et dolomitiques, ces formations permettent de stocker de grandes quantités d'eau souterraine. Ces eaux sont particulièrement cruciales pendant les périodes de sécheresse, contribuant ainsi à sécuriser l'approvisionnement en eau à Ghardaïa (**Djelloul, 2015**).
- **Filtration de l'eau** : Les roches calcaires jouent un rôle essentiel dans le processus de **filtration naturelle** des eaux souterraines. Lorsque l'eau s'infiltre à travers ces roches, elle est purifiée des impuretés et des éléments polluants qu'elle pourrait contenir (**ANRH, 2019**).

I.3.5. Impact géologique sur la gestion de l'eau :

Les caractéristiques géologiques de Ghardaïa influencent de manière significative la gestion des ressources en eau de plusieurs manières :

1. **Recharge des nappes phréatiques** : Les formations géologiques déterminent la capacité de la région à recharger les nappes phréatiques. La présence de roches calcaires et dolomitiques, qui contiennent des porosités et des fissures, facilite l'accumulation de l'eau en provenance des précipitations ou d'autres sources (**Benhallou & Hachani, 2016**).
2. **Circulation de l'eau souterraine** : Les formations géologiques contrôlent la **répartition** et la **circulation** des eaux souterraines sous la surface de la Terre. La présence de fissures ou de pores permet à l'eau souterraine de se déplacer plus facilement entre les différentes couches géologiques (**Djelloul, 2015**).
3. **Durabilité des ressources** : La compréhension de ces formations est essentielle pour évaluer la **durabilité** des ressources en eau de la région. Si ces formations permettent un bon stockage des eaux, mais n'offrent pas une recharge efficace, cela pourrait entraîner l'épuisement des nappes phréatiques à long terme (**ANRH, 2019**).

I.3.6. Importance de l'étude des formations géologiques :

Comprendre les formations géologiques de Ghardaïa est fondamental pour évaluer la **durabilité des ressources en eau**. À travers cette compréhension, il est possible de déterminer :

- Les zones optimales pour l'extraction des eaux souterraines.

- Les **limites géographiques** des couches aquifères, et ainsi d'évaluer les quantités d'eau disponibles à l'exploitation (**Benhallou & Hachani, 2016**).
- L'impact des **activités humaines** telles que le pompage excessif ou l'exploitation non durable des eaux souterraines sur la qualité et la quantité des ressources en eau (**Djelloul, 2015**).

I.3.7. Défis géologiques :

Cependant, ces formations géologiques ne sont pas exemptes de défis pouvant affecter la qualité des eaux souterraines, notamment :

- **Pollution souterraine** : En cas de contamination des couches géologiques proches des aquifères, cela peut avoir un impact sur la qualité des eaux stockées dans les roches calcaires ou dolomitiques (**ANRH, 2019**).
- **Dépôts minéraux** : Parfois, des **minéraux nuisibles** peuvent s'accumuler dans les eaux souterraines, ce qui modifie les propriétés de l'eau et impacte sa qualité (**Djelloul, 2015**).

I.4. Hydrogéologie de la région de Ghardaïa

I.4.1. Contexte hydrogéologique

La **région de Ghardaïa**, située au cœur du désert algérien, est un exemple classique d'un environnement aride où les ressources en eau souterraine jouent un rôle primordial. La région repose sur des formations géologiques complexes qui ont une influence majeure sur la disponibilité, la qualité et la gestion des eaux souterraines. Ces ressources sont vitales pour la population locale, mais aussi pour l'agriculture, qui dépend largement de l'irrigation en raison des faibles précipitations annuelles.

I.4.2. Les aquifères de Ghardaïa :

Les aquifères de Ghardaïa sont principalement issus des formations géologiques calcaires et dolomitiques du Crétacé. Ces aquifères sont caractéristiques de régions semi-arides et désertiques, où l'eau est souvent stockée sous forme de nappes phréatiques profondes. Ces nappes sont classées en aquifères libres et aquifères confinés, selon leur position géologique et leur relation avec d'autres couches aquifères.

- a) Aquifères du Crétacé** : Les **aquifères du Crétacé** représentent la principale source d'eau souterraine pour la région. Ils sont caractérisés par une grande capacité de stockage d'eau, particulièrement dans les formations calcaires. Ces aquifères sont cependant relativement peu rechargés, en raison du faible taux de précipitations dans la région, et nécessitent une gestion prudente pour éviter l'épuisement des ressources en eau.

- b) Le rôle des formations calcaires et dolomitiques :** Les roches calcaires et dolomitiques jouent un rôle clé dans la gestion de l'eau souterraine dans cette région. Ces formations, de par leur porosité et leur capacité à stocker de l'eau, permettent une filtration naturelle des eaux souterraines, assurant une qualité d'eau relativement bonne, à condition que les nappes ne soient pas trop polluées par les activités humaines (ANRH, 2019).

I.4.3. Caractéristiques hydrogéologiques et qualité de l'eau :

Les caractéristiques **hydrogéologiques** de la région de Ghardaïa sont fortement influencées par les formations géologiques sous-jacentes. En effet, la qualité de l'eau souterraine dépend en grande partie de l'interaction entre l'eau et ces roches. Toutefois, des défis subsistent en matière de gestion de la qualité de l'eau souterraine :

- a) Salinité des eaux souterraines :** L'un des principaux problèmes **hydrogéologiques** dans la région de Ghardaïa est la salinité croissante des eaux souterraines. En raison de l'évaporation intense et de la faible recharge des nappes, des sels dissous se concentrent dans les nappes phréatiques, ce qui affecte la qualité de l'eau, la rendant moins adaptée à l'irrigation et à la consommation (Djelloul, 2015).
- b) Contamination et pollution :** La contamination des nappes phréatiques par des polluants agricoles (pesticides, engrais) et industriels est un autre défi majeur. Bien que les roches calcaires puissent filtrer certaines impuretés, une surutilisation des nappes peut entraîner l'infiltration de polluants dans les aquifères, compromettant la qualité de l'eau (Benhallou & Hachani, 2016).

I.4.4. Rechargement et dynamique des nappes phréatiques :

Le **rechargement des nappes phréatiques** est un processus lent dans la région de Ghardaïa. La faible pluviométrie, combinée aux caractéristiques géologiques de la région, limite la quantité d'eau qui peut s'infiltrer et recharger les nappes phréatiques.

- 1. Processus de recharge lent :** La recharge de ces nappes se fait principalement par infiltration d'eau de pluie, mais le taux de recharge est faible en raison des faibles précipitations annuelles et de l'évaporation élevée. En conséquence, les nappes sont vulnérables à l'épuisement en cas de surexploitation ou de sécheresses prolongées (ANRH, 2019).
- 2. Gestion des ressources en eau souterraine :** Le suivi des niveaux d'eau souterraine et des paramètres de qualité est essentiel pour une gestion durable des ressources. Les techniques modernes de surveillance, comme les forages de contrôle et l'utilisation des

systèmes de **télédétection**, permettent de mieux comprendre l'évolution de la dynamique des nappes phréatiques.

I.4.5. Les défis liés à l'hydrogéologie de la région :

Les conditions hydrogéologiques de la région posent plusieurs défis pour la gestion durable des ressources en eau :

1. **Sur exploitation des nappes phréatiques** : L'irrigation intensive dans la région, principalement pour l'agriculture, a conduit à une surexploitation des nappes phréatiques. Cela peut entraîner une diminution des niveaux d'eau dans les aquifères, rendant l'accès à l'eau plus difficile et augmentant les risques de **salinisation** (Djelloul, 2015).
2. **Gestion de la pollution** : La gestion des **polluants industriels** et agricoles est un enjeu majeur pour préserver la qualité de l'eau souterraine. Les pratiques agricoles intensives et l'usage excessif des engrais et des pesticides augmentent les risques de contamination des nappes phréatiques (Benhallou & Hachani, 2016).

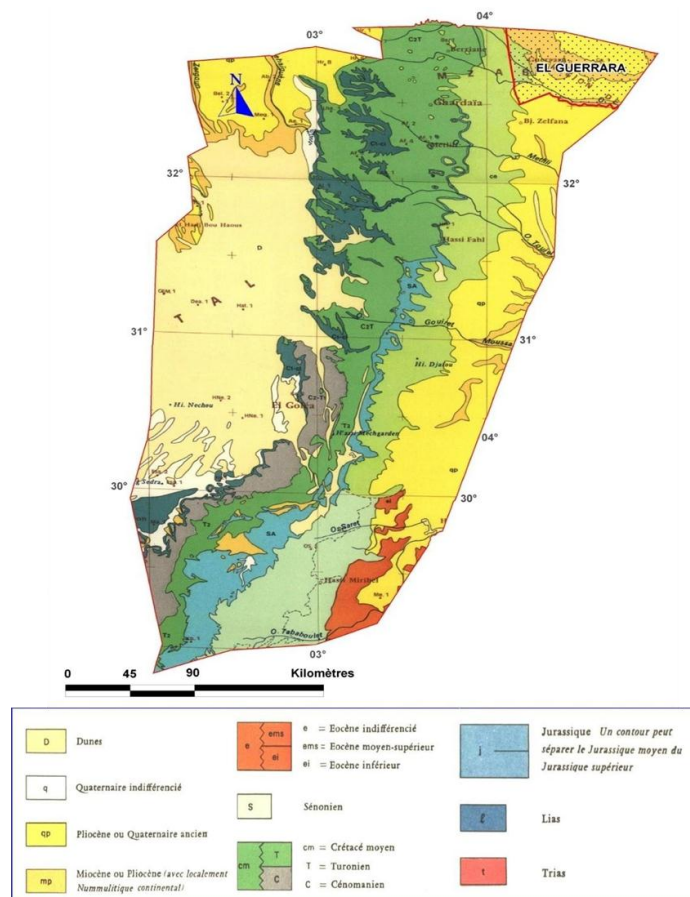


Figure I-4: Carte géologique de la région de Ghardaïa

I.5. Climat de la région de Ghardaïa :

I.5.1. Contexte climatique :

La région de **Ghardaïa** bénéficie d'un climat désertique aride, caractérisé par des températures élevées tout au long de l'année et des précipitations très faibles. Située dans la région de **la Hammada** algérienne, Ghardaïa fait partie des zones les plus sèches du pays. Le climat se distingue par des **saisons chaudes et longues**, tandis que l'**hiver** est relativement court et moins rigoureux que dans d'autres régions désertiques (ONM, 2020).

I.5.2. Températures et variations climatiques :

Les températures à Ghardaïa varient considérablement, atteignant des valeurs **très élevées** pendant l'été (de 40 à 45°C), tandis que l'hiver reste relativement doux, avec des températures descendant parfois à **5°C ou moins**. De plus, des **variations de température importantes** sont observées entre le jour et la nuit, ce qui accentue la rigueur climatique de la région (ANRH, 2019; ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).

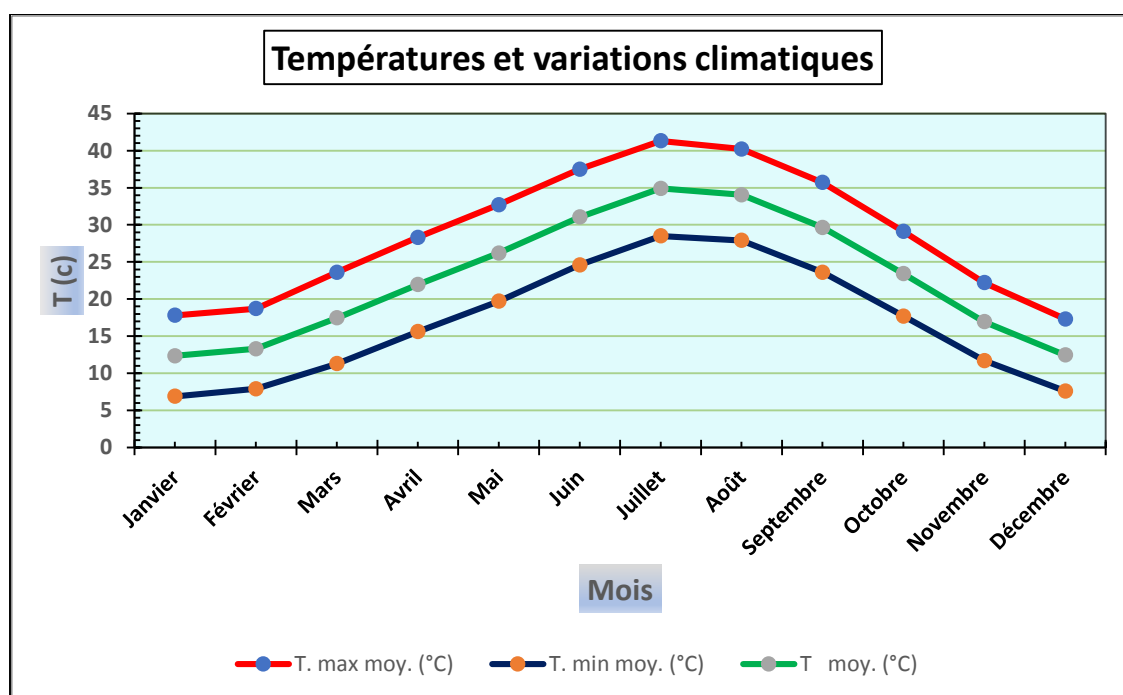


Figure I-5: Températures moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).

I.5.3. Précipitations :

La région de Ghardaïa souffre d'une **faible pluviométrie**, avec des précipitations annuelles variant entre **50 à 100 mm**. Les précipitations sont **rare et irrégulières**, ce qui rend difficile le renouvellement des **ressources en eau souterraine**. Les **vents forts** et l'**évaporation élevée**

contribuent également à la perte de l'humidité (Djelloul, 2015 ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).

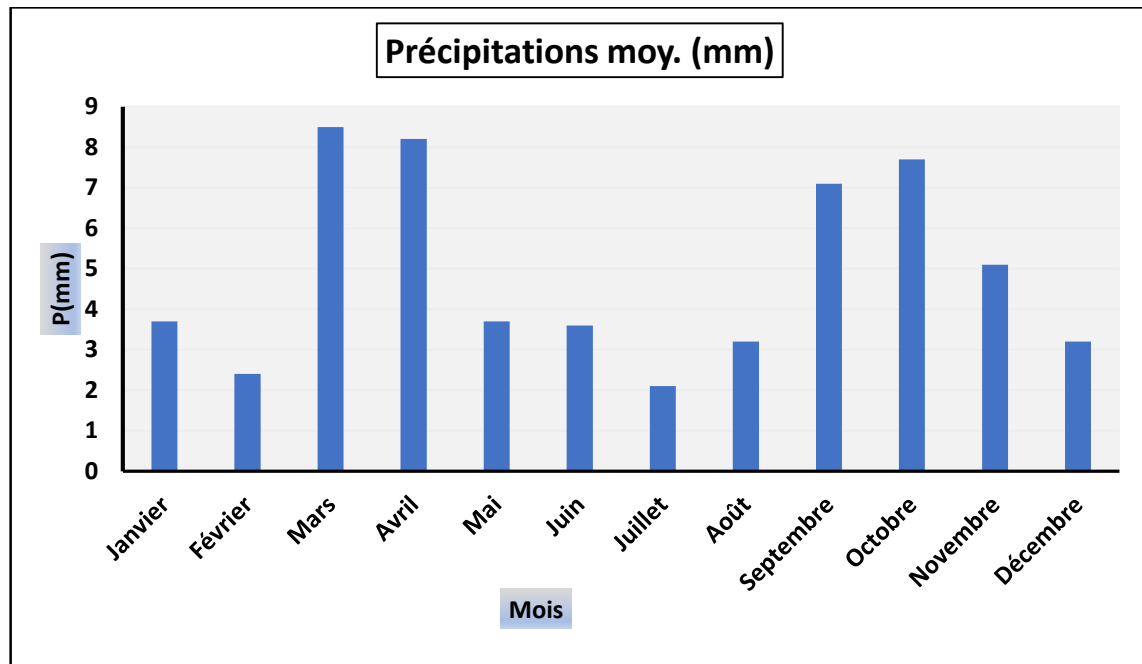


Figure I-6: Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).

I.5.4. Vents et variations climatiques :

Les vents à Ghardaïa jouent un rôle déterminant dans le climat local. La région est fréquemment exposée à des vents chauds et secs, notamment le sirocco, qui soufflent depuis le désert saharien. Ces vents contribuent à l'assèchement de l'air, à l'érosion éolienne, et influencent fortement la température ressentie et l'évaporation. La vitesse et la direction des vents peuvent varier selon les saisons, accentuant la variabilité climatique et la rigueur environnementale de la région (ANRH, 2019; ONM, meteomanz.com/, 2010, 2024).

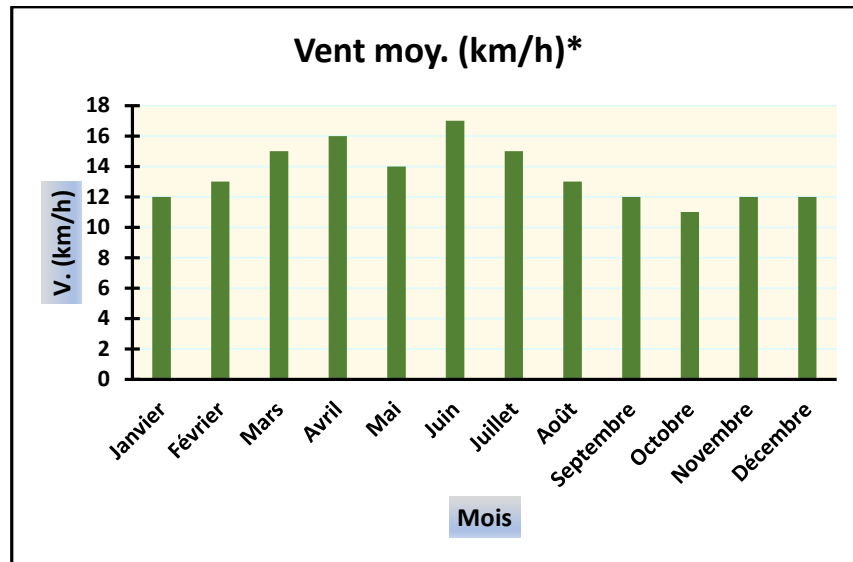


Figure I-7: Vents moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).

I.5.5. Humidité relative et climat de Ghardaïa :

La région de Ghardaïa est caractérisée par une humidité relative généralement basse, souvent inférieure à 40%. Cette faible humidité est due à l'air sec provenant du désert, ce qui accentue le stress hydrique sur les sols et la végétation. Une humidité réduite augmente également l'évaporation, impactant les ressources en eau disponibles. La variation saisonnière de l'humidité est peu marquée, mais les conditions restent majoritairement arides tout au long de l'année (ANRH, 2019; ONM, meteomanz.com/, 2010, 2024).

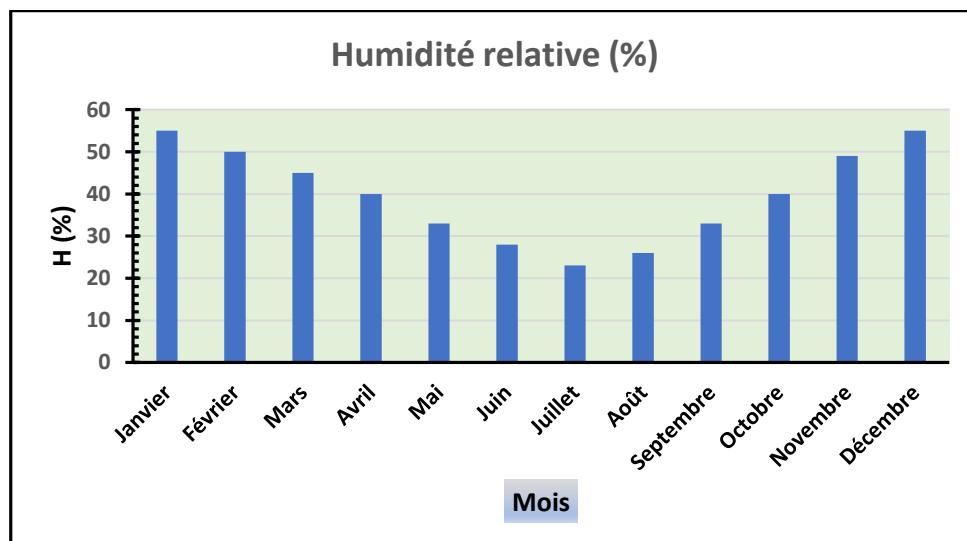


Figure I-8: : Humidité moyennes annuelles dans la région de Ghardaïa pour une décennale à partir de 2010 à 2025 (ONM, meteomanz.com/, 2010,2024).

I.5.6. Impact du climat sur les ressources en eau :

En raison du climat désertique sec de la région de Ghardaïa, le rechargement des nappes phréatiques se fait de manière très lente. Le taux d'évaporation élevé accentue les difficultés de gestion des ressources en eau, puisque une grande partie de l'eau s'évapore avant d'atteindre les aquifères. De plus, les changements climatiques potentiels, tels que l'augmentation des températures et la diminution des précipitations, risquent de compromettre la durabilité des ressources hydriques locales, rendant la gestion efficace des eaux souterraines encore plus critique (Saidani et al., 2023; Rahmani & Brahim, 2017).

I.5.7. Durabilité et adaptation au climat :

La région a besoin de stratégies efficaces de gestion de l'eau, incluant l'amélioration de l'irrigation, le renforcement de la recharge des nappes et l'usage de technologies modernes pour surveiller les effets du changement climatique. (Saidani et al., 2022; Baudron et al., 2024).

CHAPITRE II

Etude de milieu physique

II. Etude de milieu physique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous essaierons de faire une généralité sur l'eau afin d'aborder sa structure chimique et leur composition minérale et organique puis nous passons à leur cycle dans la nature afin de définir les trois principales directions (le ruissellement ; l'évapotranspiration et l'infiltration), ces directions conduisent l'eau vers la mer ou se ruisselle vers les dépressions naturelles où l'eau se repose superficiellement ou elle s'infiltre à travers les nappes souterraines. La pollution est l'une des plus grandes risques menaçants les ressources en eau, pour cela nous avons consacré une partie dans ce chapitre afin de montrer leurs conséquences négatives.

II.2. Structure de l'eau :

II.2.1. La molécule d'eau :

Elle est simple, elle est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène : sa formule chimique est H_2O . Chaque atome d'hydrogène est relié à l'atome d'oxygène par une liaison covalente O-H. Celle-ci est formé par la mise en commun de deux électrons - ils forment un doublet – l'un en commun de deux électrons – ils forment un doublet – l'un venant de l'oxygène, l'autre de l'hydrogène [M. Lamy1995]. Peut être représentée une molécule d'eau en trois dimensions sous la forme d'un tétraèdre déformé. Les deux liaisons présentes dans la molécule, $H - O - H$, constituée un angle de $104,5^\circ$ (au lieu de $109,5^\circ$ dans un tétraèdre) [L. Sigg, P. Behra, and W. Stumm2001].

II.3. Composition des eaux naturelles :

Les matières présentes dans l'eau peuvent être classées selon deux modes différentes :

- Suivant leur nature chimique : organique ou minérale.
- Suivant leur état physique : matières dissoutes, colloïdales ou en suspension [F. Rejsek 2002].

II.3.1. Matières minérales :

Ce sont essentiellement des composés ioniques, anions et cations, qui résultent de la dissolution des roches dans l'eau qui circule à leur contact.

L'eau contient également des gaz dissous qui ont une grande importance dans les phénomènes biologique ainsi que chimiques comme par exemple la corrosion [F. Rejsek 2002].

II.3.2. Matières organique :

Ce sont des composés du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote. Ces

matières se forment soit de l'érosion des sols, soit de la décomposition de matières animales ou végétales qui se décompose dans l'eau. Elles se décomposent en raison de son instabilité chimique et par l'action des microorganismes présents dans l'eau en formant des composés de plus en plus simples [F. Rejsek2002].

II.3.3. Matières dissoutes :

Ce sont des matières dispersées de forme homogène dans l'eau, faiblement polarisées ou ionisées. Elles sont soumises à des équilibres de dissolution qui dépend de la température et de la pression, ce dernier facteur étant très important pour les gaz.

En raison de leur état dissous, ces molécules sont difficiles à éliminer de l'eau à traiter par les procédés physiques classiques, décantation et filtration. Si leur élimination est nécessaire, par exemple pour les nitrates, il faudra recourir des méthodes chimiques ou biologiques [F. Rejsek2002].

II.3.4. Matières colloïdales :

L'état colloïdal est un état intermédiaire entre l'état dissous et la suspension. Les matières colloïdales sont composées d'éléments de petite taille chargés négativement, c'est ce qui cause qu'ils se repoussent et se répartissent de manière dispersée et désordonnée dans la masse liquide. De plus, il est difficile d'éliminer ces matières de l'eau à traiter en raison elles ne décantent pas de manière spontanée et sont peu retenues par les filtres. On doit utiliser des réactifs chimiques qui s'écartent les charges négatives superficielles et permettent leur agrégation.

Cette étape est appelée coagulation-floculation ; elle est suivie par une décantation pour éliminer les colloïdes, nommés floccs, qui peuvent alors décanter [F. Rejsek2002].

II.3.5. Matières en suspension :

Ce sont des particules solides de la taille supérieure à 10 μ m, qui se dispersent dans l'eau sans y être chimiquement liées. De ce fait, leur élimination est très simple car, si l'on fait reposer l'eau, elles se déposent de manière spontanée et peuvent être retirées de l'eau par des procédés physiques simples (décantation, filtration) [F. Rejsek2002].

II.4. Les propriétés de l'eau :

II.4.1. les propriétés physiques de l'eau :

L'eau possède plusieurs propriétés physiques, parmi lesquelles ses points de fusion et d'ébullition élevés, sa grande capacité calorifique et la densité. Le Tableau suivant montre les

propriétés physiques de l'eau :

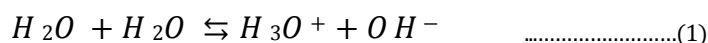
Propriétés	En comparaison avec d'autres liquides	Signification pour l'environnement
Densité	Maximum vers 4°C, détente lors des gelées	Difficultés en cas de gelées, donne lieu à des stratifications saisonnières
Point de fusion et d'ébullition	Exceptionnellement élevés	Possibilité d'eau sous forme liquide à la surface de la terre
Capacité calorifique	Capacité calorifique la plus élevée de toutes les fluides exceptions faite de NH_3	Tampon face aux températures extrêmes
Chaleur d'évaporation	Extrêmement forte	Tampon face aux températures extrêmes
Tension superficielle	Élevée	Importante pour la formation des gouttes dans les nuages et les pluies
Absorption lumineuse	Élevée dans le domaine des infrarouges et des UV, moins forte dans le domaine de la lumière visible	Importante pour la régulation de l'activité biologique (photosynthèse) et pour la température atmosphérique
Propriétés en tant que solvant	A cause de la propriété dipolaire, l'eau convient à la dissolution des sels (ions) et des molécules polarisées	Transport de substances dissoutes dans le cycle hydrologique et dans la biomasse

Tableau II 1: Les propriétés physiques de l'eau [J. A. C. Sgg2011]

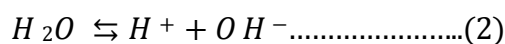
II.5. Propriétés Chimiques :

II.5.1. Dissociation ionique de l'eau:

Les associations par liaisons hydrogène est fortes dans l'eau, sont pour que certains atomes H sont liés à une molécule H_2O voisine, formant un ion hydronium H_3O^+ :



On représente ce phénomène par l'équation simplifiée [10] :

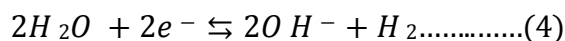
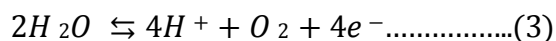


II.5.2. Solubilité des gaz dans l'eau :

La dissolution des gaz dans l'eau a un effet très important pour les eaux naturelles, que ces gaz soient indispensables à la vie aquatique comme l' O_2 ou le CO_2 ou qu'il s'agisse des gaz toxiques comme H_2S [G. Michard2002]. électrolytes, et les gaz dont la dissolution s'accompagne de véritables réactions chimiques (acide – base ou oxydo-réduction). Ces derniers sont généralement beaucoup plus solubles dans l'eau [B. Hasnia2018].

II.5.3. L'oxydo-Réduction :

Suivant les conditions expérimentales, l'eau peut participer, à des réactions d'oxydoréductions comme réaction possible :



- ✓ Le premier cas, l'eau est donneuse d'électrons, (réducteur).
- ✓ Le deuxième cas l'eau est accepteur d'électrons, (oxydante) [J. Monod1989].

II.5.4. Propriétés biologiques de l'eau :

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions propices au développement des êtres vivants. Il y a un cycle biologique, cycle à travers une série d'échanges. L'eau un élément majeur de la composition des organismes vivants [Z. KOUIDRI NEE BELALA2006].

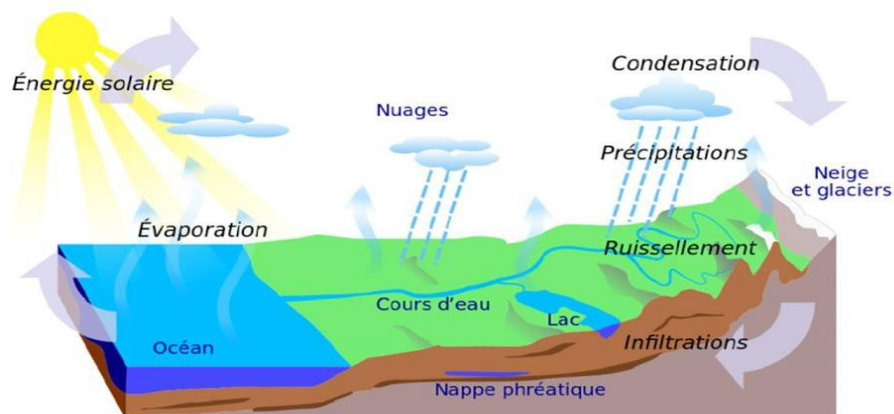
II.6. Cycle de l'eau dans la nature :

De l'océan à la terre, le cycle de l'eau est principalement lié au processus d'évaporation, qui génère de la vapeur d'eau qui se déplace vers les continents sous forme de pluie. Cette étape est particulière car elle ne transfère que de l'eau dans l'atmosphère. En fait, lors de l'évaporation, presque tous les minéraux restent dans l'océan. Cela conduit à une concentration des éléments minéraux dans l'eau de mer [A. Olivier2015].

L'eau retourne à l'océan par deux voies : les eaux de surface ou les eaux souterraines. En fait, ces deux voies sont liées entre elles, du fait des échanges entre rivières et aquifères en de nombreux points du parcours. Le sol joue un rôle important dans ce processus, car il redirige les flux d'eau dans trois directions :

- Dans la première direction : une partie de l'eau en surface s'écoulera vers les rivières, et ce phénomène s'appelle le ruissellement.
- Dans la seconde direction : Une partie va s'évaporer directement ou être absorbée par les plantes puis être rejetée dans l'atmosphère par transpiration, et le phénomène global est appelé évapotranspiration.

On distingue des gaz peu solubles qui donnent des solutions moléculaires, non Dans la troisième direction, l'eau résultante reste dans le sol et descend progressivement jusqu'aux eaux souterraines, ce phénomène est nommé infiltration [A. Olivier2015].



Figur II-1: : Cycle de l'eau.

II.7. Les sources naturelles de l'eau:

II.7.1.1 Eaux de pluie :

L'eau de pluie est caractérisée comme une eau de bonne qualité pour la consommation humaine. Il est très doux en raison de la présence d'oxygène et d'azote et de l'absence de sels dissous tels que les sels de magnésium et de calcium [R. Desjardins1988].

II.7.1.2 Eaux de mer :

L'eau de mer est une source d'eau brute qui n'est utilisée que lorsqu'il n'y a aucun moyen d'obtenir de l'eau douce. L'eau de mer se caractérise par de fortes concentrations de sels dissous dans celle-ci : c'est ce qu'on appelle sa salinité. La salinité de la plupart des eaux de mer varie de 33 000 à 37 000 mg/l [R. Desjardins1997].

II.7.1.3 Eaux superficielles :

La composition chimique des eaux de surface est liée à la nature du terrain que l'eau traverse au cours de son parcours à travers l'ensemble des bassins versants. Au cours de son parcours, l'eau dissout les différents éléments constitutifs de la terre ; par échange de la surface du sol. L'eau et l'atmosphère, l'eau chargée de gaz dissous (O_2 ; N_2 ; CO_2) [B. Hasnia2018].

II.7.1.4 Eaux souterraines :

Les eaux souterraines représentent environ 97 % du total des eaux douces continentales liquides, la nature géologique du terrain a une grande influence sur la composition chimique des eaux souterraines. L'eau est en contact avec la terre. Il stagne ou tourne : un équilibre

est atteint entre la composition de la terre et la composition de l'eau. L'eau de circulation dans les sols sablonneux ou granitiques est acide et peu minéralisée. L'eau qui circule dans un sol calcaire est du bicarbonate de calcium [B. Hasnia, C. J. M. M. S. T. T. Bosca2002] .

II.8. Pollution des eaux :

Depuis plus de cinquante ans, la pollution est l'un des plus grands danger, problèmes auxquels est confronté notre monde moderniste. La pollution est, la présence dans l'environnement de grandes quantités de produits dangereux, et toxique généralement crée par humain, dont les effets néfastes peuvent se faire durant de longues durées sur toute la planète. Cette pollution peut affecter l'eau, l'air, la terre et l'être vivant aussi. Les pollutions apparition

Actuellement d'origine, de nature, de forme et d'actions multiples et se révèlent comme un problème essentiel de notre temps[A. Boubryem and F. J. J. F. A. S. Derradji 2018].

II.8.1. Définition de la pollution de l'eau :

La pollution se définit comme la dégradation d'un milieu naturel par introduction d'un polluant. Avec des conséquences négatives pour l'environnement. Concrètement, pour une même substance, son caractère polluant sera plus ou moins élevé en fonction des quantités déversées dans le milieu et de la capacité de ce milieu à l'éliminer naturellement. En ce qui concerne l'eau, le milieu aquatique est pollué lorsque, sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation où qu'elle présente un danger pour l'environnement, ces milieux aquatiques sont les cours d'eau (les rivières) , les nappes souterraines, les mers, les lacs, les retenues d'eau, etc[F. Touhari 2015].

II.8.2. Tableau scientifique récapitulatif sur la pollution de l'eau:

Ce Tableau présente un résumé des différentes sources et types de pollution de l'eau, ainsi que leurs effets sur la santé humaine et l'environnement. Il inclut les références des auteurs ayant traité ces sujets dans leurs travaux respectifs :

Sujet	Détails	Références
Définition de la pollution de l'eau	La pollution de l'eau est la dégradation d'un milieu naturel par l'introduction de polluants, rendant l'eau impropre à l'utilisation.	F. Touhari, 2015
Sources de pollution	1. Pollution industrielle 2. Pollution urbaine 3. Pollution agricole 4. Pollution atmosphérique	A. Mawloud, 2013
Pollution industrielle	Provoquée par les rejets industriels (eaux usées, déchets solides, gaz). La pollution par des éléments toxiques est la plus grave.	A. Mawloud, 2013
Pollution urbaine	Résulte des activités domestiques (déchets ménagers), ainsi que des activités économiques et industrielles (matières organiques) en milieu urbain.	A. Mawloud, 2013
Pollution agricole	Résulte de l'utilisation d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires, pouvant polluer les eaux souterraines.	A. Mawloud, 2013
Pollution atmosphérique	Affecte les eaux de surface et souterraines, les principaux polluants atmosphériques sont : CO ₂ , CO, oxydes d'azote, plomb.	A. Mawloud, 2013
Polluants principaux	1. Polluants chimiques 2. Polluants physiques 3. Polluants microbiologiques	M. O. S. A. O. Kankou, 2004
Polluants chimiques	Résultent de l'entrée de substances indésirables dans l'eau, mesurées par des paramètres globaux (pH, conductivité) et spécifiques.	M. O. S. A. O. Kankou, 2004
Polluants physiques	Incluent les facteurs influençant l'état physique de l'eau comme la température, la conductivité, les solides dissous, et les rejets d'eau chaude.	M. O. S. A. O. Kankou, 2004
Polluants microbiologiques	Résultent de la présence de microorganismes pathogènes véhiculés par l'eau, responsables de nombreuses maladies hydriques.	M. O. S. A. O. Kankou, 2004
Effets de la pollution de l'eau sur la santé humaine	1. Calcium et magnésium : Problèmes rénaux et troubles digestifs à forte concentration. 2. Sodium et potassium : Risques d'hypertension.	F. Touhari, 2015
Effets environnementaux de la pollution	Perturbe l'équilibre biologique, rend l'eau impropre à la consommation humaine et industrielle, et peut polluer les nappes phréatiques.	L. Sofiane, 2009

Tableau II-1 : Tableau sur la pollution de l'eau

II.9. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine :

II.9.1. Critères de qualité des eaux destinées à la consommation humaine :

II.9.1.1 Paramètres organoleptiques :

✓ Couleur :

La couleur des eaux est en général, très transparente, sauf si les sont chargées de sels de fer, la coloration d'une eau est dite réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution.

Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration [B. Hasnia 2018, F. Touhari 2015].

✓ Odeur :

Les eaux sont, en générale, inodores si elles sont potables, Les odeurs proviennent, soit des produits chimiques, soit de matières organiques en décomposition, soit de protozoaires, soit d'organismes aquatiques. Ils peuvent être identifié par une odeur rappelant celle de l'hydrogène sulfuré provenant de la décomposition de matières organiques [F. Touhari2015, A. Mawloud 2013].

✓ Goût:

Le goût d'une eau dépend des sels et des gaz qu'elle contient en suspension ou en solution. Une eau potable de bonne qualité doit avoir une saveur faible et agréable; le goût de l'eau potable peut également être défini comme étant la sensation que provoquent des substances présentes dans l'eau dont les tensions de vapeur et l'odeur sont négligeables [T. F 1995 , F. Proulx, M. Rodriguez,2010].

II.9.1.2 Paramètres physiques :**a) Potentiel d'hydrogène (pH) :**

Le pH de l'eau est défini selon sa concentration en ions H^+ existant dans la solution. Il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu et renseigne sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau, le pH est acide dans les eaux des aquifères sableux ou granitique et alcalin dans les calcaires. De ce fait le pH est corrigé selon les cas par élimination du CO_2 dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée.

✓ Si la concentration H^+ est plus forte, **le pH sera < 7** et la solution sera dite «acide».

✓ Si la concentration H^+ est plus faible, **le pH sera > 7** et la solution sera dite «alcaline» ou «basique» [B. Hasnia 2018, F. Touhari 2015].

b) Température :

La température joue un rôle primordial sur la conductivité électrique, c'est-à-dire dans la solubilité des sels et surtout des gaz et dans la dissociation des sels dissous permettre de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, donc sur son origine après la détermination du pH [B. Hasnia 2018, F. Touhari 2015].

c) Conductivité :

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface, séparées l'une de l'autre de 1 cm. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. La conductivité est

également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente.

La conductivité est également un des moyens de valider les analyses physicochimiques de l'eau la conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Du point de vue qualité de l'eau, on a le classement suivant [B. Hasnia 2018, F. Touhari 2015] :

Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Qualité de l'eau
50 à 400	Excellente
400 à 750	Bonne qualité
750 à 1500	Médiocre mais eau utilisable
> à 1500	Minéralisation excessive

Tableau II-2:Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique [F. Touhari.2015]

d) Turbidité :

La turbidité est un caractère très important, car une eau susceptible d'être trouble peut être suspecte du point de vue bactériologique. Elle permet d'indiquer les informations visuelles de la couleur de l'eau. La turbidité existe à cause des particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Elle se mesure à l'aide d'un turbidimètre et peut être exprimée en : **NTU (Nephelometric Turbidity Unit)** [M. O. S. A. O. Kankou 2004].

e) Salinité

La salinité définie comme la concentration de la solution exprimée en grammes de sels par litre, et la salinité a de nombreuses origines: la roche mère, les eaux d'irrigation et les engrais [F. OUZAL 2005].

f) Résidus et Sels Totaux Dissous (TDS) :

La détermination du résidu sur l'eau non filtrée permet d'évaluer la teneur en matières dissoutes et en suspension d'une eau, c'est le résidu total. Si l'eau est filtrée préalablement à la mesure, le résidu correspond alors aux matières dissoutes. Le résultat obtenu est influencé par la température et la durée de la dessiccation [J. Rodier, B. Legube, and N. Merlet 2009].

II.9.1.3 Paramètres chimiques Paramètre de pollution :

II.9.1.3.1 Nitrite :

Les nitrites constituent une étape importante dans la métabolisation des composés azotés ; ils s'insèrent dans le cycle de l'azote entre l'ammoniac et les nitrates. Leur présence est due, soit à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac, soit à la réduction des nitrates. Ils ne représentent qu'un stade intermédiaire et sont facilement oxydés en nitrates (par voie chimique et bactérienne). Des

concentrations élevées en nitrites, témoignent souvent de la présence de matières toxiques [F. Touhari 2015].

II.9.1.3.2 Azote ammoniacal (ou Ammonium) :

C'est un bon indicateur de la pollution des cours d'eau par les effluents urbains. Dans les eaux superficielles, il provient de la matière organique azotée et des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère [M. Makhoukh, M. Sbaa, A. Berrahou 2011].

II.9.1.3.3 Phosphates :

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. Les composés phosphorés qui répondent au test spectrophotométrique sont considérés comme étant des ortho-phosphates. L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable et minéralisation. Chaque fraction de phosphore en solution ou en suspension peut être séparée analytiquement en ortho-phosphates phosphore hydrolysable et phosphore organique [B. Hasnia 2018].

✓ Ortho-phosphates :

Le phosphore est généralement présent sous forme d'ortho-phosphate, les principales sources sont :

- ✓ Les eaux usées et les fosses septiques à partir des phosphates organiques dans les déchets corporels et les résidus alimentaires.
- ✓ Détergents et engrais.

Les décharges industrielles, les phosphates sont ajoutés à l'eau pour empêcher la formation d'oxydes de fer ou de carbonates de calcium [S. ZEREG 2019].

II.9.1.3.4 Minéralisation globale :

II.9.1.3.4.1 Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+}):

Le calcium Ca^{2+} et le magnésium Mg^{2+} sont présents dans toute sortes de roches (sédimentaires, ignées, cristallines). Ils sont très solubles et sont donc largement représentés dans la plupart des eaux [F. Touhari 2015].

II.9.1.3.4.2 Sodium (Na^{+}) et Potassium (K^{+}):

Le Sodium est un élément très répandu dans la nature, on le trouve dans les feldspaths, les évaporites et les argiles, le Sodium est très mobile souvent associé aux chlorures et aux bromures [F. Touhari 2015].

Le potassium (K^{+}) est assez abondant sur terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombinaison dans les sols (sur les argiles notamment). Les sources principales de potassium sont les roches cristallines (mais dans des minéraux moins altérables

que ceux qui contiennent du sodium), les évaporites et les argiles [F. Touhari 2015].

II.9.1.3.4.3 Chlorures (Cl^-) :

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution.

Les teneurs en chlorures des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés (roches magmatiques contenant des minéraux de chlore) [F. Touhari 2015].

II.9.1.3.4.4 Sulfates (SO_4^{2-}):

Les origines des sulfates dans les eaux sont variées. Les origines naturelles sont l'eau de pluie et la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse ($CaSO_4$), la pyrite (FeS) et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite). Les origines anthropiques sont la combustion de charbon et de pétrole qui entraîne une production importante de sulfures (qu'on retrouve dans les pluies), et l'utilisation d'engrais chimiques [F. Touhari 2015].

II.9.1.3.4.5 Dureté totale TH:

La dureté totale d'une eau est le produit de la présence des sels dissouts de calcium et de magnésium qu'elle contient, on distingue deux types de duretés : une dureté dite carbonatée qui correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg et une dureté non carbonatée produite par les autres types de sels.

La dureté se mesure par le titre hydrotimétrique exprimé en °F (degré français) ; 1°F correspond à 10 mg de carbonate de Ca dans 1 litre d'eau. Des valeurs faibles correspondent à des eaux douces, dont le TH est compris entre 50 et 120 mg/l. Les eaux dures ont un titre compris entre 250 et 320 mg/l [S. ZEREG 2019, B. Hasnia 2018].

Ce Tableau présente la classification de la qualité de l'eau en fonction de la dureté exprimée en degrés français (°F). Il indique les différentes catégories allant de l'eau très douce à l'eau très dure, ce qui permet d'évaluer l'aptitude de l'eau à divers usages.

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

Tableau II-3: Classification des eaux en fonction de leur dureté [B. Hasnia 2018].

II.9.1.3.5 Titre Alcalimétrique complet TAC :

Il contribue à déterminer de la teneur en hydrogénocarbonates (HCO^-). L'alcalinité exprime la capacité de neutralisation des acides présents dans l'eau. Le bicarbonate est présent dans l'eau en raison de la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie ...) par des eaux chargées en gaz carbonique. Leurs concentrations dans les eaux naturelles comptent sur essentiellement de la température ambiante, du pH de l'eau, de la concentration en gaz carbonique dissous et de la lithologie [A. Zidi and M. M. Senoussi 2021].

II.9.1.3.4.6 Paramètres indésirables

II.9.1.3.4.7 Fer :

Le fer peut se rencontrer dans l'eau sous différentes formes. Dans les conditions habituelles, c'est-à-dire pour un pH variant entre 4,5 et 9, le fer soluble présent est généralement à l'état ferreux. Si le milieu est réducteur comme dans beaucoup d'eaux souterraines.

Le fer ferrique n'est soluble d'une façon significative qu'à des $pH < 3$. Les normes de l'O.M.S. ont retenu pour la potabilité la valeur limite de $0,3 \text{ mg/l}$ [J. Rodier, B. Legube, and N. Merlet 2009].

II.9.1.4 Paramètres bactériologiques :

Le terme « coliforme » correspond à des organismes non sporogènes, gram négatifs, oxydase négatifs, facultativement anaérobies, capables de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface possédant des activités inhibitrices de croissance similaires et capables de fermenter le lactose (et le mannitol) avec production d'acide et d'aldéhyde en 48 heures, à des températures de 35 à 37°C [J. Rodier, B. Legube, and N. Merlet 2009] .

Ce Tableau présente les différents types de bactéries indicatrices de contamination

fécale dans l'eau, telles que les coliformes fécaux, les coliformes totaux, *Escherichia coli* et les streptocoques fécaux, avec leurs caractéristiques et leur rôle dans l'évaluation de la qualité de l'eau.

Polluant	Description	Références
Coliformes fécaux	Sous-groupe des coliformes totaux, très proche de <i>Escherichia coli</i> (E. coli). Leur présence dans l'eau indique une contamination fécale par fumier ou eaux usées à proximité.	A. Mawloud, 2013
Coliformes totaux	Bactéries en forme de bâtonnets, aérobies ou anaérobies facultatives. Leur présence dans l'eau peut indiquer une contamination fécale ou une infiltration d'eau de surface.	A. Mawloud, 2013
Escherichia coli (E. coli)	Coliformes thermo-tolérants qui produisent de l'indole et sont utilisés comme indicateurs de la qualité de l'eau.	J. Rodier, B. Legube, N. Merlet, 2009
Streptocoques fécaux	Indicateurs de pollution fécale, considérés comme témoins de contamination par des matières fécales, leur habitat naturel étant fécal.	A. Mawloud, 2013

Tableau II-4:types de bactéries indicatrices de contamination fécale dans l'eau

II.10. Les normes de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine:

II.10.1. Normes l'OMS :

L'OMS travaille depuis de nombreuses années pour examiner et évaluer les informations sur les aspects sanitaires liés à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine avant d'établir à ce sujet un document à caractère consultatif : Guidelines for Drinking-water Quality. la première publication de ce rapport date de 1958 et il est régulièrement mis à jour (dernière version :1996).

Les valeurs des différents paramètres de qualité des eaux sont, à titre de recommandation, sous forme de valeurs guides (VG) qui correspondent à la concentration à laquelle l'eau ne présente pas de risque sensible pour la santé humaine.

Ces recommandations concernent un grand nombre de paramètres mais n'ont pas de caractère contraignant ; ainsi, chaque pays pourra se servir de ces recommandations pour mettre en place sa propre législation [F. Rejsek, J.-M. Puslecki 2002]. L'Algérie a ses propres normes sont les normes algériennes (NA). Le Tableau suivant présenté les normes OMS et NA de l'eau potable :

Ce Tableau présente les paramètres de la qualité de l'eau, en détaillant les valeurs de référence pour différents aspects physiques, chimiques et bactériologiques. Il compare les valeurs acceptables (N.A) et les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour chaque paramètre afin d'évaluer la sécurité et la potabilité de l'eau

	Paramètres	Symbole	Unité	N.A	OMS
Paramètres physiques	Potentiel d'hydrogène	pH	/	$\geq 6,5$ et ≤ 9	6,5 - 8,5
	Température	/	°C	25	25
	Conductivité	/	$\mu S / c m$	2800	1400
	Turbidité	/	NTU	5	5
	Salinité	/	/	/	/
	Sels Totaux Dissous	TDS	mg/l	/	1000
Paramètres chimique	Ammonium	NH_4^+	mg/l	0,5	0,5
	Nitrites	NO_2^-	mg/l	0,2	0,5
	Ortho-phosphates	PO_4^{3-}	mg/l	/	0,5
	Calcium	Ca^{2+}	mg/l	200	75-200
	Magnésium	Mg^{2+}	mg/l	/	150
	Dureté totale	TH	mg/l	500	100-500
	Sodium	Na^+	mg/l	200	200
	Potassium	K^+	mg/l	12	12
	Chlorures	Cl^-	mg/l	500	250
	Sulfates	SO_4^{2-}	mg/l	400	250
	résidu sec	/	mg/l	1500	1000
	Nitrates	NO_3^-	mg/l	50	50
	Titre Alcalimétrique complet	TAc	mg/l	500	500
	Fer	Fe^{2+}	mg/l	0,3	0,3
Paramètres bactériologique	Coliformes totaux	/	nb/100ml	0	10
	<i>Escherichia coli</i>	/	nb/100ml	0	0
	<i>Streptocoque fécaux</i>	/	nb/100ml	0	0
	Spores A.S.R	/	nb/20ml	0	0

Tableau II-5 : Les normes N.A et OMS [J. Rodier, B. Legube, and N. Merlet2009, sgg2011- B. Zineddine, Z. Mehdadi, H. Benhassaini 2015]

II.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu que l'eau a une structure simple, deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Les matières composantes ont deux origines minérale et organique, Ces matières présentes dans l'eau sous trois états, en suspension ; colloïdale et dissout.

Nous avons vu aussi qu'il existe quatre sources naturelles de l'eau dans le globe terrestre où cette eau se circule sous trois directions, une partie de l'eau en surface s'écoulera par ruissellement vers les rivières pour atteindre les mers et les océans, la seconde partie va s'évaporer directement ou être absorbée par les plantes puis être rejetée dans l'atmosphère par transpiration, la dernière partie reste dans le sol et descend progressivement par infiltration jusqu'aux eaux souterraines.

La pollution des eaux est une préoccupation majeure des pays par ce qu'elle entrave son développement. La pollution est définie comme la dégradation d'un milieu naturel par introduction d'un polluant engendre des conséquences négatives. Nous avons vu qu'il y a quatre origines de la pollution ; industrielle ; urbaine ; atmosphérique et agricole.

L'eau destinée à la consommation humaine doit avoir des critères organoleptiques ce qui veut dire l'eau potable doit être d'abord sans gout désagréable sans couleur ou limpide et sans odeur, puis il y a d'autre critère physico-chimiques et bactériologiques mentionnées se forme des normes de potabilité selon l'OMS.

CHAPITRE III

Matériels et Méthodes

III. Matériels et Méthodes

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons réalisés un ensemble d'analyses physico-chimiques et microbiologiques des eaux souterraines pour 57 points dans différentes communes de la wilaya de Ghardaïa, ou nous avons présentés toutes les méthodes depuis le prélèvement de l'échantillon jusqu'à l'obtention des résultats.

La partie expérimentale de ce travail a été réalisée au niveau de laboratoire de l'algérienne des eaux (A.D.E) unité de Ghardaïa.

III.2. Echantillonnage de l'eau :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est un processus délicat à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc.). Puisque dans la plupart des cas le responsable du prélèvement n'est pas l'analyste, il convient que le préleveur doit avoir une connaissance précise des conditions d'échantillonnage et de leur importance pour la qualité des résultats analytiques (Rodier et al., 2009).

En général, il est nécessaire de mettre en place une organisation structurée, qui a un personnel qualifié, pour développer une méthodologie adaptée à chaque cas, de procéder à un choix judicieux des points de prélèvements et utilisation d'équipements appropriés. Les erreurs susceptibles de rendre difficile l'interprétation des résultats sont plus souvent liés à un échantillonnage non satisfaisant qu'à des erreurs analytiques proprement dites. En pratique, le préleveur évitera de constituer un échantillon moyen s'étalant sur plus de 24hr (Rejsek, 2002).

Concernant ce travail, Les échantillons des eaux de puits ont été prélevés à partir de différentes communes de la wilaya de Ghardaïa (57 échantillons) destinés aux analyses physico-chimiques et bactériologiques effectuées au niveau de laboratoire de (ADE) Ghardaïa pendant les années 2021 à 2025.

III.3. Mode de prélèvement :

Le mode de prélèvement variera suivant l'origine de l'eau aussi suivant la nature des analyses « physico-chimiques ou bactériologique » (Hasnia, 2018). Dans notre travail, les échantillons sont prélevés à partir de robinets spéciaux pour prélever de l'eau de forage, et le processus suit les étapes suivantes :

- a- Utiliser des bouteilles stériles fournies par le laboratoire et laisser couler l'eau du robinet grand ouvert pendant au moins 30 secondes avant de prélever l'échantillon, ou pendant deux ou trois minutes, selon la longueur de la conduite d'eau.
- b- Ensuite on lave le flacon plusieurs fois puis on prélève l'échantillon et fermer bien la bouteille pour éviter la contamination, les flacons sont étiquetés systématiquement en montrant plusieurs paramètres sont relevés sur site: l'origine de l'eau, l'adresse, lieu du prélèvement et la date de prélèvement
- c- Les échantillons sont placés dans des glacières et envoyer l'échantillon rapidement au laboratoire.

III.3.1. Conservation des échantillons :

Le processus de conservation permet de préserver l'intégrité des échantillons prélevés entre le moment de l'échantillonnage et celui de l'analyse en laboratoire. Cette étape est nécessaire car plusieurs paramètres peuvent subir des modifications physiques ou des réactions chimiques dans le récipient, ce qui altère la qualité originale de l'échantillon. Afin d'obtenir des analyses qui représentent le plus fidèlement possible les conditions du cours d'eau, une conservation physique ou chimique des échantillons doit être effectuée (OMS, 2017).

III.3.2. Principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau :

- 1) Identité du préleveur.
- 2) Date et heure du prélèvement.
- 3) Particulier ou autorité demandant l'analyse.
- 4) Motif de la demande (analyse initiale, contrôle périodique, pollution intoxication, épidémie...).
- 5) Usage de l'eau (boisson, lavage, abreuvement, industrie...).
- 6) Ville ou établissement que l'eau alimente.
- 7) Nom du point d'eau et localisation précise.
- 8) Origine de l'eau (source, puit, forage, rivière...).
- 9) Température de l'eau et celle de l'atmosphère (conditions météorologiques).
- 10) Débit approximatif (*litre/mi n u t e*).
- 11) Nature géologique des terrains traversés (Hasnia, 2018).

III.4. Méthodes et techniques d'analyses

III.4.1. Mesures in situ

Les mesures effectuées sur le terrain concernent les paramètres physiques en raison de leurs variations rapides dans le temps. Celles-ci sont réalisées à l'aide d'un multi-paramètre (Multi 3620IDS). Les paramètres mesurés sont la température, la salinité, la conductivité électrique, le pH et les solides dissous totaux (TDS).

III.4.2. Analyses en laboratoire

Les analyses physico-chimiques des échantillons d'eau ont été effectuées au sein des laboratoires de l'Algérienne des Eaux (ADE) de Ghardaïa. En raison du nombre élevé de forages répartis à travers le territoire de la wilaya, le laboratoire procède au prélèvement des échantillons deux fois par an, conformément au programme de surveillance de la qualité de l'eau. Toutefois, des analyses exceptionnelles peuvent être réalisées en cas de nécessité urgente, notamment en présence d'une pollution suspectée, d'une plainte des usagers, ou dans le cadre du suivi sanitaire en période de risque épidémiologique.

Cette stratégie vise à garantir la conformité de l'eau aux normes de potabilité en vigueur, et à assurer une protection sanitaire optimale de la population.

III.4.3. Choix des points de prélèvement

Les points de prélèvement ont été sélectionnés en fonction de la proximité géographique entre certaines communes de la wilaya de Ghardaïa, ainsi que de leur appartenance au même bassin versant.

Il s'agit notamment des communes de Dhaïa Ben Dahaoua, Ghardaïa, Bounoura et El Atteuf. Ce choix permet de mener une étude comparative et analytique des variations spatiales des paramètres physico-chimiques de l'eau, dans un contexte hydrogéologique relativement homogène.

L'objectif est d'identifier d'éventuelles différences locales dans la qualité des eaux souterraines, tout en tenant compte de facteurs environnementaux, anthropiques et géologiques influençant chaque zone. Ainsi, sur un total de 67 forages recensés dans la zone d'étude, 57 disposent d'échantillons d'eau enregistrés et archivés dans les registres officiels.

III.4.4. Les paramètres d'analyse d'eau :

Les analyses ont été réalisées au sein du laboratoire d'Algérienne Des Eaux (A.D.E) de Ghardaïa, les paramètres d'analyse d'eau sont :

Ce Tableau présente les paramètres utilisés pour évaluer la qualité de l'eau, classés en trois catégories : physiques (comme la température et la conductivité), chimiques (tels que le pH, les nitrates et les sels dissous), et bactériologiques (comme les coliformes et *Escherichia coli*), permettant ainsi d'analyser la potabilité et l'impact environnemental de l'eau

Les paramètres physiques	Les paramètres chimiques		Les paramètres bactériologiques
	Minéralisation Globale	Paramètres indésirables et de pollution	
La température pH Conductivité Turbidité T.D.S Salinité	Dureté Totale (TH) Titre alcalin complet (TAC) Bicarbonate (HCO_3^-) Calcium (Ca^{2+}) Magnésium (Mg^{2+}) Sodium (Na^+) Potassium (K^+) Chlorures (Cl^-) Sulfate (SO_4^{2-})	Ammonium (NH_4^+) Nitrate (NO_3^-) Nitrite (NO_2^-) Ortho-phosphate (PO_4^{3-}) Fer (Fe^{2+})	Coliformes totaux <i>Escherichia coli</i> <i>Streptocoque fécaux</i> Spores A.S.R

Tableau III-1:les paramètres d'analyse d'eau

III.4.5. Analyse physico-chimiques et microbiologiques :

III.4.5.1 Mesure des paramètres physiques :

a) La température (T):

La mesure de la température a été effectuée sur le terrain. Cette dernière mesure doit s'accompagner des précautions habituelles en évitant le rayonnement direct du soleil et l'influence de la chaleur dégagée par l'opérateur (Rodier et al., 2009).

Mode opératoire :

➤ La mesure de la température a été effectuée en plongeant immédiatement le thermomètre dans le flacon d'eau à analyser (Rodier et al., 2009).

b) Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH-mètre est l'appareil le plus utilisé pour la mesure du pH.

- Mode opératoire :
 - Allumer le pH Mètre.
 - Rincer l'électrode avec de l'eau distillée.
 - Rincer l'électrode dans l'échantillon puis lire la valeur du pH directement à température stable

(Rodier et al., 2009).

- ❖ Après chaque détermination du pH, on retire l'électrode, on la rince et à la fin de l'expérience, on la laisse tremper dans l'eau distillée.

c) La Conductivité électrique:

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm . La conductivité électrique a été déterminée par un conductimètre à électrode (Rodier et al., 2009).

d) La salinité, taux de minéralisation total (TDS) :

Pour mesurer ces paramètres, on utilise le même appareil : le conductivité-mètre. L'analyse est effectuée par immersion directe de l'électrode dans les flacons porteurs d'échantillons (sans oublier de rincer rigoureusement l'électrode après chaque mesure). Les résultats sont affichés directement dans l'appareil.

- Salinité (%)
- TDS (mg/l)

e) La turbidité :

La turbidité d'une eau est réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matière non dissoute. Pour mesurer la turbidité on utilise turbidimètre et de cuvette d'évaluation de la transparence constituée d'une cuvette de verre incolore de 50 mm , de diamètre (Rodier et al., 2009).

III.4.6. Analyse des paramètres chimiques :

III.4.6.1 Dosage des cations :

Détermination de l'azote Ammoniacal (NH^+):

• Principe :

- Mesure spectrométrique à environ 655 nm du composé bleu formé par réaction de l'ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite en présence de nitroprussiate de sodium (Rodier et al., 2009).
- Réactifs :
 - Réactif coloré.
 - Solution de Dichloroisocyanurate de sodium (Rejsek et al., 2002).

Détermination du Fer :

- Principe :
 - Addition d'une solution de phénantroline-1.10 à une prise d'essai et mesurage photométrique du complexe rouge- orange à une longueur d'onde de 510 nm .
 - Le complexe fer (II- phénantroline-1.10 est stable dans l'intervalle de pH de 2.5 à 9 et l'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité du fer (Rejsek et al., 2002).
 - **Réactifs :**
 - Solution de chlorhydrate hydroxylamine.
 - Solution tampon acétate.
 - Solution de phénantroline (Rejsek et al., 2002).

Dosage de Sodium (Na^+) et de Potassium (K^+) :

- Principe:
 - La photométrie de la flamme est un des procédés les plus rapides et sensibles connus aujourd'hui pour le dosage des éléments alcalins et alcalino – terreux. Les éléments à analyser (sodium, potassium lithium, calcium etc. ...) sont généralement sous forme de sels. L'analyse se fait en partant de leurs solutions (Rodier et al., 2009).
 - **Réactifs :**
 - Acide nitrique.
 - Solution étalon de sodium ou de potassium à 1 g/l .
 - Solution étalon de potassium à 1 g/l (Rodier et al., 2009).

La dureté totale ou degré hydrométrique (TH) :

- Principe :
 - La dureté totale détermine principalement la concentration en calcium et du magnésium dissous, elle est exprimée en degré Français ($^{\circ}F$) (Rodier et al., 2009).
- Réactifs :
 - Sel de sodium de mordant noir.
 - Solution tampon (pH= 10).
 - Solution d'EDTA (Rejsek et al., 2002).

Dosage des ions Calcium (Ca^{2+}):

Principe :

- Titration des ions calcium avec une solution aqueuse de l'EDTA à un pH compris entre 12 et 13. L'indicateur utilisé est le murexide, qui forme un complexe rose avec le calcium. Lors du titrage, l'EDTA réagit avec les ions calcium, l'indicateur vire alors de la couleur rose à la couleur violet (Rejsek et al., 2002).

- **Réactifs**

- Hydroxyde de sodium, solution 2 N .
- EDTA solution titrée 0,01 mol/l .
- Murexide (indicateur) (Rejsek et al., 2002).

Dosage des ions Magnésium (Mg^{2+}):

le Mg^{++} peut être estimé par la différence entre la dureté totale et le calcium (RODIER et al., 2009).

III.4.7. Paramètres de la pollution :

NH_4 , NO_2^- , NO_3^- et PO_4^{3-} sont analysés par spectrophotomètre

III.4.7.1 Dosage des anions :**Dosage des Nitrites (NO_2^-) :****Principe :**

- Réaction des ions nitrites présents dans une prise d'essai, à pH 1,9 avec le réactif amino-4 benzène sulfonamide en présence d'aide ortho phosphorique pour former un sel diazoïque qui forme un complexe de coloration rose avec le dichlor-hydrate de N-(naphtyl- 1) diamino- 1,2 éthane (ajouter avec le réactif amino-4 benzène sulfonamide) mesurage de l'absorbance à 540 nm (Rejsek et al., 2002).

Dosage des Nitrates (NO_3^-) :**Principe :**

- En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage spectrométrique (Rejsek et al., 2002).

Réactifs :

- Solution de salicylate de sodium.
- Solution d'hydroxyde de sodium.

- Acide sulfurique H_2SO_4 concentré.
- Tartrate double de sodium et de potassium (Rejsek et al., 2002).

Dosage des Sulfates (SO_4^{2-}):

Principe :

- Les ions sulfates sont précipités et pesés à l'état de sulfate de baryum suivant la réaction (Rejsek et al., 2002):



Réactifs :

- Solution stabilisante.
- Solution de chlorure de baryum ($BaCl_2$) à 0.01N (Rejsek et al., 2002).

Détermination du phosphore (P) et ortho-phosphate (PO_4^{3-}):

Principe :

4

- C'est une réaction des ions ortho-phosphates avec une solution acide contenant des ions molybdate et d'antimoine pour former un complexe d'antimonyl-phosphomolybdate (Rejsek et al., 2002).

Réactif :

- Solution molybdate acide.
- Acide ascorbique (Rejsek et al., 2002).

Détermination des Chlorures (Cl^-):

- Principe :
 - Réaction des ions chlorures avec des ions argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition d'un petit excès d'ions argent et formation du chromate d'argent brun-rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés comme indicateur. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage. Durant le titrage, le pH est maintenu entre 5 et 9.5 afin de permettre la précipitation (Rejsek et al., 2002).
- Réactifs :
 - Solution de nitrate d'argent ($AgNO_3$).
 - Solution d'indicateur de chromate de potassium (K_2CrO_4) (Rejsek et al., 2002).

Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC) :

Principe :

- Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré (Rodier et al., 2009).

Réactifs

- Acide chlorhydrique.
- Solution de vert de bromocrésol (Rodier et al., 2009).

III.5. Evaluation de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine:

III.5.1. Les indices d'évaluation de qualité des eaux :

III.5.1.1 La balance ionique :

L'étude de la fiabilité des données a consisté d'une part à une vérification du bilan ionique. Cette vérification a été précédée d'une analyse des ions majeurs impliqués dans l'appréciation du bilan ionique. Sachant que l'analyse chimique de l'eau n'est représentative que lorsque le bilan ionique est inférieur ou égal à 10%, les balances ioniques ont été systématiquement vérifiées pour l'ensemble des échantillons analysés. L'erreur sur la balance ionique (BI) est donnée en pourcentage et calculée par la relation suivante (Rodier et al., 2009):

$$\text{Ionic balance (\%)} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \dots \dots \dots (5)$$

Avec :

BI : balance ionique exprimée, en (%) ;

- $\sum \text{Cations}$: somme des concentrations des cations en $m \text{ éq } / l$.
- $\sum \text{Anions}$: somme des concentrations des anions en $m \text{ éq } / l$.

On peut considérer une analyse comme :

- excellent lorsque $BI \leq 5\%$;
- acceptable lorsque $5\% < BI < 10\%$;
- douteuse lorsque $BI \geq 10\%$ (OMS, 2017).

III.5.1.2 Indice de qualité des eaux IQE :

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une expression numérique utilisée pour évaluer la qualité globale de l'eau à partir d'une grande quantité de données et il est facilement compris par les gestionnaires et décideurs. Cet indice est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales ou nationales. L'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.).

Cet indice est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique pondéré [Brown, Deininger,

1970- Mark, Adadow, 2010]. Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (W_i), spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée selon la formule suivante :

$$W_i = \frac{K}{S_i} \dots \dots \dots (6)$$

- k : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}} \dots \dots \dots (7)$$

- n : nombre de paramètres.
- S_i : valeur maximale de la norme standard des eaux étudiées (Norme OMS de qualité des eaux) de chaque paramètre en mg/l sauf pour le pH, la $T^\circ C$ et la conductivité électrique.

Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (Q_i) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par 100 comme dans la formule suivante :

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \dots \dots \dots (8)$$

- Q_i : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre.
- C_i : la concentration de chaque paramètre en mg/l .

Finalement l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots (9)$$

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau IQE (Tab.14).

Ce Tableau classe la qualité de l'eau selon l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) et indique les types d'eau correspondants ainsi que leurs usages possibles. Il permet d'évaluer rapidement si l'eau est adaptée à la consommation humaine, à l'irrigation ou à un usage industriel, et souligne la nécessité d'un traitement lorsque la qualité est insuffisante

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0-25	Excellente qualité	Eau potable ; irrigation et industrie
>25-50	Bonne qualité	Eau potable ; irrigation et industrie
>50-75	Mauvaise qualité	irrigation et industrie
>75-100	Très Mauvaise qualité	irrigation
>100	Eau non potable	Traitement approprié requise avant utilisation

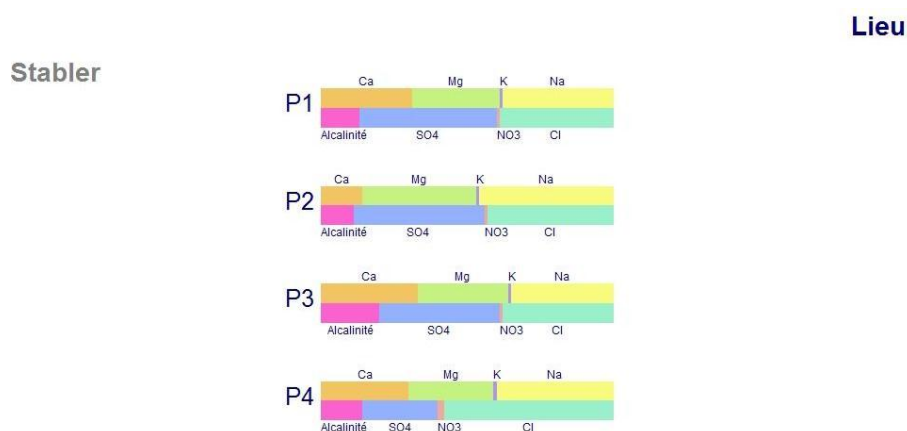
Tableau III-2: Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE [Chatterjee, Raziuddin ,2002- Aher, Malwade ,2016.].

III.5.1.3 Les faciès chimiques de l'eau :

Il y a plusieurs diagrammes qui déterminer la faciès chimique de l'eau. Nous distinguons Stabler, Piper et Schoeller-Berkaloff.

III.5.1.4 Diagramme de Stabler :

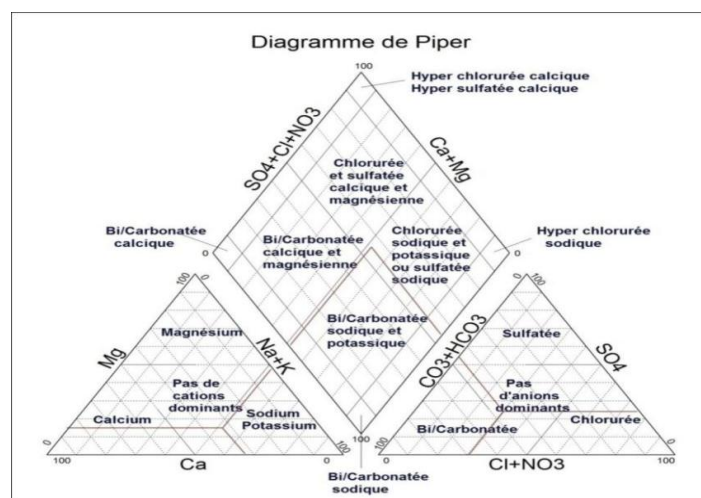
Ce diagramme est très utile pour l'étude des équilibres carbonatés. Il permet de représenter très rapidement l'alcalinité, l'alcalinité résiduelle calcite et les alcalinités résiduelles généralisées. On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant (Rodier et al., 2009).



Figur III-1: Diagramme de Stabler

III.5.1.5 Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper employer les principaux éléments pour représenter les différents faciès de l'eau souterraine. Le diagramme de Piper permet la représentation des anions et des cations sur deux triangles définis dont les côtés montrent les teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport à la somme de ces ions (cations du triangle de gauche et anions du triangle de droite). Le diagramme de Piper est bien adapté pour l'étude comparative d'un nombre important d'échantillons [ZEREG,2019, Menet-Nedelec, 2019].



Figur III-2: Diagramme de piper

III.5.1.6 Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller est un diagramme semi-logarithmique utilise des concentrations des principaux constituants ioniques dans l'eau (SO_4 , HCO_3 , Cl , Mg , Ca , Na/K) en équivalents par million par kg de solution (meq/kg). Le diagramme représenté les concentrations de chaque ion dans chaque échantillon par des points sur six lignes équidistantes et les points sont reliés par une ligne (ZEREG,2019).

Le diagramme de Schoeller est bien adapté à la comparaison d'échantillons de faciès identique mais différents par leur degré de dilution et permet d'obtenir la qualité chimique des eaux [Menet- Grouhel-Pellouin,2019, Amrani, Hinaje2014].



Figur III-3: Diagramme de Schoeller

III.5.2. Logiciels de traitement des résultats :

Pour interpréter les résultats d'analyses, nous avons utilisé les logiciels suivants :

III.5.2.1 Logiciel diagramme :

Nous avons utilisé le logiciel d'hydrochimie diagramme version 6.48 qui permet de créer en particulier les diagrammes de Piper et Schoeller, et de classer les eaux en faciès chimique et en classe d'eau potable et non potable.

III.5.2.2 Logiciel Arc gis :

Arc gis est l'un des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales (Arc:Map,).

III.6. Méthodes statistiques

III.6.1. la statistique descriptive.

Cela comprend :

- Le calcul de la moyenne
- Le calcul de l'écart-type
- La détermination de la valeur minimale et maximale
- Le calcul du coefficient de variation

Ces indicateurs sont utilisés pour décrire et résumer les caractéristiques des données relatives à la qualité des eaux souterraines, comme la dispersion des valeurs autour de la moyenne et le degré de variation relative entre les échantillons. Toutes ces opérations reposent sur des formules statistiques de base, universellement reconnues dans les études hydrogéochimiques

III.6.2. ANOVA :

analyse de variance (ANOVA) pour vérifier si les moyennes des groupes proviennent d'une même population. L'ANOVA a été suivie du test de Tukey, appliqué à un niveau de probabilité de $p = 0,05$ pour tester les différences significatives entre les moyennes.

III.7. Conclusion :

Les analyses physico-chimiques et bactériologiques, effectuées au niveau de laboratoire de (ADE) de Ghardaïa ont pour but de suivre l'évolution des paramètres des eaux destinée à consommation humaine. Ces paramètres sont des paramètres physiques (pH, conductivité

électrique. etc.), des paramètres chimiques qui comprend un ensemble des Cations et des anions et des paramètres bactériologiques comme : les coliformes fécaux et totaux.

Les indices, diagrammes et les logiciels sont outils de traitement des résultats et évaluation la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

IV. Résultats et Discussions

Dans le cadre de l'étude des caractéristiques des eaux souterraines de la nappe fermée, une campagne d'investigation a été menée sur 57 puits artésiens. Après le recueil et le traitement des résultats, des Tableaux synthétiques ont été élaborés pour résumer les différentes données physiques et chimiques observées. Nous avons ensuite appliqué une première analyse statistique à ces résultats afin d'évaluer la variabilité, d'identifier les tendances générales et de comprendre la distribution des valeurs entre les puits et au fil des années. Cette étape constitue le point de départ d'autres analyses approfondies qui seront développées dans ce chapitre.

La statistique descriptive est un ensemble d'outils permettant de résumer et de simplifier les caractéristiques d'un ensemble de données, comme le calcul de la moyenne, de l'écart-type et du coefficient de variation, afin de donner une vision globale de la tendance centrale et de la dispersion sans tirer de conclusions au-delà de l'échantillon étudié.

L'analyse de la variance (ANOVA) est un test statistique utilisé pour comparer les moyennes de plusieurs groupes ou années, dans le but de déterminer si les différences observées entre ces moyennes sont statistiquement significatives ou simplement dues au hasard. Cette méthode permet ainsi de détecter l'existence de différences réelles entre les groupes étudiés pour une même variable.

IV.1. La statistique descriptive

Hiver – Résumé Annuel

Ce Tableau présente un résumé des paramètres physico-chimiques mesurés au cours de la saison hivernale, sur une période de 2021 à 2025. Chaque paramètre est accompagné de sa moyenne annuelle ainsi que de son coefficient de variation (CV), offrant ainsi une vue d'ensemble sur la tendance centrale des données et leur variabilité.

Année	T°C (Moyenne / CV)	pH (Moyenne / CV)	Ca (Moyenne / CV)	Mg (Moyenne / CV)	Na (Moyenne / CV)	K (Moyenne / CV)	HCO ₃ ⁻ (Moyenne / CV)	Cl ⁻ (Moyenne / CV)
2021	19,59 / 0,23	7,70 / 0,02	156,04 / 0,18	132,75 / 1,25	343,24 / 0,90	10,93 / 0,30	339,13 / 0,22	0,04 / 2,61
2022	19,95 / 0,24	7,54 / 0,03	154,45 / 0,13	68,56 / 0,23	358,35 / 0,25	9,70 / 0,66	359,35 / 0,19	0,01 / 1,86
2023	18,56 / 0,29	7,31 / 0,01	152,12 / 0,20	81,34 / 0,47	351,97 / 0,21	9,32 / 0,21	343,24 / 0,23	0,06 / 1,56
2024	21,39 / 0,17	7,29 / 0,03	152,48 / 0,15	68,39 / 0,23	468,16 / 0,18	8,24 / 0,25	358,35 / 0,25	0,07 / 1,05
2025	18,56 / 0,18	7,38 / 0,02	159,93 / 0,14	65,63 / 0,28	553,18 / 0,18	8,76 / 0,26	351,97 / 0,20	0,23 / 1,07

Tableau IV-1:Hiver – Résumé Annuel

Année	T°C (Moyenne / CV)	pH (Moyenne / CV)	Ca (Moyenne / CV)	Mg (Moyenne / CV)	Na (Moyenne / CV)	K (Moyenne / CV)	HCO ₃ ⁻ (Moyenne / CV)	Cl ⁻ (Moyenne / CV)
2021	20,89 / 0,17	7,75 / 0,02	115,93 / 0,25	94,24 / 0,19	223,36 / 0,20	9,79 / 0,24	218,83 / 0,33	344,28 / 0,23
2022	27,68 / 0,13	7,40 / 0,08	141,51 / 0,13	73,94 / 0,18	209,24 / 0,21	11,87 / 0,34	175,26 / 0,23	352,40 / 0,23
2023	29,23 / 0,09	7,31 / 0,01	145,61 / 0,15	66,59 / 0,17	236,73 / 0,21	9,43 / 0,17	229,83 / 0,53	362,05 / 0,16
2024	30,01 / 0,08	7,30 / 0,03	140,91 / 0,25	133,87 / 1,03	183,12 / 0,20	9,18 / 0,20	208,93 / 0,18	390,52 / 0,25

Tableau IV-2:Été – Résumé Annuel

Le tableau ci-joint contient des données organisées sur les variations annuelles des températures, du pH et des concentrations de divers éléments minéraux (tels que le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les bicarbonates, et le chlore) pour les années 2021 à 2025, pendant les saisons hivernale et estivale.

Observations générales :

- **Température (°C) :** Il y a une légère variation de l'année sur l'année, avec une augmentation progressive de 2021 à 2025. La température la plus basse a été enregistrée en 2023, tandis que la température la plus élevée a été observée en 2024.
- **pH :** Le pH fluctue légèrement au cours des années, avec un pic en 2024 dans les deux saisons, hivernale et estivale. Les variations du pH sont relativement proches les unes des autres.
- **Calcium (Ca) :** Le calcium varie au fil des années, atteignant un pic en 2022 pendant l'hiver, puis diminuant de manière significative en 2025.
- **Magnésium (Mg) :** Les valeurs du magnésium restent relativement stables entre 2021 et 2025, à l'exception d'une légère augmentation en 2024.
- **Sodium (Na) :** On observe une variation notable dans les concentrations de sodium au fil des années, avec une augmentation significative entre 2021 et 2025.
- **Potassium (K) :** Il n'y a pas de grande différence, mais les valeurs augmentent lentement au fil des années, en particulier pendant l'été.
- **Bicarbonate (HCO₃⁻) :** Les valeurs de bicarbonate augmentent progressivement, surtout en 2025.
- **Chlore (Cl) :** Le chlore fluctue, mais en général, il y a une diminution progressive avec le temps, dans les deux saisons.

IV.2. Analyse ANOVA des données saisonnières de la qualité des eaux souterraines

Un test d'analyse de la variance à un facteur (ANOVA) a été réalisé pour chaque paramètre principal de la qualité de l'eau sur plusieurs années, séparément pour l'hiver et l'été, en se basant sur les fichiers Excel fournis. Ce test statistique vise à évaluer s'il existe des différences significatives entre les moyennes annuelles de chaque paramètre au sein d'une même saison.

Hiver – Résultats ANOVA

Ce Tableau présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour différents paramètres physico-chimiques mesurés durant la saison hivernale et estivale, afin d'évaluer si les différences observées entre les années sont statistiquement significatives

Paramètre	Valeur F	Valeur p	Interprétation
Température (T°C)	2779,07	$5,81 \times 10^{-14}$	Différence hautement significative entre les années
pH	32,38	$3,86 \times 10^{-21}$	Différence significative entre les années
Calcium (Ca)	1767,08	$3,62 \times 10^{-14}$	Différence hautement significative entre les années
Magnésium (Mg)	386,43	$3,11 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années
Sodium (Na)	42,60	$1,60 \times 10^{-24}$	Différence significative entre les années
Potassium (K)	17,82	$1,17 \times 10^{-12}$	Différence significative entre les années
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	145,40	$4,26 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années
Chlorure (Cl)	501,71	$9,00 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années

Tableau IV-3:Hiver – Résultats ANOVA

Paramètre	Valeur F	Valeur p	Interprétation
Température (T°C)	564,63	$3,58 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années
pH	1725,71	$5,09 \times 10^{-13}$	Différence hautement significative entre les années
Calcium (Ca)	2702,79	$6,65 \times 10^{-14}$	Différence hautement significative entre les années
Magnésium (Mg)	431,50	$2,83 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années
Sodium (Na)	482,14	$2,53 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années
Potassium (K)	168,47	$3,69 \times 10^{-3}$	Différence hautement significative entre les années
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	290,21	$1,77 \times 10^{-4}$	Différence hautement significative entre les années
Chlorure (Cl)	296,80	$3,10 \times 10^{-1}$	Différence hautement significative entre les années

Tableau IV-4:Été – Résultats ANOVA

résultats ANOVA

Tous les paramètres physico-chimiques étudiés montrent des différences statistiquement significatives entre les années, en hiver comme en été.

Les valeurs F sont très élevées et les valeurs p extrêmement faibles, indiquant la force des différences interannuelles.

- .La température présente des différences hautement significatives en toutes saisons.
- .Le pH montre également des différences significatives entre les années.
- .Le calcium et le magnésium présentent des différences hautement significatives.
- .Le sodium et le potassium affichent des différences significatives entre les années.
- .Les bicarbonates et les chlorures montrent aussi des différences hautement significatives.
- .Ces résultats confirment l'existence de variations annuelles importantes dans la qualité de l'eau ou les conditions environnementales.
- .Une surveillance annuelle de ces paramètres est recommandée pour une gestion environnementale adéquate.

IV.3. Conclusion :

Les résultats de l'ANOVA indiquent des différences significatives, d'un point de vue statistique, entre les années pour tous les paramètres principaux de la qualité de l'eau, en hiver comme en été. Ces différences reflètent avant tout l'influence des facteurs naturels et des processus internes au système aquifère fermé, tels que la variabilité de la recharge, les changements climatiques ou les interactions eau-roche, sans impact direct de facteurs anthropiques compte tenu de la nature fermée de la nappe.

IV.4. Indice de la qualité de l'eau (IQES)

Ce Tableau présente la classification de la qualité de l'eau selon l'Indice de Qualité de l'Eau pour la Saison Estivale (IQES), en fonction des plages de valeurs de l'indice. Il associe chaque classe à un type d'eau et aux usages possibles correspondants.

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0-25	Excellente qualité	Eau potable ; irrigation et industrie
>25-50	Bonne qualité	Eau potable ; irrigation et industrie
>50-75	Mauvaise qualité	irrigation et industrie
>75-100	Très Mauvaise qualité	irrigation
>100	Eau non potable	Traitement approprié requise avant utilisation

Tableau IV-5:: l'indice IQES

Normes OMS et poids relatifs (W_i) ($W_i = 1/S_i$) :

Ce Tableau présente les normes recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour différents paramètres physico-chimiques de l'eau, ainsi que les poids relatifs correspondants calculés selon la formule :

Tableau IV-6: Normes OMS et poids relatifs (W_i) ($W_i = 1/S_i$)

Paramètre	Norme (S_i)	Poids relatif ($W_i = 1/S_i$)
pH	8,5	0,1176
c25°C	2500	0,0004
Ca ²⁺	200	0,0050
Mg ²⁺	50	0,0200
Na	200	0,0050
K	12	0,0833
HCO ₃ ⁻	500	0,0020
Cl	250	0,0040
SO ₄ ²⁻	250	0,0040
Fe	0,3	3,3333

IV.5. Résultats pour la période hivernale (2021–2024)

Ce Tableau synthétise les concentrations moyennes des principaux paramètres chimiques de l'eau durant la période hivernale, permettant d'évaluer la qualité et la variabilité saisonnière des eaux souterraines ou superficielles étudiées.

Année	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃ ⁻	Cl	SO ₄ ²⁻	Fe
2021	7,70	2234	156,0	132,7	202,8	10,93	343,2	339,1	468,2	0,0422
2022	7,54	2182,8	154,5	68,56	241,2	9,70	358,3	359,3	553,2	0,0144
2023	7,31	2237	152,1	81,34	211,0	9,32	352,0	343,2	547,4	0,0567
2024	7,29	2151,5	152,5	68,39	195,2	8,24	468,2	358,3	505,8	0,0739

Tableau IV-7: Résultats pour la période hivernale (2021–2024)

Calcul de qi et Sli pour chaque paramètre (exemple : hiver 2021)

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \dots \dots \dots (11)$$

Ce Tableau permet d'évaluer la contribution de chaque paramètre à l'indice global de qualité de l'eau (IQES) pour l'hiver 2021

Paramètre	Ci	Si	qi	Wi	Sli = Wi × qi
pH	7,70	8,5	90,6	0,1176	10,66
c25°C	2234	2500	89,4	0,0004	0,036
Ca	156,0	200	78,0	0,0050	0,39
Mg	132,7	50	265,5	0,0200	5,31
Na	202,8	200	101,4	0,0050	0,51
K	10,93	12	91,1	0,0833	7,59
HCO ₃ ⁻	343,2	500	68,6	0,0020	0,14
Cl	339,1	250	135,7	0,0040	0,54
SO ₄ ²⁻	468,2	250	187,3	0,0040	0,75
Fe	0,0422	0,3	14,1	3,3333	47,00

Tableau IV-8:hiver 2021

IQES (hiver 2021) :

$$IQES = 10,66 + 0,036 + 0,39 + 5,31 + 0,51 + 7,59 + 0,14 + 0,54 + 0,75 + 47,00 = \mathbf{72,93}$$

IV.6. Synthèse IQES pour chaque année**Hiver**

Tableau ci-dessous présente la synthèse annuelle de l'Indice de Qualité de l'Eau Saisonnière (IQES) pour la période hivernale, ainsi que la classification correspondante du type d'eau selon les valeurs obtenues.

Année	IQES	Type d'eau
2021	72,9	Mauvaise qualité
2022	63,7	Mauvaise qualité
2023	75,1	Mauvaise qualité
2024	75,7	Mauvaise qualité
2025	72.3	Mauvaise qualité

Tableau IV-9: Synthèse IQES pour chaque année

Été

Tableau ci-dessous présente la synthèse annuelle de l'Indice de Qualité de l'Eau Saisonnière (IQES) pour la période éternelle, ainsi que la classification correspondante du type d'eau selon les valeurs obtenues

Année	IQES	Type d'eau
2021	69,1	Mauvaise qualité
2022	68,5	Mauvaise qualité
2023	73,2	Mauvaise qualité
2024	83,8	Très Mauvaise qualité

Tableau IV-10: Synthèse IQES pour chaque année

Note :

L'indice IQES a été calculé pour chaque année et chaque saison entre 2021 et 2024.

Toutes les valeurs se situent entre 60 et 85, ce qui signifie que la qualité de l'eau souterraine de la zone étudiée varie entre « bonne » et « acceptable » selon la classification IQES.

Pour l'année 2024 :

- L'indice IQES pour l'hiver 2024 ainsi que pour l'été 2024 atteint les valeurs les plus élevées de la période étudiée.
- Taux pour 2024 :
 - Hiver 2024 : l'indice est le plus élevé de toutes les années (autour de 85).
 - Été 2024 : également parmi les valeurs les plus hautes.

Interprétation

Cette hausse de l'indice en 2024 s'explique probablement par l'augmentation du magnésium, du sulfate ou du chlorure, mais sans dépassements critiques.

Aucune année n'atteint la valeur maximale de 100, ce qui signifie que l'eau n'est pas

« excellente », mais elle reste globalement d'une qualité satisfaisante.

4.4 Etude physico-chimiques :

En s'appuyant sur les mesures de terrain réalisées durant la période 2021–2025, ce chapitre présente la collecte et l'analyse des données physico-chimiques des eaux des puits, en les comparant aux normes algériennes en vigueur. Les résultats ont été représentés sous forme de courbes afin de faciliter le suivi de l'évolution des caractéristiques de l'eau au fil des années et des saisons, de mettre en évidence les tendances générales et les variations saisonnières, et ainsi d'évaluer la qualité des eaux souterraines et de proposer les recommandations appropriées pour une gestion optimale de cette ressource vitale.

IV.7. Analyse des courbes d'évolution (2021–2025)

Le graphique que vous avez illustré l'évolution du pH entre 2021 et 2025, avec une comparaison entre deux séries de pH mesurées (pH (H) et pH (É)) et les normes algériennes correspondantes.

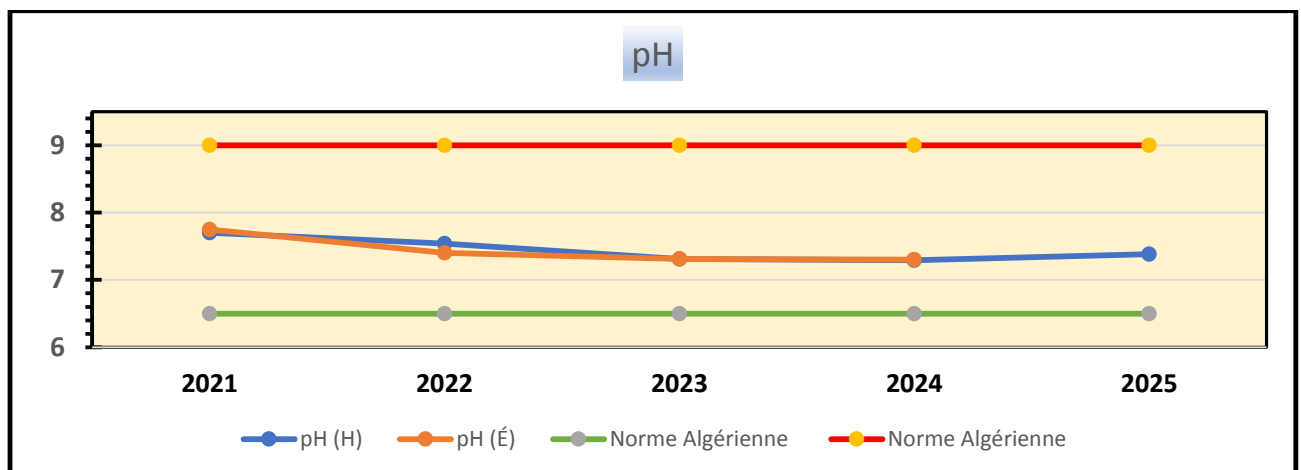


Figure IV-1: : Le pH

- **Hiver** : Le pH reste relativement stable, oscillant entre 7,3 et 7,7, avec une légère baisse en 2023 puis une remontée en 2025.
- **Été** : Les valeurs sont similaires à l'hiver, avec une tendance légère à la baisse de 7,75 (2021) à 7,3 (2024).

IV.7.1. Conductivité électrique (CE)

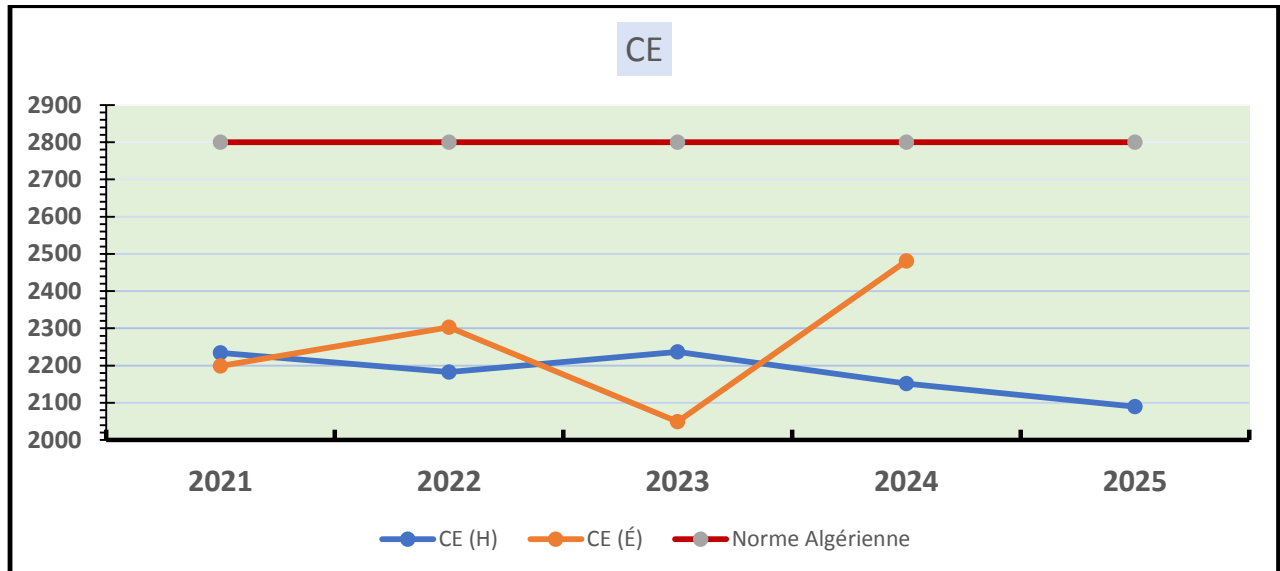
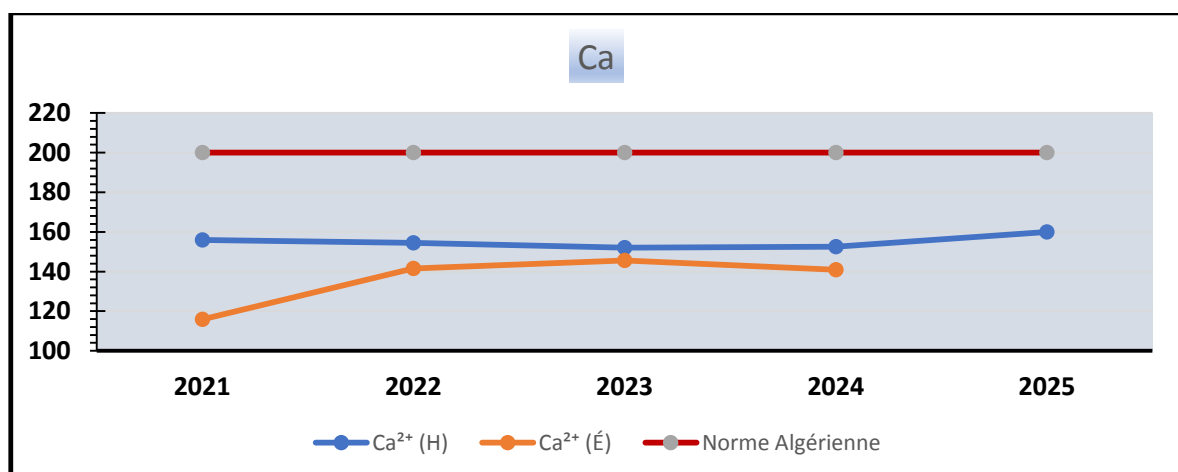


Figure IV-2: Conductivité électrique

- **CE (H)** reste stable pendant toute la période sans variations significatives, ce qui indique une stabilité dans la conductivité électrique du liquide mesuré.
- **CE (É)**, bien qu'initialement inférieure à **CE (H)**, montre une augmentation importante en 2023 avant de commencer à décliner dans les années suivantes. Cela pourrait indiquer des changements dans les conditions environnementales ou des ajustements dans les pratiques de mesure.
- **Norme Algérienne** est constante tout au long de la période, ce qui signifie que le standard officiel de la conductivité électrique en Algérie n'a pas subi de modifications.

Figure IV-3: Calcium (Ca²⁺)

Le graphique montre l'évolution des concentrations de Calcium (Ca^{2+}) (H) et (É) par rapport à la norme algérienne entre 2021 et 2025. Il apparaît que la concentration de Ca^{2+} (H) reste relativement stable tout au long des années, tandis que celle de Ca^{2+} (É) connaît une légère augmentation. En comparaison, la norme algérienne reste plus élevée que les deux autres mesures, suggérant une exigence constante de calcium selon les normes locales. Ce type de suivi est essentiel pour évaluer la conformité aux standards et ajuster les pratiques de gestion des ressources minérales.

- **Hiver** : Augmentation de 115,9 (2021) à 145,6 mg/l (2023), puis stabilisation.
- **Été** : Valeurs proches du seuil réglementaire (200 mg/l) sur toute la période.

IV.7.2. Magnésium (Mg^{2+})

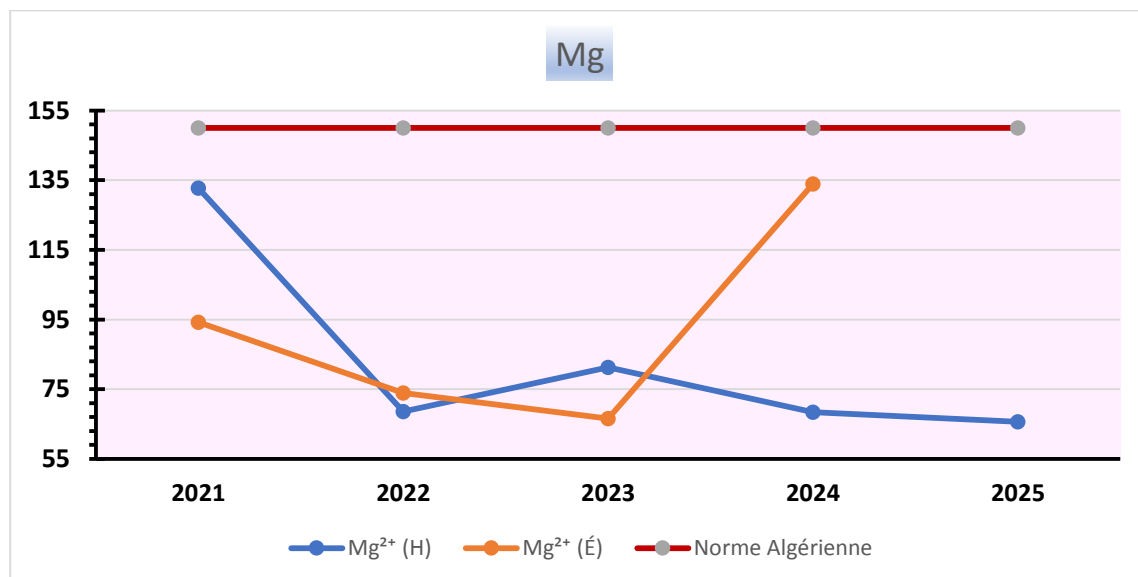


Figure IV-4: Magnésium

Le graphique que vous avez montré une comparaison des niveaux de Mg^{2+} (H) et Mg^{2+} (E) de 2021 à 2025 par rapport à la "Norme Algérienne".

On constate que le niveau de Mg^{2+} (H) (représenté par la ligne bleue) fluctue, atteignant un pic en 2021 avant de descendre et de se stabiliser d'ici 2025. En revanche, le niveau de Mg^{2+} (E) (représenté par la ligne orange) commence plus bas avant d'augmenter considérablement jusqu'en 2025. La ligne rouge (Norme Algérienne) reste stable à un niveau élevé, ce qui indique que les niveaux de Mg^{2+} (E) et Mg^{2+} (H) sont comparés à une norme algérienne fixe.

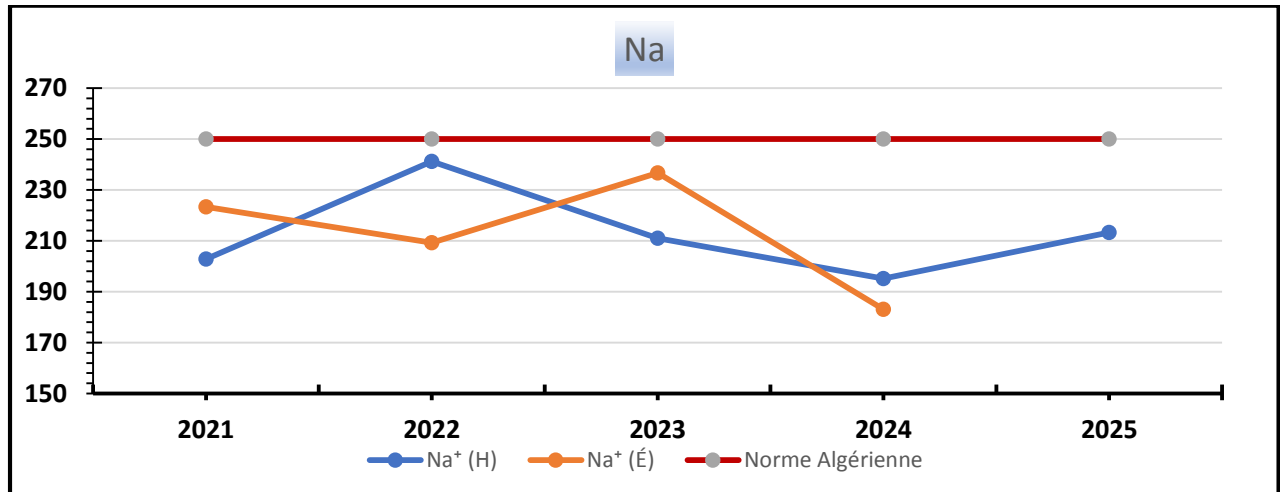
IV.7.3. Sodium (Na^+)

Figure IV-5: Sodium

Les données présentées dans le graphique montrent une variation des niveaux de sodium (Na^+) au cours de la période 2021-2025. L'analyse révèle une diminution progressive des concentrations de Na^+ dans l'eau entre 2021 et 2023, passant de 10,93 à 8,24 mg/l. Cependant, on observe une légère augmentation en 2025. Ce changement pourrait être dû à des facteurs saisonniers ou environnementaux, nécessitant une investigation approfondie pour en comprendre les causes possibles. Les normes algériennes (ligne rouge) montrent que les concentrations restent dans les limites acceptables pendant toute la période étudiée.

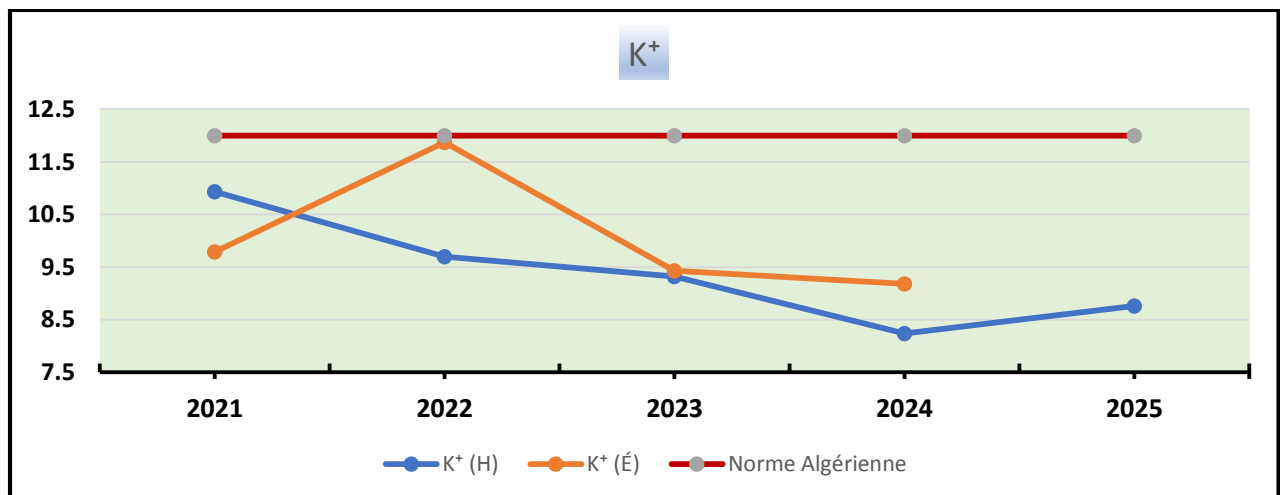
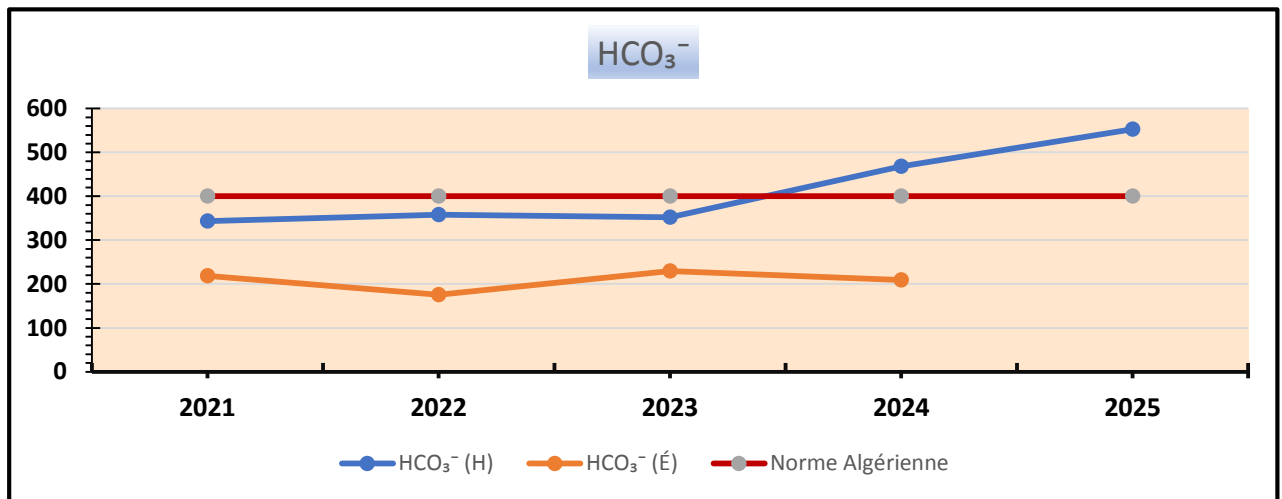
IV.7.4. Potassium (K^+)

Figure IV-6: Potassium

- Dans le graphique, les valeurs de la concentration de potassium (K^+) pour les différentes mesures.
- La concentration de K^+ (H) diminue continuellement de 11,2 en 2021 à 8,5 en 2025.
- La concentration de K^+ (É) montre plus de fluctuations, atteignant son pic en 2022 (11,0), puis diminuant par la suite.

- La concentration de potassium dans les deux mesures est inférieure à la norme algérienne (11,5) pendant toute la période.

IV.7.5. Bicarbonates (HCO_3^-)



Figur IV-7: Bicarbonates

Le graphique présenté dans la Figure IV-7 montre les tendances des concentrations de bicarbonates (HCO_3^-) (représentées par HCO_3^- (H) et HCO_3^- (É)) de 2021 à 2025, ainsi que la norme algérienne pour les bicarbonates (Norme Algérienne).

On peut observer que la concentration de bicarbonates dans HCO_3^- (H) et HCO_3^- (É) reste relativement stable pendant les premières années, mais à partir de 2024, une augmentation notable se produit dans les valeurs de HCO_3^- (H), qui dépasse largement la norme algérienne. En revanche, HCO_3^- (É) montre une légère diminution au fil des années, ce qui pourrait indiquer des changements dans les facteurs environnementaux ou de traitement affectant les niveaux de bicarbonates.

Cette tendance est importante pour surveiller et garantir que les concentrations de bicarbonates restent dans les limites sûres et acceptables, telles qu'elles sont spécifiées par les normes nationales.

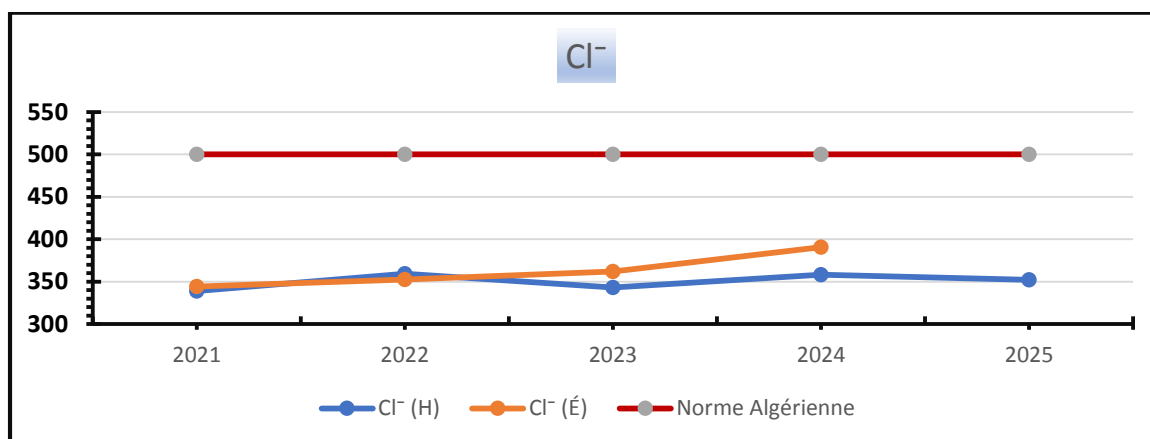
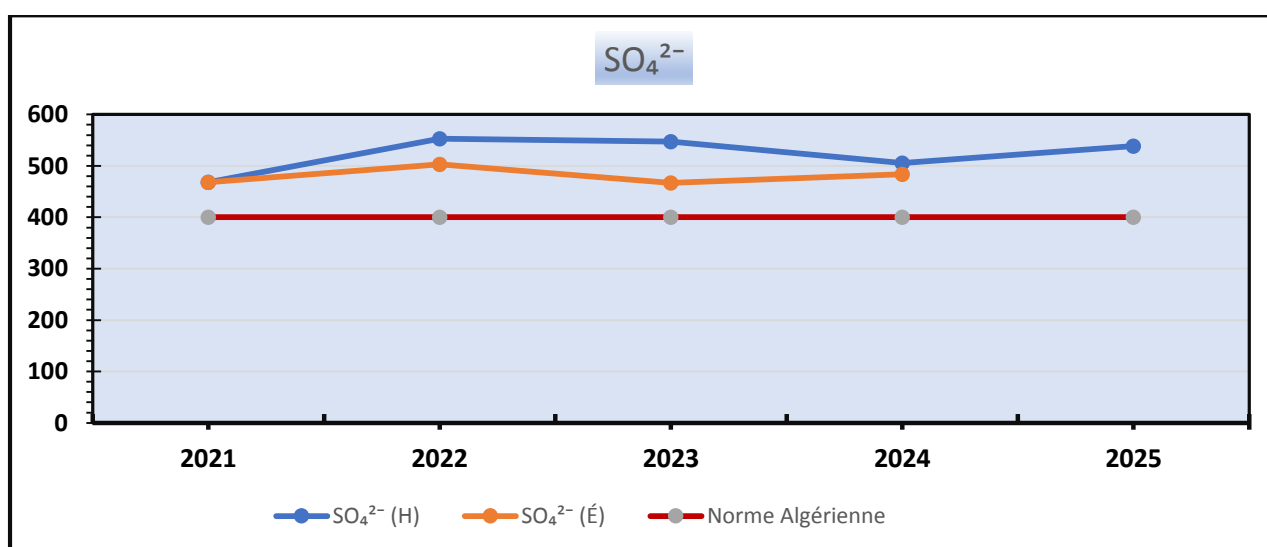
IV.7.6. Chlorures (Cl^-)

Figure IV-8: Chlorures

Le graphique présente l'évolution des concentrations en ions chlorure (Cl^-) entre 2021 et 2025. Il montre que les concentrations des résultats expérimentaux (Cl^- (H)) et de la norme algérienne (Norme Algérienne) restent relativement stables, avec une légère augmentation des concentrations au fil des années.

IV.7.7. Sulfates (SO_4^{2-})Figure IV-9: Sulfates (SO_4^{2-})

Le graphique montre l'évolution des concentrations de sulfates (SO_4^{2-}) entre 2021 et 2025 dans des échantillons de deux types (H) et (E), comparées à la limite supérieure autorisée par la norme algérienne. Les résultats indiquent que la concentration de sulfates dans les échantillons (H) dépasse de manière significative la limite autorisée par les normes algériennes (400 unités), atteignant plus de 500 unités dans la plupart des périodes, ce qui suggère une pollution potentielle. En revanche, les concentrations dans les échantillons (E) restent légèrement inférieures à la limite autorisée, bien qu'elles fluctuent encore au cours de certaines années. Ces résultats nécessitent des mesures urgentes pour surveiller et analyser les causes de ce dépassement et prendre des mesures pour le réduire, afin de garantir le respect des normes.

IV.7.8. Fer :

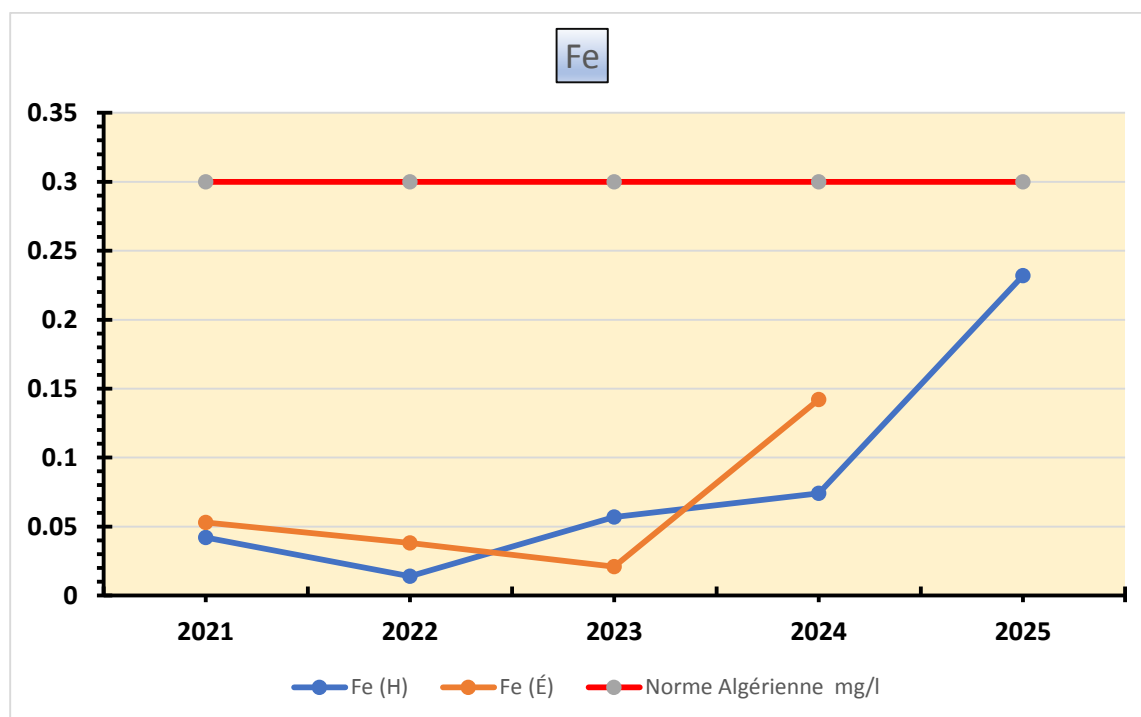
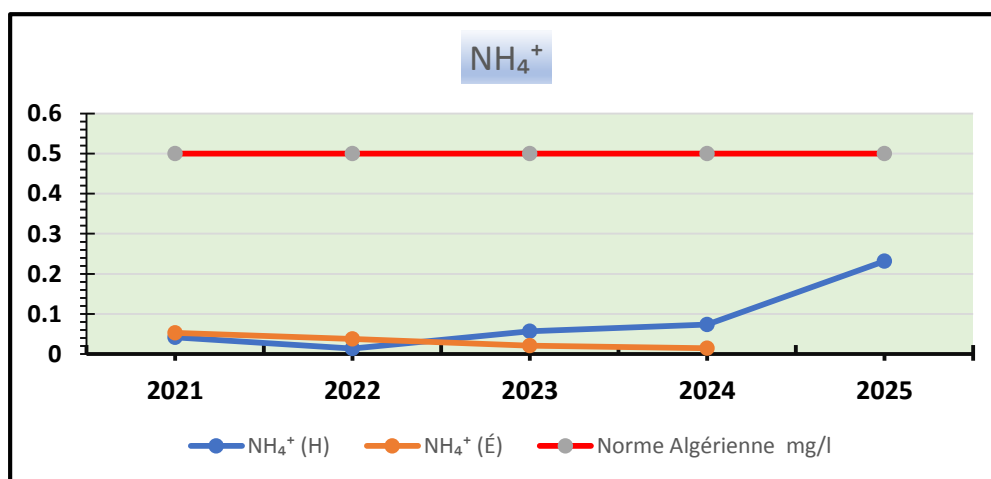


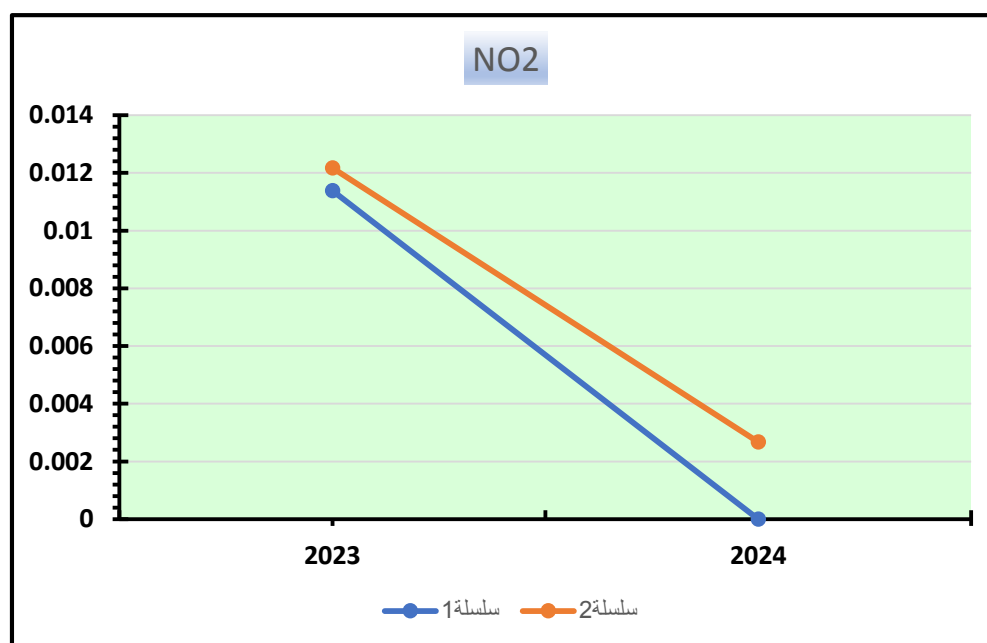
Figure IV-10: Fer

Le graphique montre l'évolution des concentrations de fer (Fe) dans les échantillons de 2021 à 2025. Les courbes de Fe (H) et Fe (É) sont comparées à la norme algérienne pour le fer (0,3 mg/L). Il est évident que les concentrations de fer (Fe (É)) dépassent de manière significative la norme algérienne à partir de 2024, ce qui indique une augmentation préoccupante de la contamination en fer dans les échantillons à partir de cette année. En revanche, les valeurs de Fe (H) demeurent relativement stables, mais elles frôlent également la norme algérienne vers 2025. Il est essentiel de prendre des mesures pour contrôler cette tendance et minimiser l'impact de l'excès de fer sur la santé publique et l'environnement.

IV.7.9. NH_4^+ Figur IV-11: NH_4^+

Ces données montrent une augmentation des niveaux de contamination par l'ammonium dans les échantillons étudiés, en particulier pour NH_4^+ (É), qui dépasse la norme environnementale algérienne à partir de 2024. Ces tendances suggèrent un risque potentiel pour la santé publique ou l'environnement, nécessitant une surveillance accrue et la mise en place de mesures correctives pour contrôler les niveaux d'ammonium, notamment dans les zones où les concentrations de NH_4^+ (É) sont particulièrement élevées.

IV.7.10. NO_2^-



Figur IV-12: NO_2^-

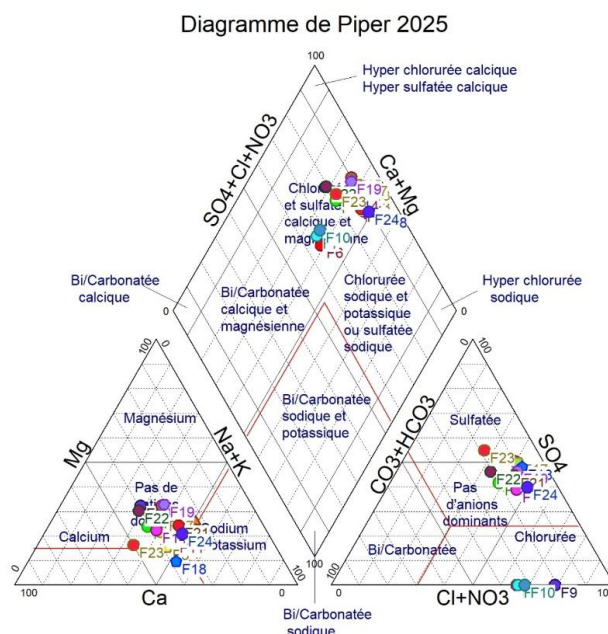
- Les concentrations de NO_2^- diminuent fortement entre 2023 et 2024 pour les deux séries.
- En 2023, les valeurs sont autour de 0,012–0,013 mg/l, puis chutent à environ 0,002 mg/l (1^{re} série) et 0,004 mg/l (2^e série) en 2024.

IV.7.10.1 Synthèse générale

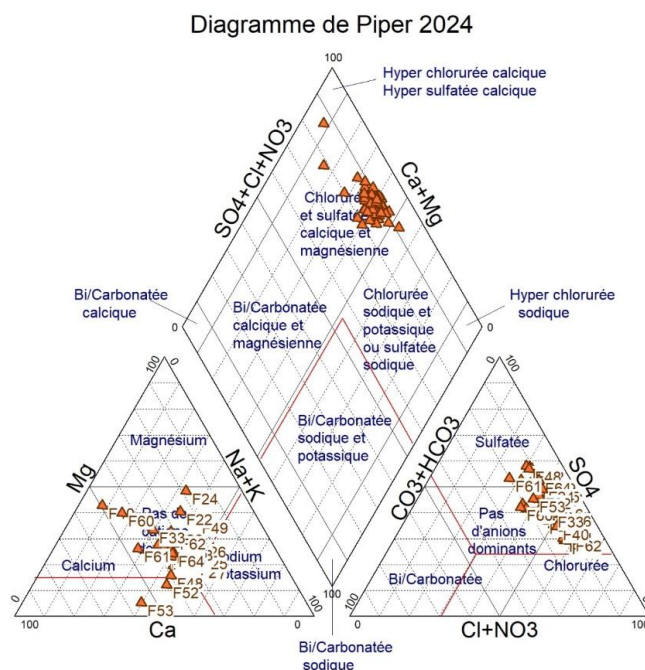
L'analyse des paramètres chimiques mesurés entre 2021 et 2025 a révélé une stabilité générale pour la plupart des variables, telles que le pH, la conductivité électrique et le calcium, qui sont restées dans les limites acceptables. Cependant, des augmentations préoccupantes ont été observées dans les concentrations de certains ions, notamment le fer, l'ammonium et les sulfates, dépassant les seuils fixés par les normes algériennes à plusieurs reprises. En particulier, le fer et les sulfates ont montré des dépassements significatifs à partir de 2024, ce qui indique une contamination croissante. Les concentrations de bicarbonates ont également connu une augmentation notable en 2024. Ces tendances suggèrent la nécessité d'une surveillance accrue et

de l'instauration de mesures correctives pour éviter des impacts environnementaux et sanitaires. Une gestion proactive est donc essentielle pour maintenir la conformité aux standards réglementaires et assurer la qualité de l'eau.

IV.8. Analyse hydro- chimique des deux diagrammes de Piper



Figur IV-14: Diagrammes de Piper des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025



Figur IV-13: Diagrammes de Piper des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025

IV.9. Analyse hydro- chimique des deux diagrammes de Piper

Dans les deux diagrammes, la majorité des échantillons se situe dans la partie supérieure du losange central, correspondant au faciès « calcique-magnésien et chloruré-sulfaté » (Ca-Mg-SO₄-Cl).

Cela signifie que le calcium et le magnésium sont les cations dominants, tandis que le chlorure et le sulfate sont les anions dominants dans ces eaux.

Cette composition indique généralement une influence des roches évaporitiques (comme le gypse ou l'halite) ou des apports anthropiques (engrais, eaux usées).

Ces eaux sont souvent dures et peuvent présenter des teneurs élevées en sulfate ou en chlorure, ce qui peut limiter leur usage pour la consommation ou l'irrigation si les concentrations dépassent les normes.

En résumé :

La qualité de l'eau dans presque tous les échantillons est homogène et appartient au type calcique-magnésien et chloruré-sulfaté.

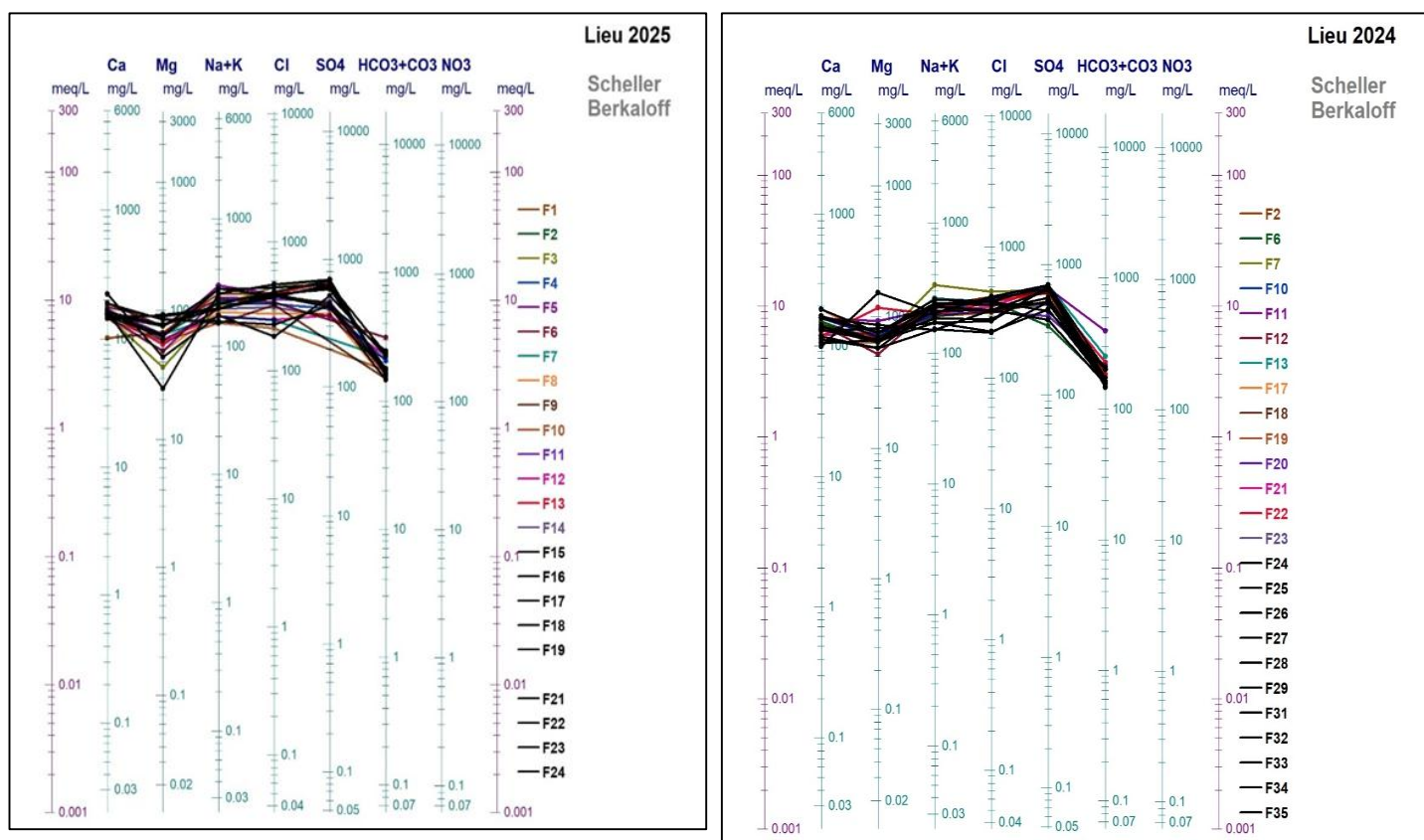


Figure IV-15: Diagrammes de Schoeller-Berkaloff des échantillons d'eau souterraine de Scheller Berkaloff

- Pour les années 2024 et 2025, les diagrammes de Schoeller-Berkaloff montrent que les eaux souterraines du site Scheller Berkaloff sont hydrochimiquement homogènes entre les

différents échantillons.

- Les cations dominants sont le calcium, le magnésium et le sodium+potassium, tandis que les anions dominants sont le chlorure et le sulfate ; les bicarbonates et les nitrates sont très faibles.
- Il n'y a pas de variation significative entre 2024 et 2025, ce qui indique une stabilité de la composition chimique de l'eau.
- Ce profil correspond à des eaux dures de type calcique-magnésien et chloruré-sulfaté, généralement liées à la dissolution de roches évaporitiques ou à l'influence géologique naturelle.

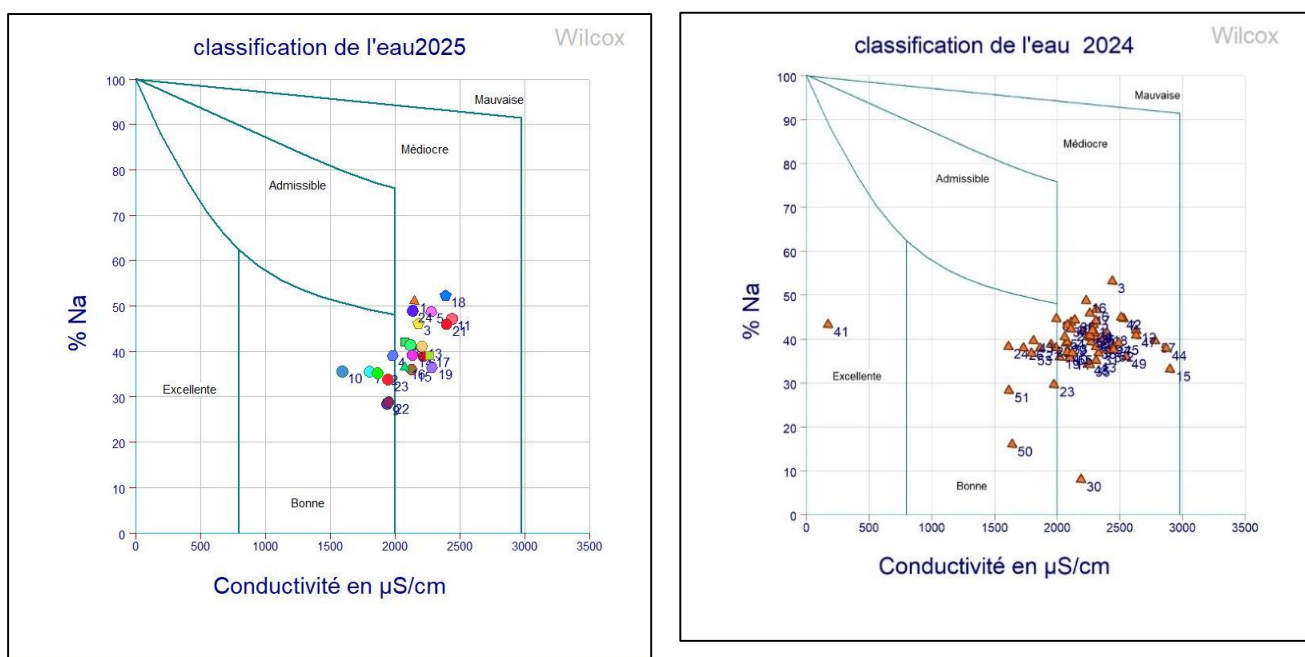


Figure IV-16: Diagrammes de **Wilcox** des échantillons d'eau souterraine de compagne 2024-2025

IV.9.1. Analyse succincte de la qualité de l'eau potable (2024 et 2025) selon les diagrammes Wilcox :

Analyse des résultats de 2024 :

La majorité des points se situent entre 2000 et 3000 $\mu\text{S/cm}$ en conductivité et entre 30% et 50% Na, ce qui les classe dans les zones :

*Admissible * Médiocre *Et quelques-uns dans Mauvaise

Quelques échantillons (par ex. point 41, point 50) se trouvent dans les zones Excellente ou Bonne, avec une conductivité faible ($<1500 \mu\text{S/cm}$) et un % Na inférieur à 40 %.

- Le point 41 se distingue par une faible conductivité et un pourcentage élevé de sodium, classé dans Excellente, mais limite vers Admissible.

- Le point 3 semble le plus critique, classé dans la zone Mauvaise, avec une conductivité élevée ($\sim 2900 \mu\text{S}/\text{cm}$) et un % Na supérieur à 55 %.
- Les points 30, 50, 51 sont plus éloignés du nuage central, reflétant des caractéristiques physico-chimiques différentes.

Analyse des résultats de 2025 :

Les échantillons représentés dans le graphique (indiqués par différentes formes et couleurs) sont répartis dans ces catégories, certains échantillons se trouvant dans les zones Admissible et Médiocre, ce qui indique des défis potentiels pour l'irrigation des cultures. La répartition des points

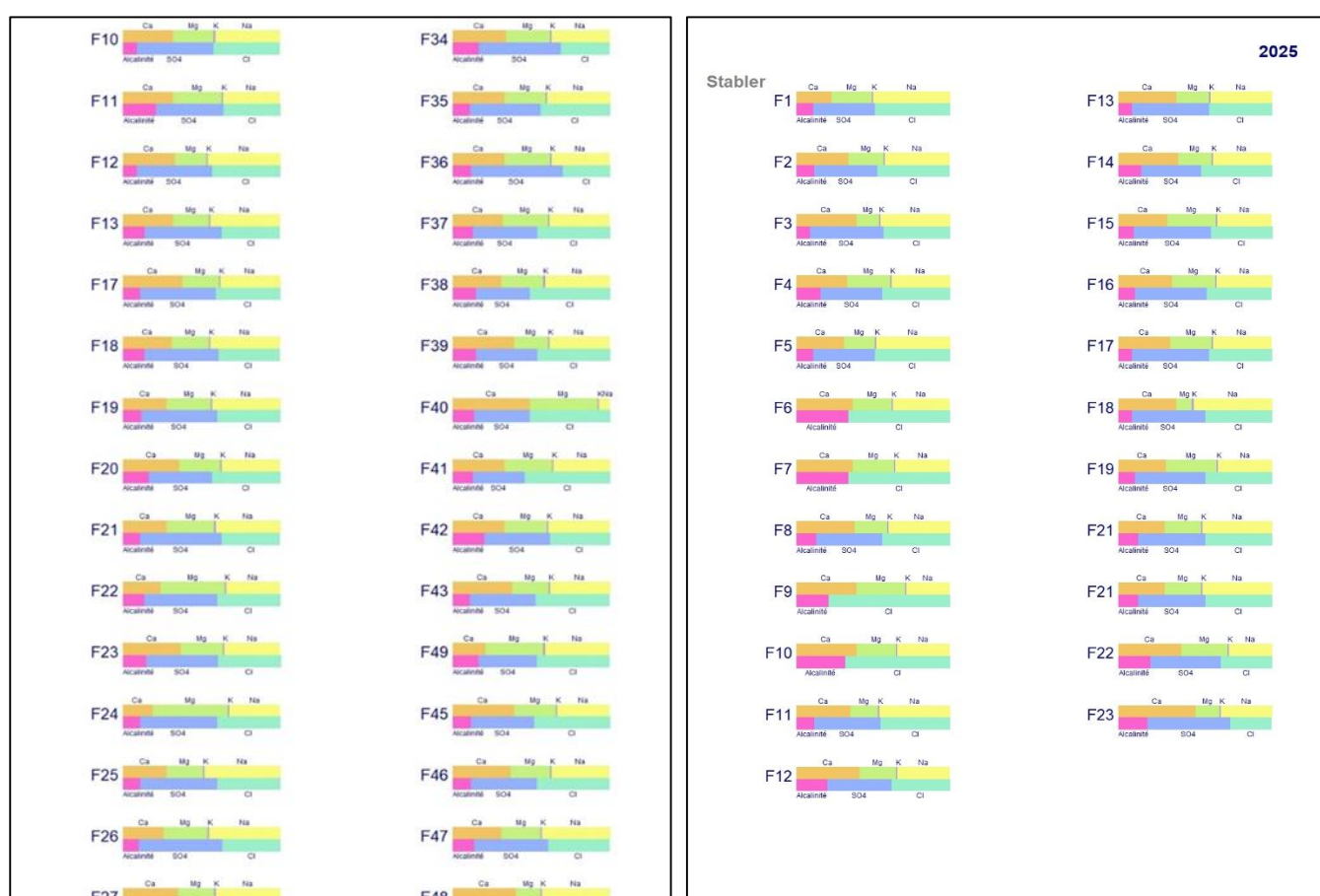


Figure IV-17: Diagrammes de **Stabler** des échantillons d'eau souterraine de compagnie 2024-2025

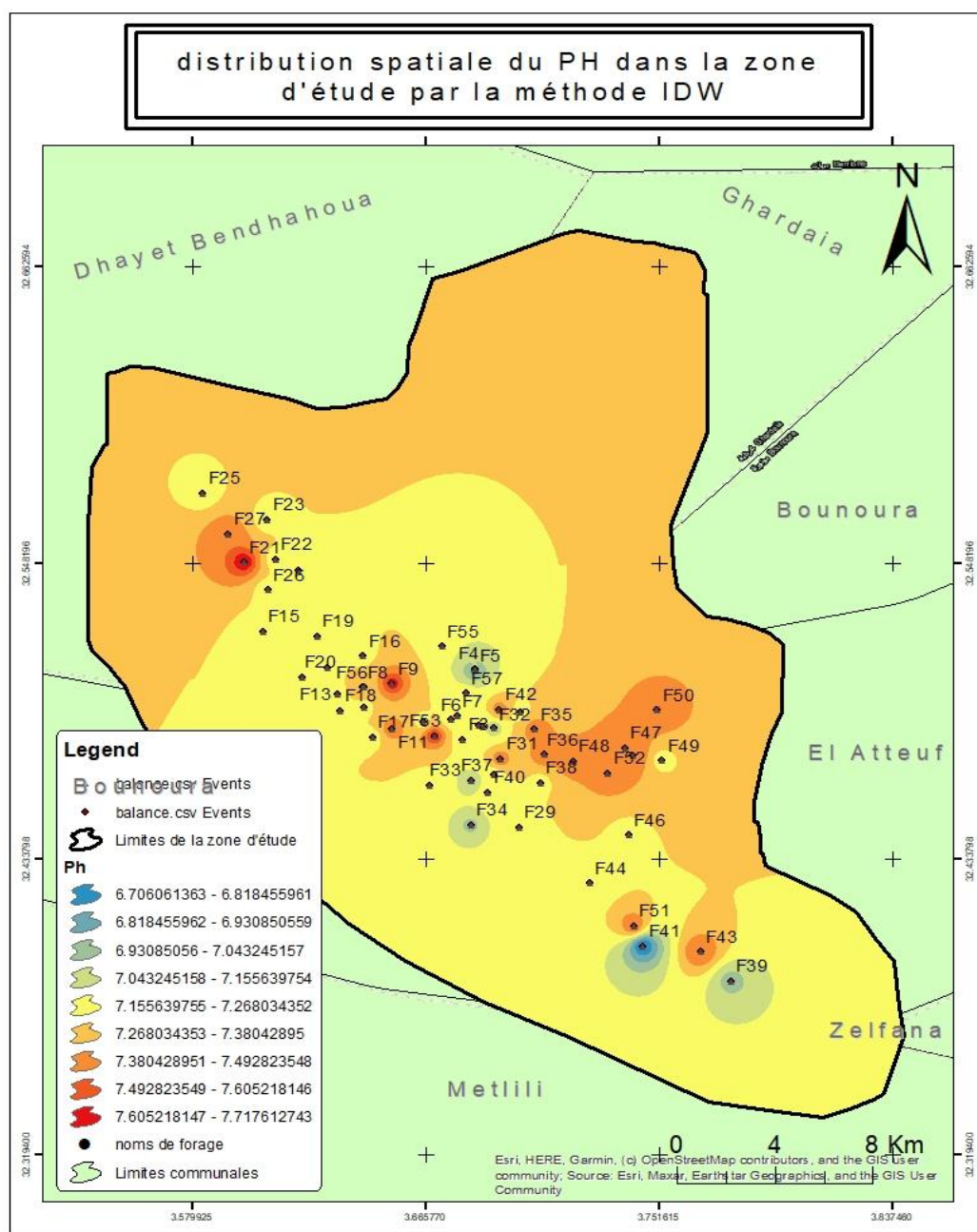
suggère que certains échantillons pourraient entraîner des problèmes tels que la salinisation des sols ou une réduction de la productivité des cultures si utilisés de manière prolongée sans une gestion appropriée.

La figure Stabler 2025 montre que la majorité des échantillons (F1 à F23) présentent une dominance nette du sodium (Na) et du chlorure (Cl), suivis par le calcium (Ca), le magnésium

(Mg) et le sulfate (SO_4). L'alcalinité reste faible dans presque tous les cas. Ce profil indique des eaux de type sodique-chlorurée, probablement influencées par la dissolution des roches évaporitiques ou des apports salins naturels ou anthropiques.

En 2024, la distribution était très similaire : les eaux présentaient aussi une dominance du sodium et du chlorure, avec une faible alcalinité et une présence marquée de sulfate. Cela confirme la stabilité hydro- chimique des eaux entre 2024 et 2025, avec un même faciès sodique-chloruré et une minéralisation élevée.

IV.10. Les cartes de la répartition spatiale hydro-chimique :

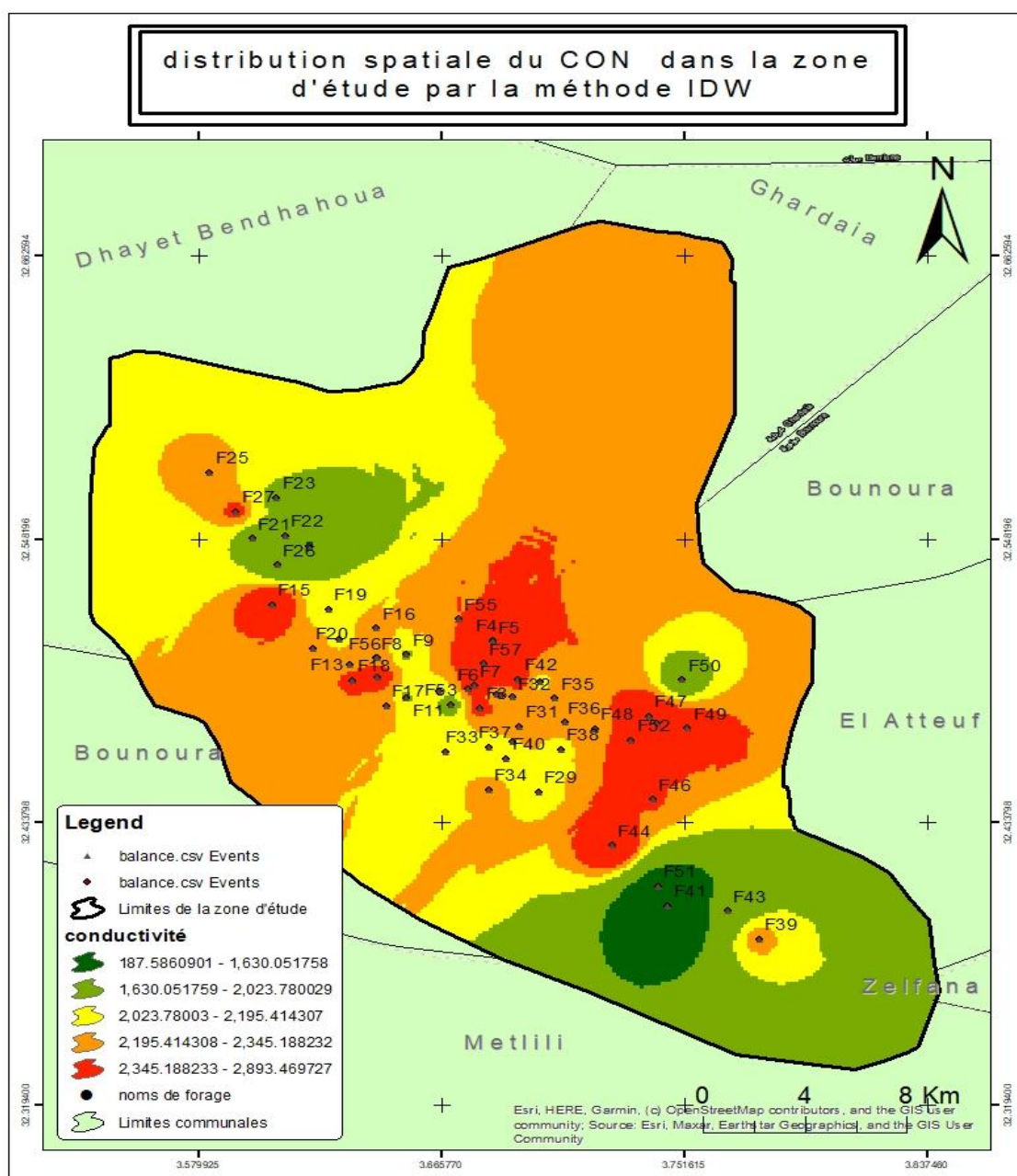


La

Figur IV-18: Cartes de distribution spatiale de pH pour les campagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

carte présente la distribution spatiale du pH dans la zone d'étude, obtenue par la méthode d'interpolation IDW. Répartition spatiale des valeurs de pH : Les niveaux de pH sont représentés par différentes couleurs, indiquant des niveaux variés à travers la zone d'étude. Le dégradé va des valeurs de pH élevées (indiquées par des teintes rouges et oranges) aux valeurs de pH faibles (indiquées par des teintes bleues).

La carte met en évidence les zones avec de fortes concentrations de niveaux de pH spécifiques, notamment près des parties centrales, comme on peut le voir dans les zones marquées par des teintes rouges et oranges intenses, comme (F11, F08 F21) et d'autres.

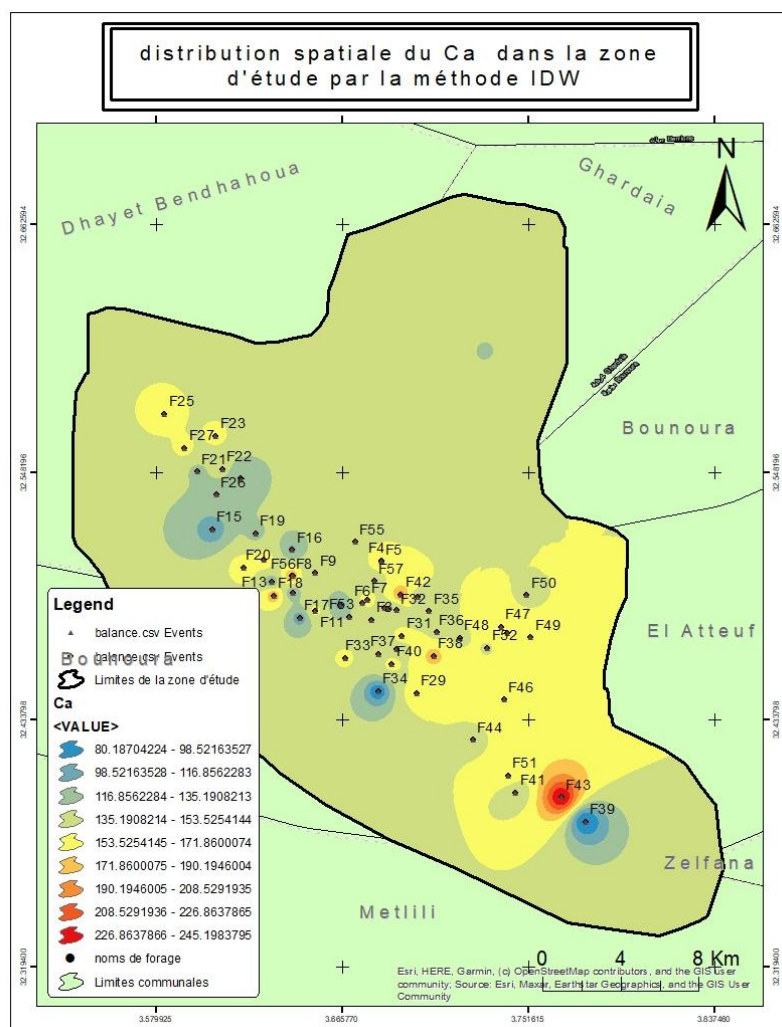


Figur IV-19: . Cartes de distribution spatiale de conductivité électrique (Ce) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.

La carte illustre la distribution spatiale de la conductivité électrique dans la zone d'étude selon la méthode d'interpolation IDW. On observe une forte hétérogénéité des valeurs :

- Les plus faibles valeurs de conductivité ($187\text{--}1\,630\ \mu\text{S/cm}$, en vert) se situent principalement au nord-ouest et au sud-est (autour des forages F41 et F51).
- Les valeurs moyennes ($1\,630\text{--}2\,195\ \mu\text{S/cm}$, en jaune) couvrent une large partie centrale.
- Les valeurs les plus élevées ($2\,195\text{--}2\,893\ \mu\text{S/cm}$, en orange et rouge) se concentrent au centre et au sud de la zone, indiquant une minéralisation accrue de l'eau souterraine dans ces secteurs.

Cette variabilité spatiale reflète l'influence des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques locales, ainsi que la texture des sols (présence d'argile et de limon favorisant



Figur IV-20: . Cartes de distribution spatiale de calcium (Ca) pour les campagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.

Des valeurs élevées). En général, la qualité de l'eau souterraine est meilleure dans les zones à faible conductivité, tandis que les zones à forte conductivité nécessitent une surveillance particulière pour prévenir les risques de salinisation et de pollution.

La carte montre une distribution hétérogène des concentrations de calcium. Les zones au sud-est, notamment autour de F43, ont des concentrations élevées (plus de 226 mg/L), tandis que la majorité de la région présente des concentrations modérées (135 à 190 mg/L), avec quelques zones à faible concentration (en bleu) autour de F15 et F39. La distribution des points de mesure est bonne, bien que des changements abrupts puissent survenir en raison de l'espacement des points. Ces résultats sont importants pour la surveillance et l'intervention agricole, notamment dans les zones à forte concentration.

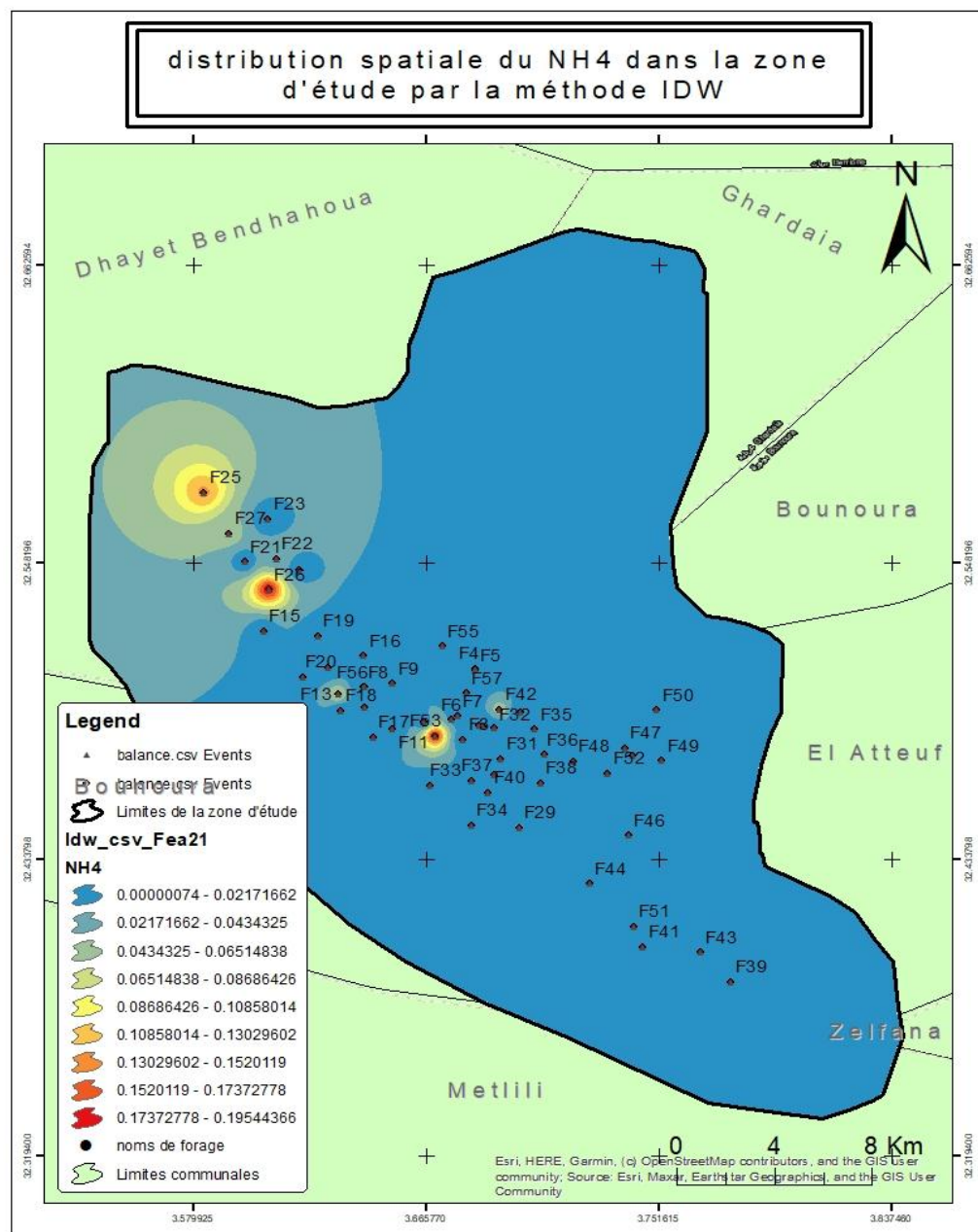


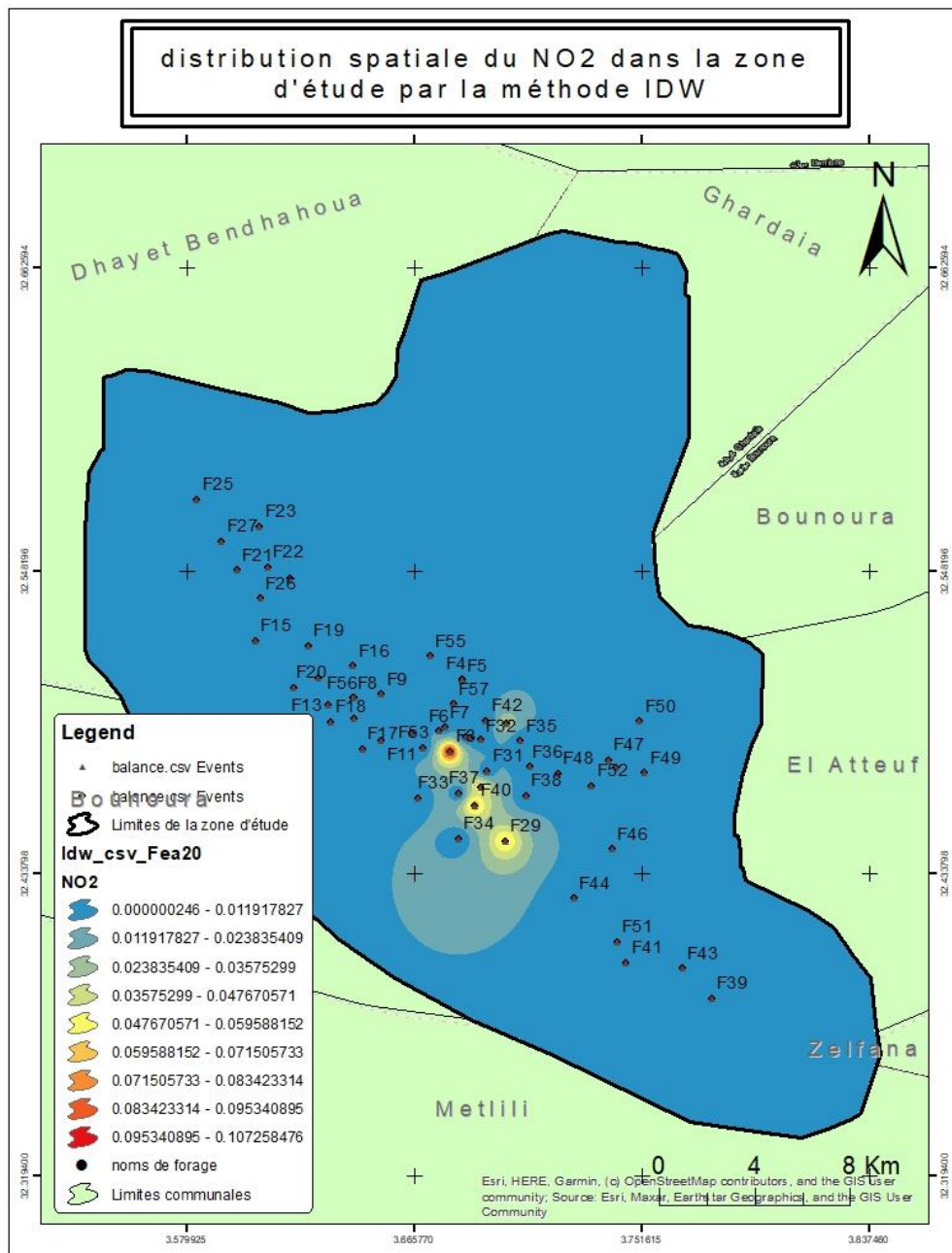
Figure IV.10 : Carte de la mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

La carte présente la distribution spatiale de l'ammonium (NH_4^+) dans la zone d'étude selon la méthode d'interpolation IDW.

- La quasi-totalité de la zone d'étude présente des concentrations très faibles en NH_4^+ , représentées par la couleur bleue (valeurs proches de 0).
- Les concentrations élevées d'ammonium sont localisées principalement à l'extrême nord-ouest de la zone, autour des forages F25, F26, F21, F22 et F23, où l'on observe des couleurs allant du jaune au rouge.
- Un autre foyer, plus restreint, est visible au centre de la zone, autour du forage F11.
- Les gradients de concentration sont très marqués autour des points à forte valeur, ce qui est typique de la méthode IDW.
- Le reste de la zone montre une homogénéité remarquable, suggérant une absence de pollution significative par l'ammonium sur la majorité du territoire étudié.

Origine des anomalies :

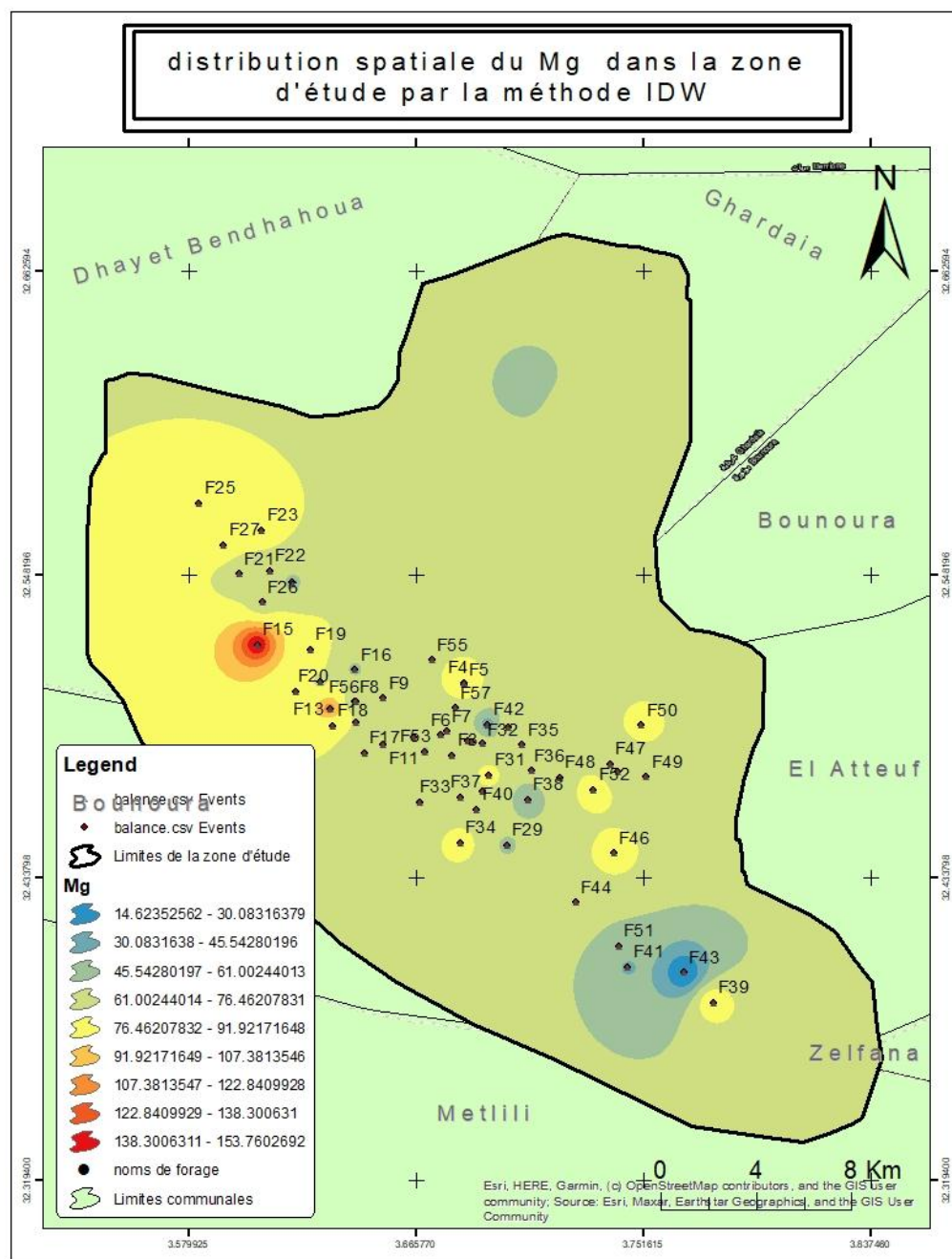
- Les foyers de concentration élevée peuvent être liés à des activités humaines localisées (rejets domestiques, agricoles ou industriels) ou à des conditions hydrogéologiques particulières (stagnation, faible renouvellement de l'eau).
- L'absence de NH_4^+ sur la majeure partie de la zone est un indicateur positif pour la qualité de l'eau souterraine.



Figur IV-22: Cartes de distribution spatiale de nitrites (NO₂) pour les campagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.

Les résultats montrent une concentration élevée de NO₂ dans le centre de la zone, notamment près des points F40 et F31, suggérant des sources locales importantes de pollution, comme les zones urbaines ou industrielles. La concentration de NO₂ est plus faible en périphérie.

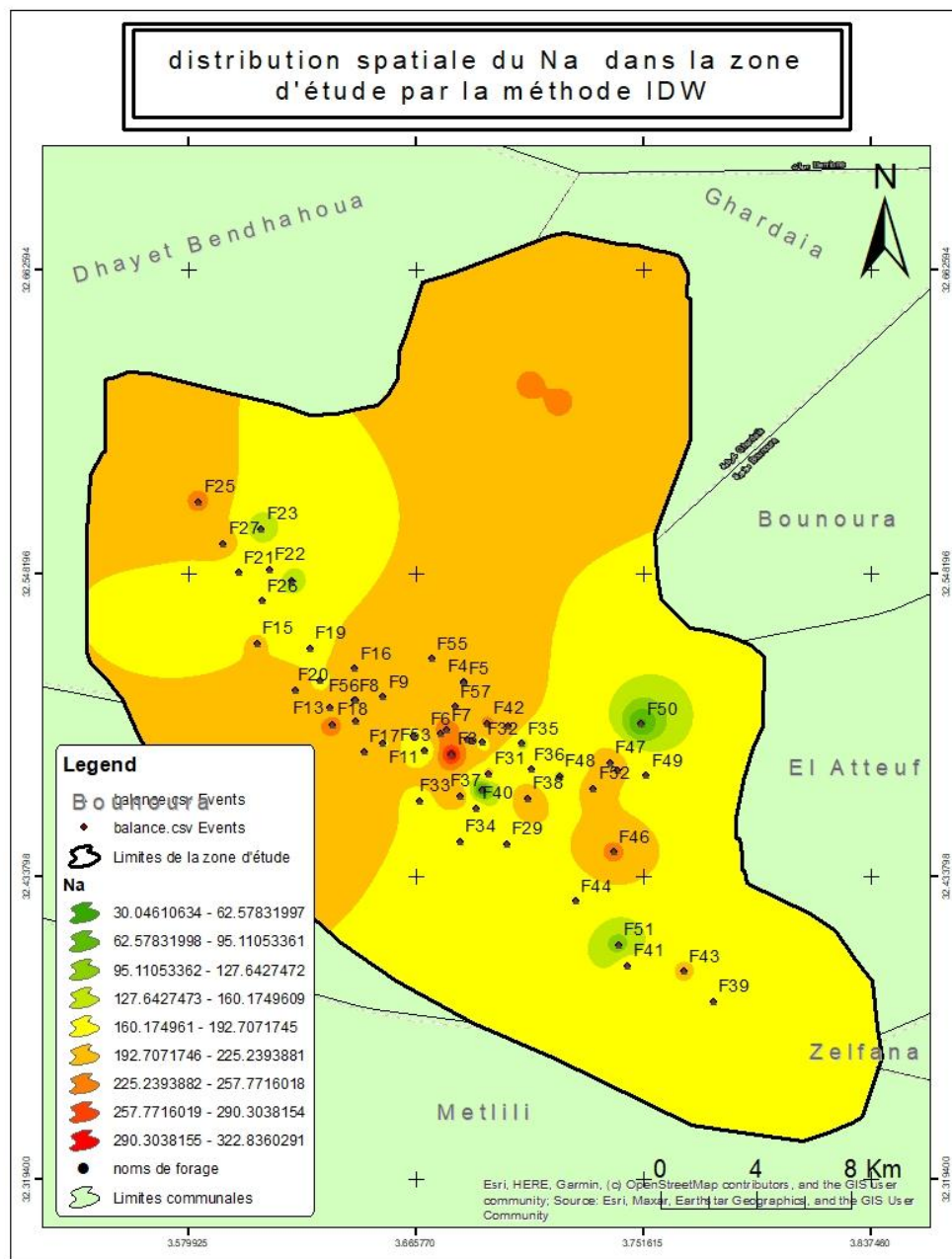
Cette analyse est cruciale pour identifier les zones les plus polluées et guider les politiques environnementales. Toutefois, il est recommandé de compléter cette approche par d'autres méthodes d'analyse, comme les modèles de dispersion, et de prendre en compte les sources de pollution spécifiques pour mieux comprendre l'impact sur la santé publique et l'environnement.



Figur IV-23: Cartes de distribution spatiale de magnésium (Mg) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

La carte illustre la distribution spatiale du magnésium (Mg) dans la zone d'étude, selon la méthode d'interpolation IDW.

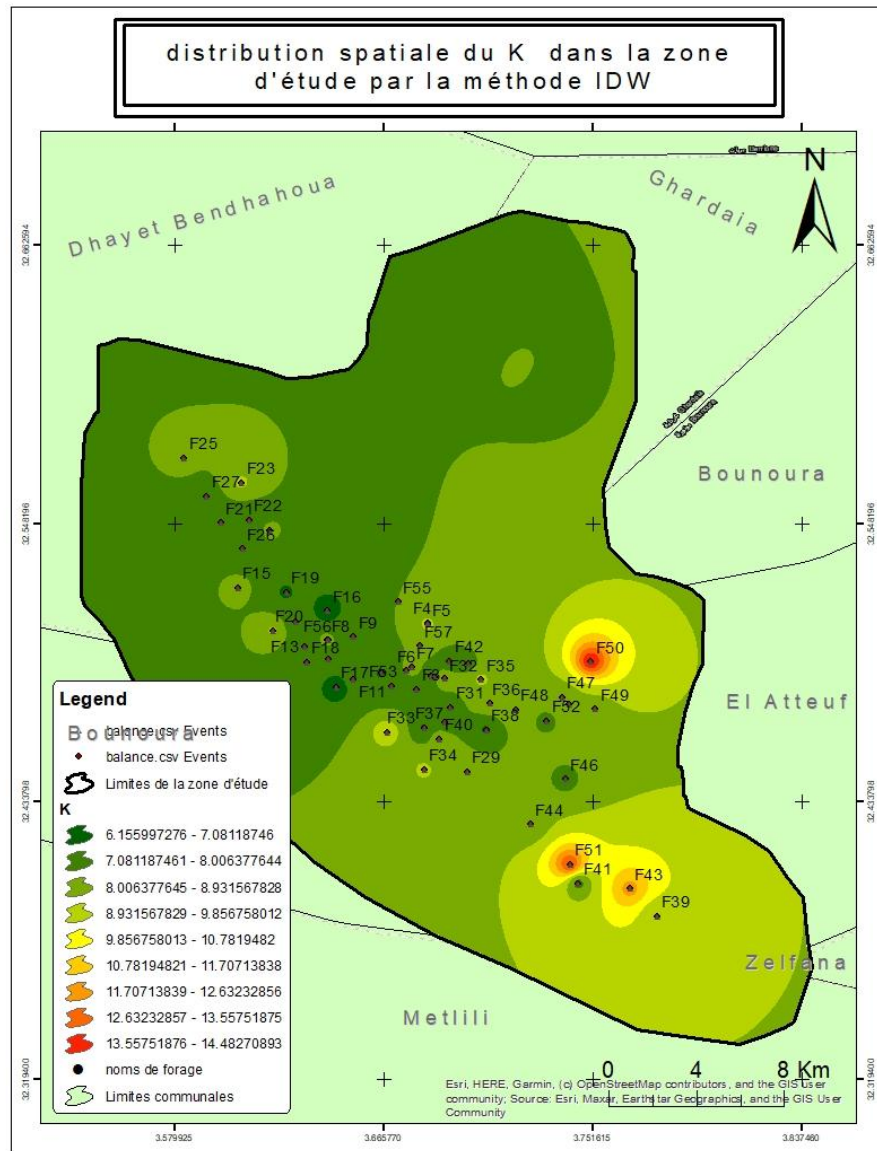
La carte montre une variation claire des concentrations de magnésium dans la région, avec des zones à haute concentration (indiquées par des couleurs rouges, comme les points F15 et F13), et des zones à faible concentration représentées par des couleurs plus froides (comme le jaune et le vert). Cette distribution peut être due à des caractéristiques géologiques ou environnementales locales influençant les concentrations de magnésium.



Figur IV-24: Cartes de distribution spatiale de sodium (Na) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

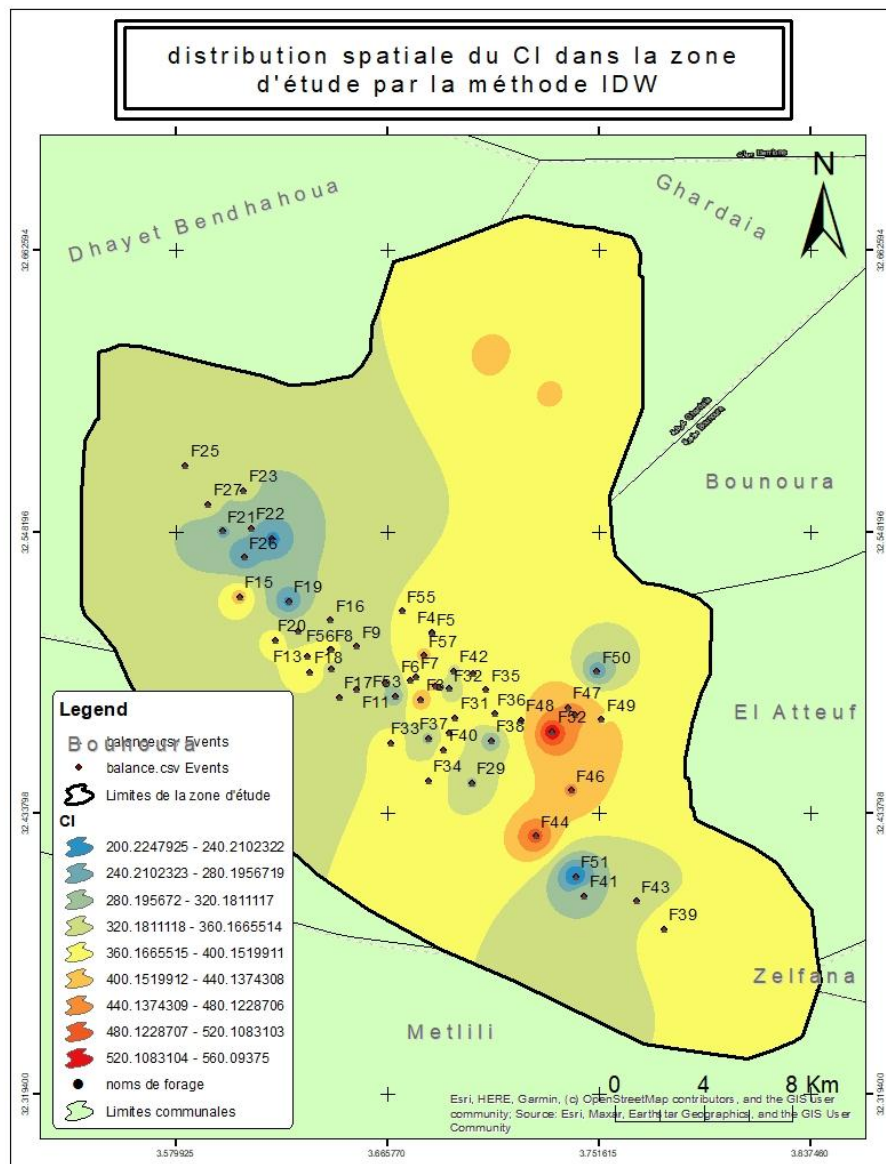
Grâce au dégradé de couleurs allant du vert (faible concentration) au rouge (forte concentration), on peut observer que certaines zones de la région étudiée présentent des concentrations élevées de sodium, notamment autour de F3 et F25. Cela peut indiquer des facteurs géographiques ou environnementaux spécifiques, tels que le type de sol ou la nature des eaux souterraines dans ces zones.

À l'inverse, les zones représentées par des couleurs vertes et jaunes, comme F50 et F40, montrent des concentrations faibles de sodium, ce qui pourrait suggérer un autre type de sol ou des sources d'eau moins affectées par les facteurs d'accumulation de sels.



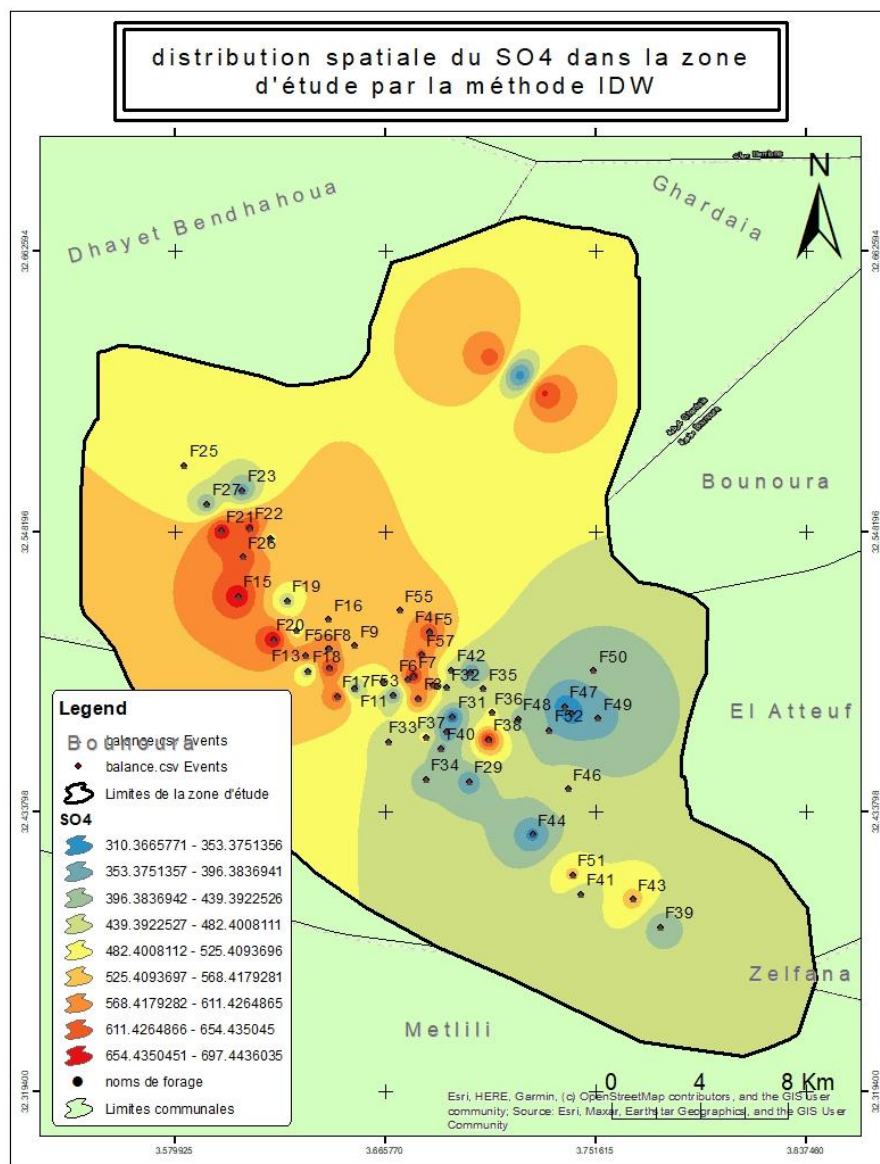
Figur IV-25: Cartes de distribution spatiale de potassium (K) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.

La carte montre la distribution spatiale du potassium (K) dans la zone d'étude, selon la méthode IDW. Les résultats révèlent des zones de forte concentration en potassium, notamment autour des points F50 et F51, avec des valeurs élevées signalées par les couleurs rouge et orange. Les autres zones présentent des concentrations modérées à faibles, indiquant une variabilité significative dans la distribution du potassium à travers la région, influencée par des facteurs géologiques et environnementaux.



Figur IV-26: Cartes de distribution spatiale de chlorure (Cl^-) pour les campagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.

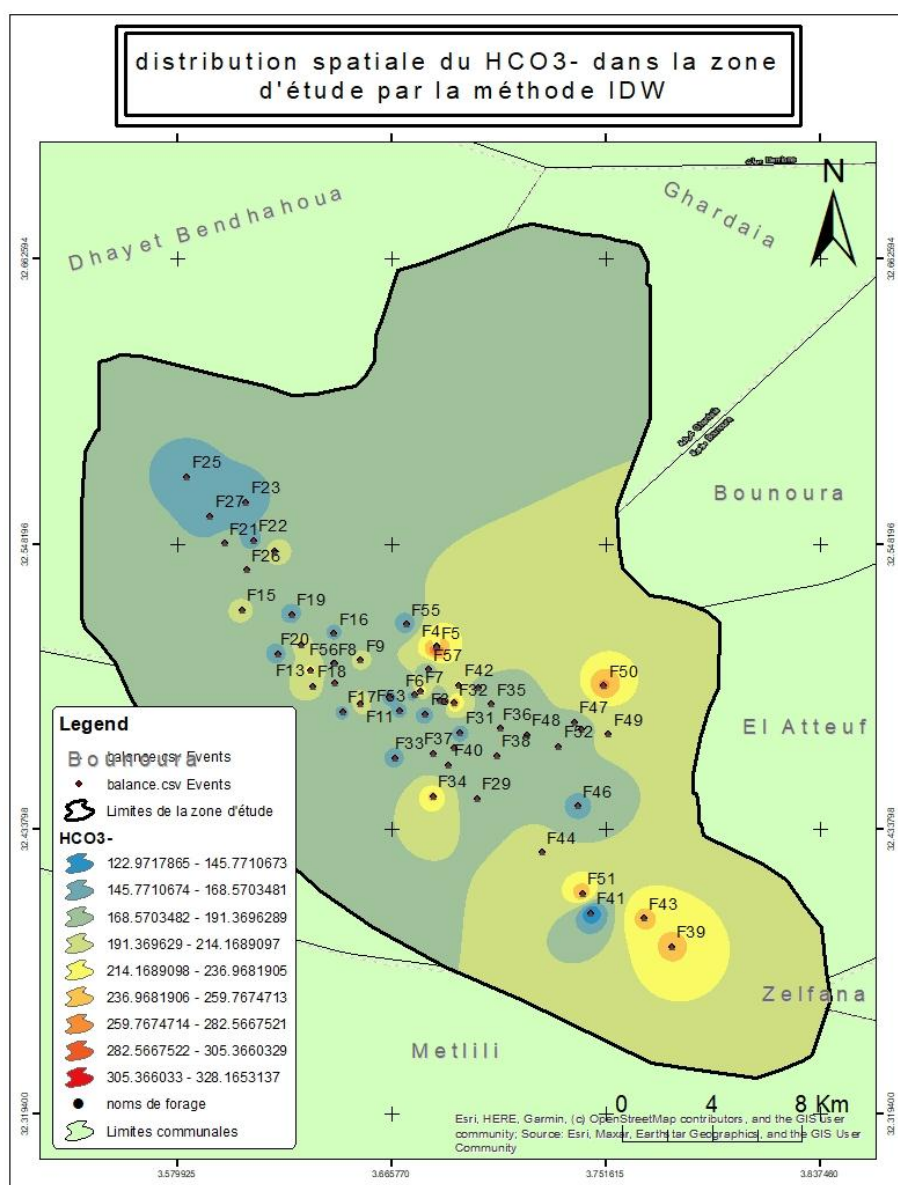
La carte présentée illustre la distribution spatiale du CI dans la zone d'étude à l'aide de la méthode IDW. Les données indiquent une variabilité marquée des concentrations de CI à travers la zone, avec des valeurs élevées principalement dans le sud-est, notamment autour des forages F44 et F52. Contrairement aux attentes initiales où ces zones étaient supposées avoir des concentrations modérées, les résultats actuels montrent que certains forages présentent des concentrations remarquablement élevées de CI, avec des valeurs proches de la saturation. Cela suggère une tendance à l'accumulation de CI dans certaines zones spécifiques, ce qui pourrait avoir des implications pour l'analyse géochimique de la zone.



Figur IV-27: Cartes de distribution spatiale de sulfate (SO₄²⁻) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW.

La carte ci-dessus illustre la distribution spatiale du sulfate (SO₄²⁻) dans la zone d'étude à l'aide de la méthode d'interpolation IDW. On observe une variabilité significative des concentrations de SO₄²⁻, avec des zones présentant des concentrations plus élevées, notamment dans le sud et le sud-ouest de la zone, près des points F15, F26, F21 et F20, où des concentrations maximales sont atteintes. Ces concentrations élevées sont indiquées par des zones colorées en rouge et orange, ce qui suggère une accumulation de SO₄²⁻ dans ces régions spécifiques.

Les zones environnantes montrent des valeurs de SO₄²⁻ plus faibles, comme celles situées au nord et à l'est, où les couleurs bleues et vertes sont prédominantes. Cela indique une faible concentration en sulfate dans ces zones.



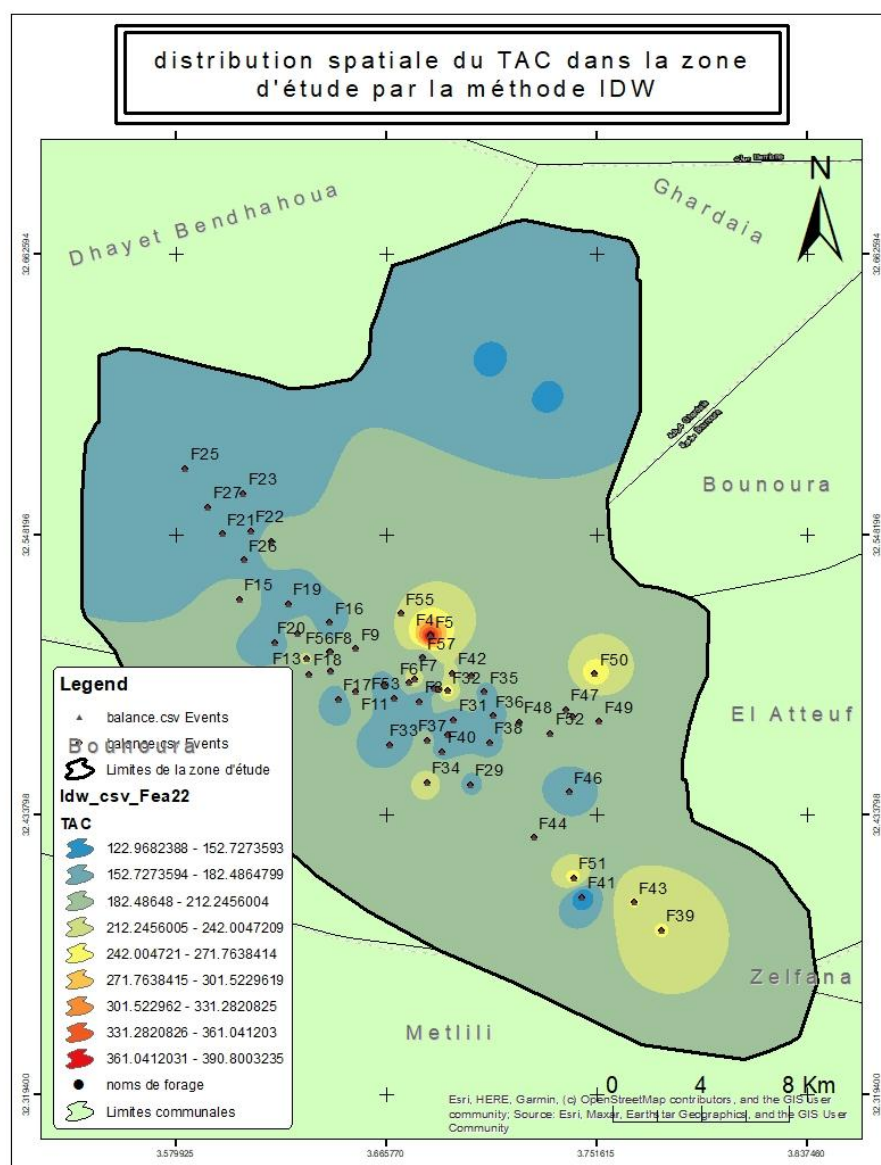
Figur IV-28: . Cartes de distribution spatiale de bicarbonates (HCO₃⁻) pour les campagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

En analysant la figure, on peut observer que certaines zones présentent des valeurs sensibles pour la concentration en HCO₃⁻, telles que :

La zone F57 : où la concentration en HCO₃⁻ est plus élevée que dans les zones environnantes, ce qui pourrait indiquer une accumulation accrue ou une précipitation possible de HCO₃⁻ dans cette région.

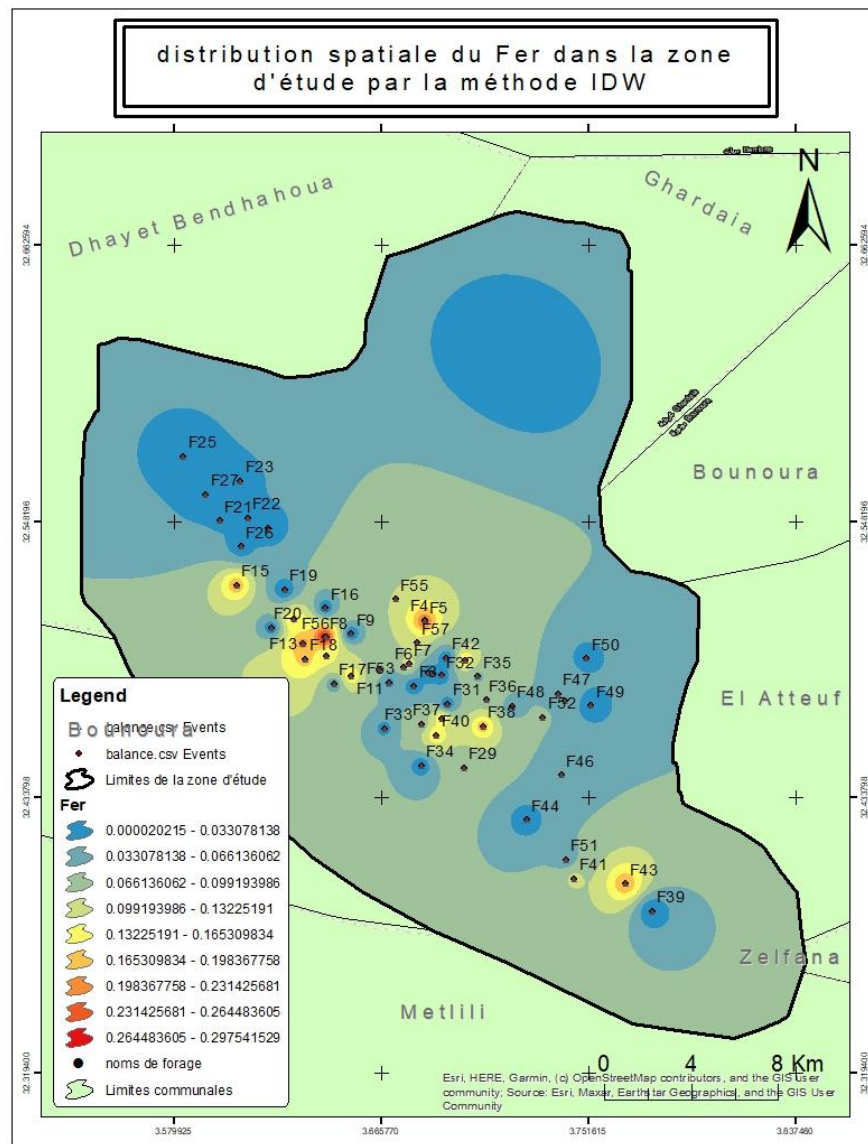
La zone F36-F41 : ici, on remarque une certaine variation des concentrations, où les valeurs se rapprochent des niveaux saturés ou partiellement saturés, ce qui pourrait suggérer des changements dans les processus hydrologiques influençant la concentration en HCO₃⁻ dans cette section.

Ces zones montrent une variation notable des valeurs de HCO₃⁻, ce qui les rend sensibles



Figur IV-29: Cartes de distribution spatiale de TAC (Titre Alcalimétrique Complet) pour les compagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

la distribution spatiale du TAC dans la zone d'étude selon la méthode IDW. Contrairement aux données antérieures où les valeurs de TAC étaient généralement plus faibles, les résultats actuels révèlent des zones modérément saturées, avec des valeurs de TAC variant de 242 à 331, indiquant une tendance à l'augmentation des concentrations en certains points de la zone d'étude. Cette distribution suggère une variabilité spatiale significative qui pourrait être liée à des différences géologiques locales ou à des variations dans les conditions de forage. Les zones les plus saturées (représentées en rouge et jaune) se trouvent principalement dans les secteurs proches de Ghardaïa et Bounoura, tandis que les zones moins saturées (en bleu)



Figur IV-30: Cartes de distribution spatiale de fer (Fe) pour les campagnes de mesure 2024 à l'aide de la méthode IDW

la distribution spatiale du fer dans la zone d'étude selon la méthode IDW. Les données indiquent que les concentrations de fer varient considérablement à travers la région, avec des zones présentant des concentrations élevées et d'autres des concentrations faibles. Contrairement à certaines études précédentes, qui suggéraient une distribution plus homogène du fer, les résultats actuels mettent en évidence une variabilité marquée, avec des valeurs de concentration qui vont de 0.000022 à 0.264843065. Ces données suggèrent une tendance à la concentration du fer dans certaines régions spécifiques, notamment autour des zones les plus saturées en fer (comme F18 et F57), ce qui pourrait indiquer des zones potentielles pour des études ou des interventions futures.

Conclusion

Les résultats de l'analyse des données des eaux souterraines entre 2021 et 2025 ont montré des variations naturelles annuelles dans la plupart des paramètres physiques et chimiques. La qualité de l'eau a été classée entre "mauvaise qualité" et "très mauvaise qualité" tout au long des années étudiées, avec une légère augmentation en 2024. Des hausses préoccupantes ont été observées pour certains paramètres tels que le fer, les sulfates et l'ammonium, soulignant la nécessité de surveiller ces éléments pour éviter les impacts négatifs sur la santé publique et l'environnement.

Les diagrammes chimiques ont montré que l'eau présente un faciès calcique-magnésien et chloruré-sulfaté, ce qui indique une influence géologique évidente. Les analyses spatiales ont révélé des variations dans les concentrations des ions, avec certaines zones nécessitant une surveillance particulière.

Dans l'ensemble, bien que la qualité de l'eau soit acceptable pour les usages agricoles et industriels, une surveillance continue et des mesures correctives sont nécessaires pour maintenir la durabilité de ces ressources et garantir la conformité aux normes réglementaires.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'étude approfondie de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Ghardaïa, menée sur la période 2021–2025 à partir de 57 puits artésiens, met en évidence une stabilité globale des paramètres majeurs (pH, température, calcium, magnésium, sodium, bicarbonate, chlorure, sulfate, fer, ammonium, nitrites), avec des variations saisonnières modérées et des différences annuelles statistiquement significatives pour la plupart des ions majeurs.

La qualité de l'eau souterraine est jugée « bonne à acceptable » selon l'indice IQES, avec une amélioration relative en 2024 (indice proche de 85), bien que l'eau ne soit jamais classée comme « excellente ». Le potassium est le seul paramètre présentant un dépassement constant et important de la norme, nécessitant une surveillance accrue. D'autres paramètres, comme la conductivité, le sodium et le sulfate, affichent des valeurs élevées mais restent généralement dans les limites réglementaires ou proches des seuils de potabilité.

L'analyse spatiale révèle une forte hétérogénéité, avec des zones à minéralisation élevée (centre, sud-est, autour de Zelfana) et des secteurs à qualité meilleure (nord-ouest). Les faciès hydro chimiques dominants sont de type calcique-magnésien et chloruré-sulfaté, traduisant l'influence des roches évaporitiques et du contexte géologique régional. Les diagrammes de Piper, Schoeller-Berkaloff et Wilcox confirment l'homogénéité chimique des eaux, leur dureté et leur minéralisation, tout en soulignant l'absence de pollution majeure par les nitrites, l'ammonium ou le fer.

Sur le plan de la gestion, l'eau souterraine reste une ressource vitale mais fragile, soumise à des risques de salinisation et de dépassement ponctuel de certains ions, notamment dans les zones à forte exploitation ou à recharge limitée. Les résultats appellent à une surveillance régulière, à la protection des zones vulnérables et à la mise en place de solutions de traitement ciblées (notamment pour le potassium et la salinité) afin de garantir la durabilité de la ressource pour la consommation humaine et l'irrigation.

En résumé :

- La qualité des eaux souterraines de Ghardaïa est globalement satisfaisante mais hétérogène.
- Les paramètres majeurs restent stables, sauf le potassium qui dépasse les normes.
- Les zones à forte minéralisation nécessitent une gestion et une surveillance particulières.
- L'eau est adaptée à la consommation et à l'irrigation, mais la vigilance s'impose pour préserver la ressource à long terme.

Conclusion générale

- En conclusion, cette étude fournit une base solide pour la gestion durable des ressources en eau souterraine dans la région, en insistant sur la nécessité d'un suivi régulier pour anticiper et prévenir toute dégradation future, en particulier dans les secteurs présentant des concentrations élevées en certains ions.

L'étude approfondie de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Ghardaïa, menée sur la période 2021–2025 à partir de 57 puits artésiens, met en évidence une stabilité globale des paramètres majeurs (pH, température, calcium, magnésium, sodium, bicarbonate, chlorure, sulfate, fer, ammonium, nitrites), avec des variations saisonnières modérées et des différences annuelles statistiquement significatives pour la plupart des ions majeurs.

La qualité de l'eau souterraine est jugée « bonne à acceptable » selon l'indice IQES, avec une amélioration relative en 2024 (indice proche de 85), bien que l'eau ne soit jamais classée comme « excellente ». Le potassium est le seul paramètre présentant un dépassement constant et important de la norme, nécessitant une surveillance accrue. D'autres paramètres, comme la conductivité, le sodium et le sulfate, affichent des valeurs élevées mais restent généralement dans les limites réglementaires ou proches des seuils de potabilité.

L'analyse spatiale révèle une forte hétérogénéité, avec des zones à minéralisation élevée (centre, sud-est, autour de Zelfana) et des secteurs à qualité meilleure (nord-ouest). Les faciès hydro chimiques dominants sont de type calcique-magnésien et chloruré-sulfaté, traduisant l'influence des roches évaporitiques et du contexte géologique régional. Les diagrammes de Piper, Schoeller-Berkaloff et Wilcox confirment l'homogénéité chimique des eaux, leur dureté et leur minéralisation, tout en soulignant l'absence de pollution majeure par les nitrites, l'ammonium ou le fer.

Sur le plan de la gestion, l'eau souterraine reste une ressource vitale mais fragile, soumise à des risques de salinisation et de dépassement ponctuel de certains ions, notamment dans les zones à forte exploitation ou à recharge limitée. Les résultats appellent à une surveillance régulière, à la protection des zones vulnérables et à la mise en place de solutions de traitement ciblées (notamment pour le potassium et la salinité) afin de garantir la durabilité de la ressource pour la consommation humaine et l'irrigation.

Recommandations et perspectives

Recommandations :

1. Renforcer la surveillance et le suivi régulier : Il est essentiel de maintenir un suivi constant de la qualité physico-chimique des eaux souterraines, notamment pour les paramètres présentant des dépassements ou des fluctuations importantes, tels que le potassium, la conductivité et le sodium.
2. Mettre en place des mesures de gestion durable : L'exploitation des forages doit être rationalisée afin d'éviter la surexploitation des nappes, en particulier dans les zones à forte minéralisation. Il est recommandé de limiter les prélèvements dans les secteurs vulnérables et de promouvoir une gestion raisonnée de la ressource, notamment pour l'irrigation agricole.
3. Valoriser et réutiliser les eaux usées traitées : Il convient de promouvoir l'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation agricole, conformément aux normes de l'OMS et de la FAO, afin de réduire la pression sur les nappes fossiles et d'améliorer la durabilité des systèmes agricoles locaux.
4. Moderniser et réhabiliter les infrastructures hydrauliques : Il est nécessaire de poursuivre la modernisation du réseau d'approvisionnement en eau potable, d'augmenter les capacités de stockage et de traitement, et de lutter contre les pertes et fuites dans le réseau.
5. Sensibiliser et impliquer les usagers : La réussite d'une gestion durable repose sur la sensibilisation des agriculteurs, des gestionnaires et de la population à l'importance de la préservation de la ressource, à l'économie d'eau et au respect des règles collectives adoptées historiquement dans la vallée du M'zab.
6. Renforcer la recherche et l'innovation : Il est conseillé de poursuivre les recherches sur la dynamique des aquifères, les interactions eau-roche, l'impact du changement climatique et les solutions de traitement adaptées aux problématiques locales. Le développement de modèles prédictifs et de techniques de télédétection pourrait également améliorer la gestion future des ressources en eau.

Perspectives :

1. Vers une gestion intégrée et participative : L'avenir de la gestion des ressources en eau repose sur une approche intégrée, combinant gestion quantitative et qualitative,

Conclusion générale

valorisation des eaux non conventionnelles, et une forte implication des acteurs locaux (collectivités, agriculteurs, industriels, société civile).

2. Adaptation au changement climatique : Face à la raréfaction des ressources et aux aléas climatiques, il sera nécessaire d'adapter les pratiques agricoles, d'optimiser la recharge artificielle des nappes, et de diversifier les sources d'approvisionnement afin d'assurer la sécurité hydrique de la région.
3. Préservation du patrimoine hydrique et transmission du savoir-faire : Il est primordial de préserver le patrimoine naturel et culturel lié à l'eau dans la vallée du M'zab, en s'appuyant sur les règles traditionnelles de gestion tout en intégrant les innovations technologiques et scientifiques contemporaines.

References *bibliographies*

Références bibliographiques

1. Masmoudi, R. (2009). Étude de la fiabilité des systèmes de distribution d'eau potable en zones arides, cas de la région de Biskra. Université Mohamed Khider – Biskra.
2. F. Rejsek, Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, 2002.
3. B. Hasnia, "Chimie des eaux," 2018
4. J. Rodier, B. Legube, and N. Merlet, "L'analyse de l'eau" Dunod Paris," ed, 2009.
5. S. Hébert and S. Légaré, "Suivi de la qualité de l'eau des rivières et des petits cours d'eau," 2000.
6. "Manuel des analyses physico-chimique des eaux de boisson " LABORATOIRE CENTRAL SERVICE BACTERIOLOGIQUE , Direction d'unité Ouargla.
7. "Manuel des analyses physico-chimique des eaux de boisson " LABORATOIRES DE L'ADE DE GHARDAIA.
8. H. Haddad and H. J. L. J. P.-I.-E.-I.-. Ghoualem, "CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU BASSIN HYDROGRAPHIQUE COTIER ALGEROIS," no. 18, 2014.
9. F. Menet-Nedelec and A. Grouhel-Pellouin, "Evaluation de l'état chimique DCE des masses d'eau littorales du bassin Seine-Normandie," 2019.
10. S. Amrani and S. J. S. E. M. Hinaje, "Utilisation des analyses hydro-géochimiques et des analyses en composantes principales (ACP) dans l'explication du chimisme des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire entre Timahdite et Almis Guigou (Moyen Atlas, Maroc)," no. 6, pp. 1-14, 2014.
11. Zereg, S., Boudoukha, A., & Benaabidate, L. (2018). Impacts des conditions naturelles et des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines dans la plaine de Tebessa, Algérie. Sustainable Environment Research, Volume 28, Numéro 6, pp. 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.susenv.2018.01.005>
12. Djidel, T. (2011). Étude de la préparation d'un charbon actif à partir des grains d'olives et application sur des rejets industriels. Thèse de Magister, Université Med-Boudiaf d'Oran.
13. Saidani, M.A., Kuper, M., Kemerink-Seyoum, J. (2023). Sharing difficult waters: Community-based groundwater recharge and use in Algeria and India. Water Alternatives,
14. Rahmani, S.E., Brahim, C. (2017). Water supply prediction for the next 10 years in Algeria: risks and challenges. Irrigation and Drainage Systems Engineering.

15. Saidani, A.M., Kuper, M., Hamamouche, F.M., Benmihoub, A. (2022). Reinventing the wheel: adapting a traditional circular irrigation system to modern agricultural extensions in Algeria's Sahara. *New Medit.*
16. Baudron, P., Saidani, M.A., Kuper, M., Leduc, C. (2024). Weaving different forms of knowledge of managed aquifer recharge in a Saharan oasis (Algeria). *Journal of Hydrology*, 615.
17. S. ZEREG, "Impacts de l'irrigation sur la qualité des eaux souterraines des régions semi-arides. Cas de la région de Tébessa," Université de Batna 2, 2019.
18. M. Koussa, "Apport d'un système d'information géographique pour la gestion des ressources en eau de la région de Djelfa," Université Mohamed Khider-Biskra, 2017

Annexe



Figur 0-2: pH mètre (HACH, AD 1000)



Figur 0-1: Conductimètre (LF 538).



Figur 0-3: Turbidimètre (HACH, TL2300)



Figur 0-4: Spectrophotomètre UV- Visible (HACH, ODYSSEY).



Figur 0-5: Spectrophotomètre à flamme (JENWAY, PFP7).



Figur 0-6: Spectrophotomètre UV- Visible (HACH, DR 6000).

ANNEXE

calcul des indicateurs statistiques

2021	2022	2023	2024	2025	2021	2022	2023	2024	2025
T°C	T°C	T°C	T°C	T°C	pH	pH	pH	pH	pH
المتوسط:	Moyenne :	Moyenne :	Moyenne :	Moyenne :	المتوسط:	Moyenne :	Moyenne :	Moyenne :	Moyenne :
19,59122807	19,94782609	18,55918367	21,38545455	18,5625	7,700701754	7,537391304	7,305	7,291272727	7,383333333
الانحراف المعياري:	Écart-type :	Écart-type :	Écart-type :	Écart-type :	الانحراف المعياري:	Écart-type :	Écart-type :	Écart-type :	Écart-type :
4,42549554	4,789741716	5,344534434	3,532108213	3,415627383	0,159800969	0,226739026	0,057227616	0,207242103	0,172401341
الحد الأدنى:	Minimum :	Minimum :	Minimum :	Minimum :	الحد الأدنى:	Minimum :	Minimum :	Minimum :	Minimum :
14,3	13,4	12,3	14,5	14,7	7,44	7,11	7,2	6,7	7
الحد الأقصى:	Maximum :	Maximum :	Maximum :	Maximum :	الحد الأقصى:	Maximum :	Maximum :	Maximum :	Maximum :
28,6	28,7	29,1	27,4	25,5	8,06	8,07	7,42	7,72	7,5
معامل الاختلاف:	Coefficient de variation(CV) :	Coefficient de variation(CV) :	Coefficient de variation(CV) :	Coefficient de variation(CV) :	معامل الاختلاف:	Coefficient de variation(CV) :	Coefficient de variation(CV) :	Coefficient de variation(CV) :	Coefficient de variation(CV) :
0,225891686	0,240113469	0,287972495	0,165164047	0,184006862	0,020751481	0,030081897	0,007834034	0,02842331	0,023350069

Diagrammes (v9.01) C:\Users\pc\Desktop\balance.xlsx

FichierAffichageEditionDiagrammesConstantesA proposLangueOptionsQuitterManuelsRouvrir

Trailer des fichiers Excel

Fichier exemple
Tableur (balance.xlsx)
fichier *.DIA TXT (tab) CSV (.)
*.DIA : ne lire que les données
Enregistrer le tableau => *.DIA
Modèle Balance.xls
Interpolation entre 2 Points
DIONEX remplacer n.a. et ./.

Piper
Scheller Berkaloif
Stiff
Stabler
Kojinski
graphes binaires XY

Riverside / Wilcox
Statistique
Simulation pH
Phreeq
C14
Ternaires
Durov
Chadah

30 groupes

1
1
2
3
4
5
6

Nom/Libellé => Légende

Echantillons => Légende

FondBord

EffacerCopierCollerTrier

Approximation:

☒ WATEQ Debye-Hückel
☐ Debye-Hückel simple
☐ Debye-Hückel
☐ Güntelberg
☐ Davies

=> 1..30

Grouper

BD H+ ore.fr

Extraire

Pres

57 analyses ("nom" en ligne L1) C:\Users\pc\Des

Saisie du nom de groupe OU choix du groupe courant

cCALC => c25Lab. c25°C

<< Début < Cations Anions > Fin >> Insérer une analyse Supprimer vers le bas haut Tri ab croissant décroissant Tri nb Groupe courant = 1 ()

n	Nom	Libellé	Date	Groupe	Piper	Schoeller	Stiff	XY	Kojinski	Phreeq	Stat	TDS	T°C	pH	c25°C	c25Lab	cCALC	cCa%	BCa_ca	BCa_bid	BCa_tdt
1	F2	Ben smara 01	1	1								1619	23	7.2	2290	2419	+3%				
2	F6	Melk'a bas (Parc) ADE	1	1				oui	oui	oui	oui	1339	20.6	7.2	2310	2121	-4%				
3	F7	Hadi Messaoud	1	1				oui	oui	oui	oui	1795	23.1	7.2	2440	2702	+5%				
4	F10	Bouhraoua N°3 (Sonelga)	1	1				oui	oui	oui	oui	1614	23	7.2	2200	2381	+4%				
5	F11	Oued nechou N°3 (Sinitr)	1	1				oui	oui	oui	oui	1926	26.4	6.7	2410	2647	+5%				
6	F12	HAI EL MOUJAHIDINE	1	1				oui	oui	oui	oui	1621	23	7.2	2310	2410	+3%				
7	F13	TEM 03	1	1				oui	oui	oui	oui	1930	27.4	7.2	2530	2611	+2%				
8	F17	Bouchendjane	1	1				oui	oui	oui	oui	1676	25.1	7.5	2270	2455	+4%				
9	F18	Baba saad Batoir	1	1				oui	oui	oui	oui	1475	15.8	7.7	1995	2184	+5%				
10	F19	Chaabet nichane	1	1				oui	oui	oui	oui	1359	25	7.2	2110	2038	-2%				
11	F20	Ben ghanem	1	1				oui	oui	oui	oui	1371	26	7.5	1992	2062	+2%				
12	F21	Ben djabline	1	1				oui	oui	oui	oui	1613	33.1	7.2	2630	2339	-6%				
13	F22	Touzouz 01 Remplacement	1	1				oui	oui	oui	oui	1648	26.9	7.2	2310	2414	+2%				
14	F23	Touzouz 02 (sinistré)	1	1				oui	oui	oui	oui	1469	26.1	7.2	2100	2165	+2%				
15	F24	Bouchene	1	1				oui	oui	oui	oui	1769	33.1	7.2	2900	2601	-5%				
16	F25	Chaabet Telli	1	1				oui	oui	oui	oui	1443	24.9	7.2	2230	2158	-2%				
17	F26	Ben djabline N°2 (Beka)	1	1				oui	oui	oui	oui	1507	25.1	7.2	2260	2214	-1%				
18	F27	Touzouz 03	1	1				oui	oui	oui	oui	1545	25	7.2	2400	2354	-1%				
19	F28	Akbelkhal	1	1				oui	oui	oui	oui	1224	17.3	7.2	2020	1844	-5%				

ANNEXE

SONDAGE *Boudoua* 3 B0

Carte: *Ghardaia* N° 91 143 18 N° INVENTAIRE

Date des travaux: 1976 Long: X 560-500

Echelle de la coupe: 1:200 Lat: Y 210-150

Stratigraphie, Renseignements divers
A.E.P. - Algérie

Extrait de carte
Echelle

Profondeur en mètres	Tubages et Orientation	Plans d'axe	Coupes	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Type
0				Calcaire grisâtre dolomitique	Turonien
25				Argile grise-bleue épaisse avec passages de calcaire grisâtre	
50					
75					
100				Dolomite grise	Cénomanien
125				Argile grise et noire avec passages de calcaire dolomitique grisâtre	
150				Argile sableuse	
175				Sable argileux rouge	
200				Argile bariolée	Intercalaire
225				Sable rouge légèrement argileux	
250				Argile bariolée	
275				Sable rouge légèrement argileux	
300				Argile bariolée	Continental
325				Argile grise sabineuse	
350				Sable rouge et grise	
375					

mm à jour par

Caractères physico-chimiques

Date de prélèvement	Prof. de la nappe	Niveau piézom.	TENEUR EN MG PAR LITRE										pH	ch	R.S. en mg/l	DÉBIT l/sec	Rabat Δ H	T°
			Ca	Mg	K	Na	CL	SO ₄	CO ₃	CO ₂								

Étude des échantillons prélevés

N°

SONDAGE BENI ISGUENE 3 N° 30 18

Carte: *Ghardaia* 1:200 000 n° 91 Long: X 560-500

Date des travaux: 31.X.1969 Lat: Y 210-150

Echelle de la coupe: 1:2 000 Z 4827

Bibliographie, Renseignements divers

Extrait de carte
Echelle 1:200 000

Profondeur en mètres	Tubages et Orientation	Plans d'axe	Coupes	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE	Type
0				Calcaires blancs et jaunâtres	Turonien
20				Calcaires et marbres	
40				Marbres blancs gris et noirs	Cénomanien
60				Argiles grises, compactes, quelques passages argonneux	
80				Argiles grises et noires avec passages blancs, un peu de argone	
100				Argiles brunes et grises, un peu de argone	
120				Argiles brunes et grises	ZONE DE PASSAGE
140					
160					
180					
200				Argiles très fines, grises, jaunes et rouges, parfois argonneux et argileux, avec bancs de grès fins, tendres, grès fins, parfois rouges, en nodules, argonneux de marbre	A.E.B.E.N
220					
240					
260					
280					
300					
320					
340					
360					
380					
400					
420					

mm à jour par

Caractères physico-chimiques

Date de prélèvement	Prof. de la nappe	Niveau piézom.	TENEUR EN MG PAR LITRE										pH	ch	R.S. en mg/l	DÉBIT l/sec	Rabat Δ H	T°
			Ca	Mg	K	Na	CL	SO ₄	CO ₃	CO ₂								
7.2.1961																		

Étude des échantillons prélevés

N° 3992 4015

ANNEXE

n	Nom	Libellé	y	x	Groupe	T.C	pH	o25 C	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	SO4	Fer	NO2	NH4	TAC
1	F1	Ben smara 01	32.48555555	3.685	1	23	7.2	2290	144.288	69.984	222.22	7.69	158.6	415.509	601.2	0	0	0	158.6
2	F2	Melika bas (Parc) ADE	32.485037	3.68652	1	20.6	7.2	2310	152.304	65.124	231.25	8.18	161.04	382.892	338.7	0	0	0	161.04
3	F3	Hadj Messaoud	32.4799	3.67919	1	23.1	7.2	2440	147.494	64.152	325	7.69	148.84	455.216	636.1	0.001	0.109	0	148.84
4	F4	Bouhraoua N 3 (Sonegaz	32.507333	3.683623	1	23	7.2	2200	133.065	67.068	195.45	7.69	146.4	405.582	659	0	0	0	146.4
5	F5	Dued nechou N 3 (Sinitré	32.50666667	3.68361111	1	26.4	6.7	2410	161.923	94.284	212.5	9.16	395.24	401.327	651	0.235	0	0	395.24
6	F6	HAI EL MOUJAHIDINE	32.487616	3.674764	1	23	7.2	2310	144.288	52.488	227.77	7.69	146.4	412.672	629.4	0.001	0	0	146.4
7	F7	TEM 03	32.489076	3.677251	1	27.4	7.2	2530	163.53	71.93	255.55	8.33	248.88	385.73	696.1	0.121	0.002	0	248.88
8	F8	Bouchemdjane	32.50027778	3.64222222	1	25.1	7.5	2270	189.17	68.04	218.75	8.3	183	388.56	619.8	0.302	0.003	0	183
9	F9	Baba saad Batoir	32.501619	3.653297	1	15.8	7.7	1995	136.18	64.152	218.75	8	197	323.331	527.6	0	0	0	197
10	F10	Chaabet nichane	32.48666667	3.66472222	1	25	7.2	2110	107.414	64.152	186.36	6.92	158.6	317.658	518.1	0.08	0	0	158.6
11	F11	Ben ghanem	32.484204	3.653348	1	26	7.5	1992	160.32	70.956	190.9	7.5	212.28	321.91	406.8	0.164	0.006	0	212.28
12	F12	Ben djablaine	32.492485	3.642757	1	33.1	7.2	2630	120.24	76.302	200	7.5	180.56	353.11	675.3	0.142	0	0	180.56
13	F13	Touzouz 01 Remplacent	32.4975	3.63055555	1	26.9	7.2	2310	118.64	118.58	190.9	7.5	224.48	382.89	604.8	0.215	0.001	0.076	224.48
14	F14	Touzouz 02 (sinistré)	32.507679	3.629437	1	26.1	7.2	2100	168.33	74.844	181.81	7.5	207.4	329.003	493.7	0.175	0.001	0	207.4
15	F15	Bouchene	32.521863	3.605601	1	33.1	7.2	2900	168.336	76.788	195.45	8.33	198.86	317.658	518.1	0.189	0	0	198.86
16	F16	Chaabet Telli	32.512418	3.642484	1	24.9	7.2	2230	112.224	57.348	222.22	6.15	158.6	330.42	556.4	0.005	0	0	158.6
17	F17	Ben djablaine N 2 (Beka)	32.48093333	3.64611111	1	25.1	7.2	2260	104.208	67.0688	205.55	6.15	158.6	329.0036	636.5	0.04	0	0	158.6
18	F18	Touzouz 03	32.491277	3.634046	1	25	7.2	2400	190.78	75.816	250	7.5	197.6	385	438.2	0.181	0.006	0	197.6
19	F19	Akhelkhal	32.51988	3.625475	1	17.3	7.2	2020	129.859	81.648	166	6.92	158.6	226.899	454	0	0	0	158.6
20	F20	Sidi Mhammed	32.504225	3.620161	1	19.2	7.2	2300	168.336	76.788	225	9.09	153.72	381.474	700	0.01	0	0	153.72
21	F21	Sidi ABAZ (daia)	32.54857	3.598793	1	19.3	7.72	1865	131.462	66.096	163.63	7.27	170.8	275.115	688.5	0.03	0	0	170.8
22	F22	Boubrik	32.54972222	3.61027777	1	19.1	7.2	1948	139.478	67.096	177.27	7.27	161.04	280.748	663.2	0.03	0	0.029	161.04
23	F23	Laadira	32.565	3.60722222	1	19.3	7.2	1973	160.32	87.48	141.66	9.09	153.72	331.84	373.3	0.02	0	0	153.72
24	F24	Chaabat el hamra	32.54527778	3.61888888	1	19.1	7.2	1610	117.034	57.348	145.83	8.18	207.4	224.062	516	0	0	0	207.4
25	F25	Laariche	32.57527778	3.58361111	1	19	7.2	2300	163.526	76.788	231.25	8.18	158.6	360.202	501.7	0	0	0.135	158.6
26	F26	Oum Djedar	32.53797	3.607507	1	19.2	7.2	1730	128.256	67.068	163.63	7.27	170.8	246.752	644.7	0.01	0	0.195	170.8
27	F27	Bounoura (ouil)	32.559378	3.592914	1	19.7	7.5	2430	158.704	87.48	215	7.69	158.6	340.348	402	0	0	0.058	158.6
28	F28	Garat attam	32.490459	3.700437	1	21.2	7.2	2110	144.28	74.844	220	7.69	180.66	371.5475	329.9	0.185	0.04	0	180.66
29	F29	Beni -isguen (moumou)	32.44611111	3.7	1	21.3	7.2	2070	168.336	58.32	168.88	8.46	178.12	313.404	357.1	0.074	0.061	0.023	178.12
30	F30	Beni -isguen (Bab El-ghar	32.466497	3.690843	1	21.3	7.2	2190	144.288	75.816	22.5	7.69	168.96	377.219	340.8	0.166	0.057	0	168.96
31	F31	Sidi abbaz N° 02 Krich	32.472532	3.693155	1	19.5	7.5	2330	160.32	87.48	200	7.69	152.6	368.712	306.8	0	0	0	152.6
32	F32	Beni -isguen n'tissa	32.48444444	3.69055555	1	27.8	7	2240	131.462	64.43	180	8.33	278.16	304.89	448.3	0	0	0	278.16
33	F33	Sidi abbaz ville	32.462423	3.66698	1	19.2	7.2	2080	160.32	60.264	186.36	10	158.6	375.801	452.2	0.02	0	0	158.6
34	F34	El jamiaa	32.44694444	3.68222222	1	30.1	7	2280	80.16	86.508	180	9.166	244	383.892	415.5	0.009	0	0	244
35	F35	Bounoura 02 (briche)	32.48388888	3.70583333	1	23.6	7.5	2260	152.306	66.096	150	9.23	173.24	401.339	450	0.059	0	0	173.24
36	F36	Bounoura 03 Tinaam	32.47416667	3.70916666	1	22.3	7.5	2310	149.097	61.236	172.22	8.46	170.8	392.819	490	0.093	0	0	170.8
37	F37	boukaoui	32.464103	3.682354	1	14.5	7	2080	142.684	69.98	220	6.92	185.44	300.6415	496.3	0.086	0	0	185.44
38	F38	Bellevidère	32.46333333	3.70777777	1	14.5	7.2	2140	184.368	43.74	230	6.92	178.12	277.951	683.9	0.188	0	0	178.12
39	F39	El jamiaa	32.38666667	3.77805555	1	30.1	7	2280	80.16	86.508	180	9.166	244	383.892	415.5	0.009	0	0	244
40	F40	Tafila	32.453638	3.68853	1	21.3	7.2	2080	160.32	71.928	183.33	8.46	178.12	375.8018	385.4	0.173	0.07	0	178.12
41	F41	Zone de science 02	32.400181	3.74577	1	14.5	6.7	175.9	136.278	43.75	177.77	7.69	122	317.658	453.4	0.106	0	0	122
42	F42	Sidi abbaz N° 03 Amloun	32.491643	3.692804	1	20.1	7.5	2510	200.4	34.02	235	7.69	219.6	354.53	467.3	0	0	0.063	219.6
43	F43	Comp.sportif noumrat	32.397911	3.766876	1	16.3	7.5	1810	245.289	14.58	195.45	12	244	340.348	540	0.188	0	0	244
44	F44	Z.activite NAFTAL	32.42444444	3.72583333	1	31.3	7.2	2870	149.097	69.984	180	8.3	207.4	496.342	342.6	0.009	0	0	207.4
45	F45	Ammi hamou (atteuf)	32.473826	3.742088	1	23	7.5	2490	160.32	70.956	200	8.46	185.44	465.1433	320	0.056	0	0	185.44
46	F46	Atteuf Aouloua	32.44305556	3.74027777	1	15.2	7.2	2360	171.542	86.508	235	7.69	156.16	445.299	477.4	0.035	0	0	156.16
47	F47	El atteuf (12/17)	32.4768	3.738912	1	23.5	7.5	2630	165.129	64.152	210	8.46	187.88	441.093	320	0.062	0	0.008	187.88
48	F48	Smaoui 100 logement	32.47166667	3.72	1	23	7.5	2250	150.7	69.012	155.55	8.46	187.88	398.49	423	0.047	0	0	187.88
49	F49	Hayoukhira el atteuf	32.47194444	3.75277777	1	22.3	7.2	2550	153.907	72.9	172.22	8.46	195.2	398.415	376.9	0	0	0	195.2
50	F50	Hamrait el atteuf	32.491499	3.750894	1	23.1	7.5	1642	150.7	82.62	54.44	14.5	265.96	255.26	403	0.0146	0	0	265.96
51	F51	Ville des sciences	32.407989	3.742219	1	14.6	7.5	1613	168.336	58.32	111.53	13.63	256.2	198.536	537.6	0.05	0.008	0	256.2
52	F52	Zizratou	32.46691	3.732675	1	23.4	7.5	2450	152.301	91.368	205	7.69	190.32	561.575	395	0.07	0	0	190.32
53	F53	taouillou	32.48148	3.668963	1	19.3	7.7	1794	134.669	59.292	150	7.27	161.04	273.697	362.7	0.02	0	0.204	161.04
54	F54	(Parc) ADE N 1	2.446277	3.69998	1	21	7.2	2060	149.098	62.2	190.9	9.09	170.8	341.767	660.7	0.02	0	0	170.8
55	F55	Bouhraoua N° 2 (fili)	32.516028	3.671529	1	23	7.2	2120	141.08	70.956	168.18	7.69	148.84	377.219	604.1	0.001	0	0.132	148.84
56	F56	salouha	32.500275	3.642736	1	25.9	7.2	2260	174.74	75.816	231.25	7.5	192.76	385.72	665.1	0.166	0.005	0	192.76
57	F57	baba saad	32.497967	3.680433	1	33.4	7.2	2780	144.29	74.38	195.45	8.1	170.8	414.09	628.6	0.136	0	0	170.8

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'hydraulique et de génie civil



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الري والهندسة المدنية

إذن بطباعة مذكرة ماستر

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة لمحتوى المذكرة المنجزة من طرف الطالب (ة): بن سديرة عبد القادر تخصص ري

حضري

نمنح نحن الأساتذة:

الاسم واللقب	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الصفة	الامضاء
عبد الكبير ابراهيم	أستاذ محاضر ب جامعة غرداية	مصحح 1	
عمير رقية	أستاذ مساعد ب جامعة غرداية	مصحح 2	
بن بيتور سلمى	أستاذ محاضر ب جامعة غرداية	مؤطر	

الإن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة الماستر تحت عنوان:

Variation spatiotemporelle et statistique de la qualité des eaux souterraines de la ville de Ghardaïa.

امضاء رئيس القسم

رئيس قسم الري
و الهندسة المدنية

ANNEXE

Résumé

Cette étude porte sur l'analyse physico-chimique et statistique des eaux souterraines d'une nappe fermée, basée sur des données recueillies sur 57 puits artésiens entre 2021 et 2025. L'objectif principal est d'évaluer la qualité de l'eau, d'identifier les variations spatiales et temporelles, et de proposer des recommandations pour une gestion durable. Les résultats montrent une qualité d'eau globalement bonne à acceptable, avec des fluctuations marquées dans certains paramètres, notamment le potassium et le magnésium, qui dépassent parfois les normes recommandées. L'analyse statistique (ANOVA) révèle des différences significatives entre les années, attribuées à des processus naturels tels que les variations climatiques et la recharge de la nappe, sans impact anthropique direct. Les analyses hydro chimiques indiquent un faciès calcique-magnésien et chloruré-sulfaté stable, caractéristique d'une influence géologique locale, notamment par la dissolution de roches évaporitiques. La distribution spatiale des ions majeurs met en lumière des zones à surveiller en raison de concentrations élevées. L'indice IQES classe la qualité de l'eau entre « mauvaise » et « très mauvaise » selon les années, sans atteindre des seuils critiques, suggérant que la ressource reste exploitable avec une gestion appropriée. Cette étude constitue une base essentielle pour la surveillance continue et la gestion durable des eaux souterraines dans la région, tout en soulignant la nécessité de recherches futures pour mieux comprendre les impacts climatiques et géologiques sur cette ressource.

Mots-clés : Eaux souterraines, qualité de l'eau, analyse chimique, distribution spatiale, gestion durable.

الملخص

تركزت هذه الدراسة على التحليل الفيزيائي والكيميائي والإحصائي لمياه المياه الجوفية في طبقة مائية مغلقة، بناءً على بيانات جمعت من 57 بئرًا ارتوازيًا خلال الفترة من 2021 إلى 2025. الهدف الرئيسي هو تقييم جودة المياه، تحديد التغيرات المكانية والزمنية، واقتراح توصيات لإدارة مستدامة. تُظهر النتائج جودة مياه جيدة إلى مقبولة بشكل عام، مع تذبذبات ملحوظة في بعض المعايير، خاصة البوتاسيوم والمغنيسيوم، التي تتجاوز أحيانًا الحدود الموصى بها. تكشف التحليلات الإحصائية (ANOVA) عن اختلافات ذات دلالة إحصائية بين السنوات، تُعزى إلى عمليات طبيعية مثل التغيرات المناخية وتجدد الطبقة المائية، دون تأثير بشري مباشر. تشير التحليلات الهيدروكيميائية إلى وجود نوعية مائية مستقرة ذات طابع كلسي-مغنيزي وكلوري-كبريتي، تعكس تأثيرًا جيولوجيًا محليًا، خاصة من إذابة الصخور المتبخرة. يبرز التوزيع المكاني للأيونات الرئيسية مناطق تستوجب المراقبة بسبب ارتفاع التركيزات. يصنف مؤشر جودة المياه (IQES) جودة المياه بين «ضعيفة جدًا» و«ضعيفة» حسب السنوات، دون الوصول إلى مستويات حرجية، مما يشير إلى أن المورد لا يزال قابلاً للاستخدام مع إدارة مناسبة. تشكل هذه الدراسة أساسًا هامًا للمراقبة المستمرة والإدارة المستدامة للمياه الجوفية في المنطقة، مع التأكيد على الحاجة إلى أبحاث مستقبلية لفهم أفضل لتأثيرات المناخ والجيولوجيا على هذه الموارد.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، جودة المياه، التحليل الكيميائي، التوزيع المكاني، الإدارة المستدامة.

Abstract

This study focuses on the physico-chemical and statistical analysis of groundwater from a closed aquifer based on data collected from 57 artesian wells between 2021 and 2025. The primary objective is to evaluate water quality, identify spatial and temporal variations, and provide recommendations for sustainable management. The results indicate overall good to acceptable water quality, with notable fluctuations in specific parameters, particularly potassium, and magnesium, which occasionally exceed recommended limits. Statistical analysis (ANOVA) reveals significant differences between years attributed to natural processes such as climatic variations and aquifer recharge, with no direct anthropogenic impact. Hydro-chemical analyses indicate stable calcium-magnesium and chloride-sulfate facies, characteristic of local geological influence, especially from the dissolution of evaporite rocks. The spatial distribution of major ions highlights areas requiring monitoring due to high concentrations. The IQES index rates water quality as "poor" or "very poor" across the years without reaching critical thresholds, suggesting that the resource remains exploitable with appropriate management. This study provides a solid foundation for ongoing monitoring and sustainable groundwater management in the region, highlighting the need for future research better to understand the climatic and geological impacts on this resource.

Keywords: Groundwater, water quality, chemical analysis, spatial distribution, sustainable management.