

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



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

Mémoire de Master

Domaine: Sciences et de la Technologie

Filière: Hydraulique

Spécialité: Hydraulique

Thème

**Hydrochimie et origine de minéralisation des eaux
souterraines de l'aquifère de la région de Zelfana**

Réalisé par : BEN SAHA Mahfoud

Nom et prénom	grade	état
Tahar SELMANE	MAB	Encadreur
Senna LECHEHEB	MAB	Co-Encadreur
		Président
		jury
		jury

Année universitaire 2024/2025



CamScanner

Remerciements

À un moment où la fatigue se mêle à la joie, et où s'achève une étape marquée par un labeur constant et un engagement soutenu, je ressens le besoin sincère d'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à mon parcours scientifique.

*Ma plus profonde gratitude va à mon directeur de mémoire, **Dr. Salmane Tahar**, qui fut bien plus qu'un encadrant académique. Par son intégrité, son savoir et son accompagnement bienveillant, il a été une source d'inspiration constante. Ses remarques n'étaient pas de simples observations scientifiques, mais de véritables leçons de rigueur, de patience et de probité intellectuelle.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à l'ensemble de mes enseignants du **département d'Hydraulique urbaine**, à la **Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Ghardaïa**, qui ont tous marqué ma formation et enrichi ma réflexion. À chacun d'eux, je dois une part de ce chemin accompli.*

*Je tiens à rendre un hommage tout particulier à **ma famille**, qui a cru en moi dès le début, soutenu mes ambitions, accepté mes absences, et m'a offert un refuge stable et chaleureux à chaque étape difficile.*

*Je n'oublie pas non plus **mes camarades et amis**, compagnons de route et de rêves, avec qui j'ai partagé les doutes et les efforts. Vous avez été le souffle qui a allégé le poids du chemin.*

*Je tiens également à remercier chaleureusement **Lacheheb Sena**, dont le soutien et les encouragements ont laissé une empreinte précieuse dans cette aventure académique.*

À tous ceux qui ont cru en moi, m'ont soutenu, et ont laissé une trace, même infime, dans cette aventure...

Je vous adresse toute ma reconnaissance, toute ma gratitude, et tout mon respect.

Dédicace

Je dédie ce travail avec tout mon respect et ma profonde gratitude à mes professeurs éminents, Monsieur Selmane Tahar, Monsieur Lacheheb Sena, le chef de département Monsieur Tayeb Boualmaiz, ainsi qu'à tous les professeurs du département d'hydraulique et génie civil à l'Université de Ghardaïa, qui ont joué un rôle essentiel dans mon orientation et mon soutien scientifique et moral tout au long de mes études.

J'exprime également ma sincère reconnaissance à ma famille chère, qui a été mon soutien constant durant ce parcours.

Je rends une chaleureuse salutation de cœur à cœur à mes frères bien-aimés, Abdeljalil Ouled Brahim et ElFatmi Moussa, compagnons de route dont l'appui a été précieux.

Je souhaite à tous un succès continu dans leurs parcours académiques et professionnels.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la hydrochimie et de l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère de la région de Zelfana (sud-est algérien). Dans un contexte saharien marqué par une disponibilité limitée de l'eau, l'analyse de la qualité physico-chimique des eaux est cruciale. L'étude repose sur des campagnes d'échantillonnage de cinq forages et l'analyse de 15 paramètres. Des outils statistiques multivariés (CAH et ACP) ont été utilisés pour identifier les similarités entre forages et les facteurs de variabilité. Les résultats montrent une minéralisation marquée, dominée par des faciès chlorurés et sulfatés, avec des contributions majeures de formations évaporitiques. Les diagrammes géochimiques (Piper, Chadha, Gibbs) ont permis d'identifier les processus de dissolution, d'échange ionique et d'évaporation. L'origine de la minéralisation est principalement naturelle, bien que des influences anthropiques locales aient été détectées. Ces résultats soulignent la nécessité d'une gestion durable des ressources en eau dans la région.

Mots-clés : Hydrochimie, Minéralisation, Eaux souterraines, Diagrammes géochimiques, CAH, ACP, Dissolution, Évaporation, Échange ionique, Ressources en eau

ملخص

يتناول هذا البحث دراسة الجيوكيمياء وأصل تمعدن المياه الجوفية في حوض المياه بمنطقة زلفانة (جنوب شرق الجزائر). في ظل الظروف الصحراوية التي تتسم بندرة الموارد المائية، تُعد دراسة جودة المياه الجوفية أمراً بالغ الأهمية. اعتمدت الدراسة على تحليل عينات مأخوذة من خمسة آبار، تم فيها قياس 15 متغيراً فيزيائياً وكيميائياً. استُخدمت أدوات التحليل الإحصائي المتعدد (مثل التحليل العنقودي وتحليل المركبات الأساسية) لتحديد أوجه التشابه والعوامل المؤثرة. أظهرت النتائج وجود تمعدن عالٍ، تهيمن عليه الأنماط الكلوريدية والكبريتاتية، الناتجة أساساً عن انحلال الصخور التبخيرية. كشفت المخططات الجيوكيميائية (بايبر، تشادا، جيبس) عن عمليات رئيسية مثل الانحلال والتبادل الأيوني والتبخير. ويُعزى أصل هذا التمدن أساساً إلى عوامل طبيعية، مع وجود تأثيرات بشرية محلية في بعض المواقع. تؤكد هذه النتائج على ضرورة تبني إدارة مستدامة للمياه الجوفية في المنطقة.

الكلمات المفتاحية : الجيوكيمياء، تمعدن المياه، المياه الجوفية، المخططات الجيوكيميائية، التحليل العنقودي، تحليل المركبات الأساسية، انحلال الصخور، التبخير، التبادل الأيوني، إدارة الموارد المائية

Abstract

This thesis focuses on the hydrochemistry and origin of groundwater mineralization in the aquifer of the Zelfana region (southeastern Algeria). In a Saharan context where water availability is limited, the analysis of groundwater quality is essential. The study is based on sampling from five boreholes and analysis of 15 physicochemical parameters. Multivariate statistical tools (Hierarchical Clustering and Principal Component Analysis) were applied to identify similarities between boreholes and the main variability factors. Results indicate significant mineralization dominated by chloride and sulfate facies, largely influenced by evaporite formations. Geochemical diagrams (Piper, Chadha, Gibbs) revealed key processes such as dissolution, ion exchange, and evaporation. The mineralization is primarily of natural origin, although some local anthropogenic influences were identified. These findings highlight the need for sustainable groundwater management in the region.

Keywords: Hydrochemistry, Mineralization, Groundwater, Geochemical diagrams, Hierarchical Clustering (HCA), Principal Component Analysis (PCA), Dissolution, Evaporation, Ion exchange, Water resources management

Table des matières

<i>Remerciements</i>	II
<i>Dédicace</i>	II
Résumé	III
ملخص	III
Abstract	III
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	Error! Bookmark not defined.
Liste des Abréviations	IX
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur la qualité des eaux souterraines	2
I.1. Introduction	2
I.2. Le cycle hydrologique	2
I.3. Types de Ressources en Eau	3
I.3.1. Ressources en eau de surface	3
I.3.2. Ressources en eau souterraine	4
I.4. Facteurs influençant la qualité des eaux souterraines	5
I.4.1. Facteurs naturels	5
I.4.2. Facteurs anthropiques	6
I.5. Paramètres de la qualité des eaux souterraines	6
I.5.1. Paramètres organoleptiques	6
I.5.1.1. Couleur	6
I.5.1.2. Odeur	7
I.5.1.3. Goût	7
I.5.2. Paramètres bactériologiques	7
I.5.2.1. Coliformes fécaux	7
I.5.2.2. Coliformes totaux	8
I.5.2.3. Escherichia coli	8
I.5.2.4. Les streptocoques fécaux	8
I.5.3. Paramètres physique et chimiques	8
I.5.3.1. Température (T°)	8
I.5.3.2. La conductivité électrique	9

I.5.3.3. Le potentiel hydrogène (pH).....	9
I.5.3.4. La turbidité.....	10
I.5.3.5. La salinité (SAL):	10
I.5.3.6. Résidus et Total des Solides Dissous (TDS)	10
I.5.3.7. Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) :	10
I.5.3.8. Les ions majeurs	11
I.5.3.9. Nutriments	12
I.5.3.10. Métaux lourds	13
I.6. Normes de qualité des eaux souterraines.....	14
I.6.1. Normes Physiques.....	14
I.6.2. Normes Chimiques (selon l'OMS).....	14
I.6.3. Normes Biologiques (OMS)	15
I.7. Conclusion	15
Chapitre II : Présentation des caractéristiques naturelle de la région de Zelfana .	16
II.1. Introduction	16
II.2. Cadre Géographique.....	16
II.3. Cadre Géomorphologique	17
II.3.1. Relief	17
II.3.2. Sol.....	18
II.3.3. Couvert végétal.....	18
II.4. Contexte socio-économique de la région	19
II.4.1. Démographie et répartition.....	19
II.4.2. Économie locale	19
II.4.3. Infrastructures	20
II.4.4. Enjeux	21
II.5. Réseau hydrographique	21
II.6. Paramètres climatiques de la région.....	22
II.6.1. Température.....	22
II.6.2. Précipitations	23
II.6.3. Vent	24

II.6.4. Humidité	25
II.7. Cadre géologique de la région.....	26
II.7.1. Contexte structural.....	27
II.7.2. Lithologie dominante.....	27
II.8. Cadre Hydrogéologique	28
II.8.1. Potentiel aquifère	29
II.8.2. Influence géologique sur la qualité de l'eau	30
II.8.3. Vulnérabilité de l'Aquifère.....	30
II.9. Conclusion.....	30
Chapitre III : Analyse statistique multivariée des eaux souterraines	32
III.1. Introduction.....	32
III.2. Balance ionique des échantillons	32
III.3. La qualité organoleptique des eaux.....	33
III.4. Analyses statistiques des données de qualité	34
III.5. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques	37
III.6. Analyse multivariée des paramètres physico-chimique.....	38
III.6.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	39
III.6.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)	40
III.6.3. Relation entre CAH et ACP	42
III.7. Impact de la surexploitation de l'aquifère sur la qualité de l'eau	43
III.8. Conclusions.....	45
Chapitre IV : hydrochimie et origine de minéralisation des eaux souterraines	48
IV.1. Introduction.....	48
IV.2. Les faciès hydrochimiques des eaux souterraines	48
IV.2.1. Diagramme de Piper	48
IV.2.2. Diagramme de Chadha	49
IV.3. Processus hydrochimiques et origine de la minéralisation	51
IV.4. Identification de l'interaction eau-roche	56
IV.5. Niveaux de saturation minérale	59
IV.6. Conclusion	62
Conclusion général.....	49
Conclusion général.....	64
Références bibliographiques	65
Références bibliographiques	65

Liste des figures

Figure I.1. Cycle de l'eau dans la nature.....	3
Figure II.1. Localisation de la région de Zelfana.....	17
Figure.II.2. Températures Mensuelles À Zelfana – 2024.....	23
Figure.II.3. précipitations mensuelles à Zelfana en 2020-2024.....	24
Figure.II.4. Évolution de la vitesse du vent à Zelfana du 2024 (en m/s).....	25
Figure.II.5. Variation de l'humidité relative (%) à Zelfana 2024.....	26
Figure.II.6. Carte géologique de la région de Ghardaïa montrant la zone d'étude (ANRH, 2010).....	28
Figure.II.7. Carte géologique et hydrogéologique de la région de Ghardaïa montrant la zone d'étude...	29
Figure III.1. Répartition des concentrations moyennes des paramètres dans les forages de la région de Zelfana.....	37
Figure III.2. Dendrogrammes de CAH avec Q-mode et R-mode pour les paramètres et les forages.....	41
Figure III.3. Corrélation entre les paramètres et les composantes principales d'ACP.....	43
Figure IV.1. Diagramme de Piper illustre la classification des eaux souterraines.....	49
Figure IV.2. Diagramme de Chadha des échantillons de la région de Zelfana.....	51
Figure IV.3. Relation entre $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ et $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (meq/L),.....	52
Figure IV.4. Corrélation entre Cl^- et $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (meq/L).....	53
Figure IV.5 Rapport molaire $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ en fonction de Cl^- (meq/L).....	54
Figure IV.6. Distribution du rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ par les forages.....	55
Figure IV.7. Diagrammes d'interprétation des rapports ioniques en fonction de la conductivité électrique (CE).....	56
Figure IV.8. Diagrammes de Gibbs des échantillons de la région de zelfana.....	57
Figure IV.9. Graphes bivariés de a) SO_4^{2-} en fonction de Cl^- b) $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ en fonction de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ c) Na^+ en fonction de Cl^- d) Na^+ en fonction de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	59
Figure IV.10. Indice de saturation des minéraux des forages de Zelfana.....	61
Figure IV.11. Graphes bivariés de a) Ca^{2+} en fonction d'IS des minéraux carbonatés b) Mg^{2+} en fonction d'IS de l'aragonite, calcite et dolomite.....	62
Figure IV.12. Graphes bivariés de a) SO_4^{2-} par rapport aux IS de gypse et l'anhydrite b) Cl^- par rapport aux IS d'Halite et Sylvit.....	62

Liste des tableaux

Tableau I.1. Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (Touhari, 2015 ; Seddi, 2024).....	9
Tableau I.2. Typologie des eaux selon leur valeur de pH (Hassani et Noui, 2022).....	9
Tableau I.3. Catégories courantes de turbidité (NTU : unité néphélométrique de turbidité (Hassani et Noui, 2022).....	10
Tableau I.4. Classification des eaux selon leur dureté (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).....	11
Tableau I.5. Paramètres physico-chimiques de l'eau et leurs normes recommandées.....	14
Tableau I.6. Limites recommandées des principaux paramètres chimiques de l'eau potable (en mg/L).....	14
Tableau I.7. Normes microbiologiques de potabilité de l'eau.....	15
Tableau II.1. Températures Mensuelles À Zelfana – 2024.....	22
Tableau II.2. Précipitations mensuelles à Zelfana en 2020-2024.....	24
Tableau III.1 : Valeurs de la balance ionique des échantillons analysés.....	33
Tableau III.2 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Zelfana.....	35
Tableau III.3. Matrice de corrélation de principaux paramètres physico-chimiques.....	38
Tableau III.5. Composantes principales, valeurs propres et variance totale des paramètres de qualité des eaux souterraines.....	42
Tableau IV1. Description statistique des indices de saturation des minéraux.....	60

Liste des Abréviations

ACP	Analyse en Composantes Principales
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CE	Conductivité Électrique
TDS	Total Dissolved Solids (Résidu sec)
TAC	Titre Alcalimétrique Complet (équivalent à HCO_3^-)
TH	Dureté Totale
pH	Potentiel Hydrogène (acidité/basicité de l'eau)
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Unité de turbidité)
WHO, OMS	World Health Organization (Organisation Mondiale de la Santé)
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
XLSTAT	Logiciel d'analyse statistique pour Excel
USGS	United States Geological Survey
BI	Balance ionique
CV	coefficients de variation
IS	Indice de saturation
CP	composantes principales

Introduction générale



Dans les régions arides et semi-arides telles que le sud-est algérien, l'eau souterraine constitue la principale — et souvent l'unique — ressource mobilisable pour les usages domestiques, agricoles et industriels. Face à une demande croissante en eau et à une pluviométrie très faible, les nappes phréatiques subissent une pression accrue tant sur le plan quantitatif que qualitatif. La compréhension des mécanismes de minéralisation des eaux souterraines devient dès lors indispensable pour assurer une gestion durable de cette ressource vitale (Foster et al., 2000 ; WHO, 2017).

La région de Zelfana, située dans la wilaya de Ghardaïa, repose sur le système du Continental Intercalaire, l'un des plus vastes aquifères du Sahara septentrional. Les eaux issues de cet aquifère profond présentent une forte minéralisation, résultant de processus géochimiques tels que la dissolution des roches évaporitiques, les échanges ioniques et l'évaporation intense (OSS, 2003 ; Edmunds & Gaye, 1994). Une étude approfondie de leur qualité physico-chimique permet ainsi de mieux appréhender leur origine, leur évolution et leur potentiel d'utilisation.

Ce mémoire s'articule autour de plusieurs chapitres complémentaires qui permettent d'aborder ces problématiques sous différents angles :

- Le premier chapitre présente les notions générales relatives à la qualité des eaux souterraines, en détaillant les types de ressources, les paramètres physico-chimiques, les normes de qualité, ainsi que les facteurs naturels et anthropiques influençant leur composition.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques naturelles de la région de Zelfana, incluant son cadre géographique, géomorphologique, climatique, géologique, hydrogéologique et socio-économique.
- Le troisième chapitre porte sur l'analyse statistique multivariée des données de qualité des eaux. Il comprend l'analyse de la balance ionique, les corrélations entre paramètres, ainsi que l'application de méthodes statistiques telles que la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Güler et al., 2002 ; Rahbar et al., 2020).
- Le quatrième chapitre est dédié à l'interprétation hydrochimique et à l'identification de l'origine de la minéralisation à travers les faciès chimiques et les diagrammes géochimiques (Piper, Chadha, Gibbs), tout en explorant les processus de dissolution, d'échange ionique et d'interactions eau-roche.
- Enfin, la conclusion générale résume les résultats obtenus et propose des recommandations pour une meilleure gestion et protection des ressources en eaux souterraines dans les zones arides.

Ce travail vise ainsi à mieux comprendre l'origine et les mécanismes de minéralisation des eaux souterraines dans la région de Zelfana, tout en apportant des éléments utiles pour une gestion durable de cette ressource précieuse.

Chapitre I : Généralité sur la qualité des eaux souterraines



I.1. Introduction

L'eau est une ressource naturelle essentielle à la vie et au développement socio-économique. Parmi les différentes formes sous lesquelles elle se présente sur Terre, les eaux souterraines. Elle Constitué par l'infiltration des eaux de pluie, des rivières ou des lacs à travers les sols perméables, elles représentent la plus grande réserve d'eau douce disponible pour l'humanité après les glaciers.

Les eaux souterraines sont stockées dans des formations géologiques appelées aquifères. Cependant, la surexploitation, la pollution et les changements climatiques affectent la quantité et la qualité des eaux souterraines. Dans ce contexte, comprendre la dynamique, les caractéristiques et les enjeux de gestion des eaux souterraines devient primordial.

I.2. Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique, aussi appelé cycle de l'eau, est le processus naturel par lequel l'eau circule continuellement entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol. Il comprend plusieurs étapes principales :

- **Évaporation** : Sous l'effet de la température solaire, l'eau des océans, des rivières, des lacs et des sols se transforme en vapeur d'eau et monte dans l'atmosphère.
- **Transpiration** : Les plantes libèrent de la vapeur d'eau par leurs feuilles, un phénomène appelé évapotranspiration lorsqu'on le combine à l'évaporation.
- **Condensation** : Dans l'atmosphère, la vapeur d'eau se refroidit et se transforme en gouttelettes, formant les nuages.
- **Précipitations** : Lorsque les gouttelettes s'agglomèrent et deviennent trop lourdes, elles retombent sur Terre sous forme de pluie, neige, grêle ou bruine.
- **Infiltration** : Une partie de l'eau qui atteint le sol pénètre dans les couches souterraines pour recharger les nappes phréatiques et aquifères.
- **Ruissellement** : L'eau qui ne s'infiltré pas s'écoule à la surface du sol, rejoignant les rivières, les lacs et les océans.
- **Stockage** : L'eau est stockée temporairement dans les océans, glaciers, nappes souterraines, lacs et sols avant de repartir dans le cycle.

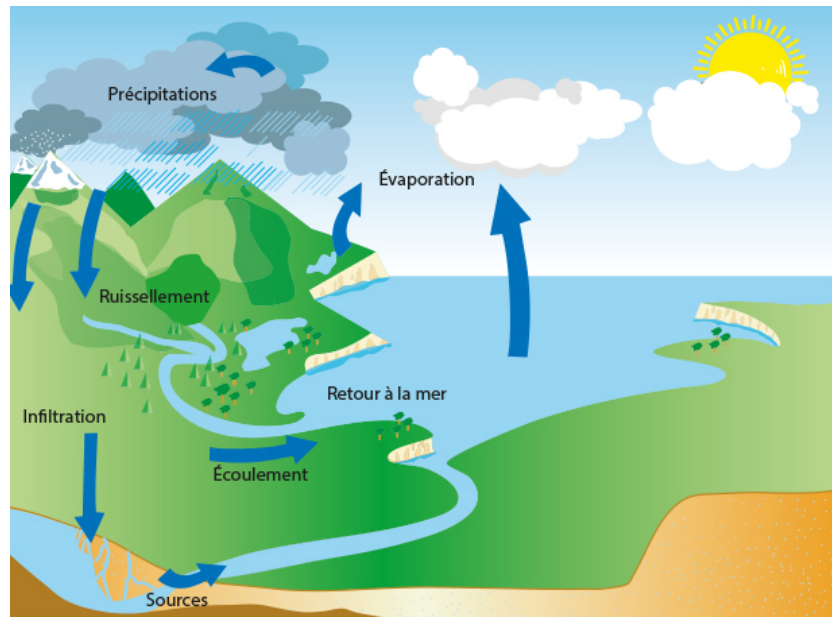


Figure I.I. Cycle de l'eau dans la nature

I.3. Types de Ressources en Eau

Les ressources en eau représentent l'ensemble des réserves hydriques disponibles à l'échelle d'un territoire, qu'elles soient d'origine naturelle (précipitations, lacs, nappes) ou artificielle (barrages, forages, dessalement). Elles se divisent en deux grandes catégories : les ressources en eau de surface et les ressources en eau souterraine (Rodier et al, 2009).

I.3.1. Ressources en eau de surface

- Les ressources en eau de surface regroupent l'ensemble des eaux présentes à la surface du sol, accessibles directement sans forage. Elles sont fortement dépendantes du climat, des précipitations et des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant. Elles sont souvent plus vulnérables aux pollutions et aux variations saisonnières (Hasnia, 2018).

• Les rivières et les fleuves

Les rivières et fleuves sont des cours d'eau naturels qui collectent et transportent les eaux de ruissellement des bassins versants vers les mers, les océans ou les lacs. Ils jouent un rôle central dans la régulation hydrologique et l'approvisionnement en eau pour l'agriculture, la consommation humaine, et l'industrie.

Exemple : Le fleuve Nil, principal fleuve d'Afrique, est une ressource vitale pour l'Égypte et le Soudan, alimentant l'agriculture irriguée sur des centaines de kilomètres (Touhari, 2015).

- **Les lacs**

Les lacs sont des étendues d'eau naturelles ou artificielles pouvant contenir de grandes quantités d'eau douce (ou parfois salée). Ils se forment par accumulation d'eau de pluie, de ruissellement ou par alimentation souterraine.

Exemple : Le lac Tchad, bien qu'en régression, constitue encore une source majeure d'eau pour plusieurs pays sahéliens (Niger, Tchad, Cameroun) (Seddi, 2024).

- **Les réservoirs et barrages**

Les réservoirs sont des plans d'eau artificiels créés par la construction de barrages. Ils permettent de stocker l'eau pour l'irrigation, la consommation domestique, la régulation des crues et la production hydroélectrique.

Exemple : Le barrage de Beni Haroun en Algérie est l'un des plus grands du pays, assurant l'approvisionnement en eau de plusieurs wilayas du nord-est (Kadri et Mesroua, 2020).

- **L'eau de mer (dessalement)**

Dans les zones arides ou littorales, l'eau de mer peut être rendue potable grâce au dessalement. Bien que coûteuse, cette méthode représente une alternative stratégique dans les régions souffrant de stress hydrique.

Exemple : L'usine de dessalement de Fouka (Tipaza, Algérie) produit plus de 120 000 m³ d'eau douce par jour pour les besoins de la population locale (Zereg, 2019).

- **Les eaux glacées (glaciers et neiges)**

Les glaciers et neiges constituent des réservoirs naturels d'eau douce solide, principalement présents dans les zones montagneuses. Leur fonte alimente les rivières et les nappes, particulièrement en été.

Exemple : Les glaciers de l'Atlas marocain participent au soutien des écoulements du fleuve Oum Errabia, notamment pendant la saison sèche (Ouzal, 2005).

I.3.2. Ressources en eau souterraine

Les eaux souterraines désignent l'ensemble des eaux stockées sous la surface terrestre, au sein de formations géologiques plus ou moins perméables. Elles représentent environ 30 % des réserves mondiales en eau douce accessibles à l'usage humain (Rodier et al, 2009). Cette ressource est d'une importance stratégique, notamment dans les régions arides et semi-arides comme le Sahara, car elle est plus stable, moins sujette aux variations climatiques et souvent protégée des pollutions de surface (Hasnia, 2018).

• Les aquifères

Un aquifère est une formation géologique capable de contenir et transmettre l'eau de manière significative. Il est généralement composé de roches poreuses (sable, grès, calcaire) ou de sédiments meubles (graviers, alluvions). On distingue principalement deux types d'aquifères:

- **Aquifère libre ou nappe phréatique** : la plus superficielle, directement alimentée par les précipitations. Elle est vulnérable à la pollution et aux variations saisonnières.

Exemple : La nappe phréatique du Bas-Sahara est exploitée pour l'irrigation dans les palmeraies, mais présente une forte variabilité de qualité (Touhari, 2015).

- **Aquifère captif ou artésien** : situé sous une couche imperméable, il est soumis à une pression. Sa recharge est lente, et son exploitation excessive peut provoquer un épuisement irréversible.

Exemple : La nappe de l'Albien (Continental Intercalaire) s'étend sur une grande partie du Sahara algérien et est l'une des plus vastes réserves d'eau fossile du monde (Seddi, 2024).

• Les sources

Les sources sont des points d'émergence naturelle de l'eau souterraine à la surface du sol. Elles apparaissent là où la nappe affleure ou en présence d'une faille géologique.

Exemple : La source de Tamanrasset, issue d'un aquifère fissuré granitique, constitue une ressource rare mais vitale pour les populations locales (Kadri et Mesroua, 2020).

I.4. Facteurs influençant la qualité des eaux souterraines

La qualité des eaux souterraines dépend d'une multitude de facteurs qui peuvent être classés en deux grandes catégories : les facteurs naturels et les facteurs anthropiques. Comprendre ces influences est crucial pour évaluer la vulnérabilité des aquifères et concevoir des stratégies de protection.

I.4.1. Facteurs naturels

Les facteurs naturels sont liés aux caractéristiques environnementales et géologiques de la région :

- **Composition géologique des aquifères** : La nature des roches et des sols détermine les éléments chimiques dissous dans l'eau. Par exemple, des aquifères traversant des roches calcaires auront une teneur élevée en calcium et bicarbonates.
- **Durée du transit de l'eau** : Plus l'eau reste longtemps dans le sol, plus elle a le temps de dissoudre les minéraux environnants, influençant ainsi sa minéralisation.

- Conditions climatiques et hydrologiques : La température, la pluviosité, et les régimes d'infiltration affectent la recharge des nappes et la dilution des polluants naturels ou anthropiques.
- Relief : Dans les zones de forte pente, l'infiltration est souvent plus faible, limitant l'alimentation des nappes et modifiant leur chimie.

I.4.2. Facteurs anthropiques

Les activités humaines représentent l'une des principales causes de dégradation de la qualité des eaux souterraines :

- Agriculture intensive : L'utilisation massive d'engrais azotés et de pesticides entraîne l'infiltration de nitrates, phosphates, et de substances chimiques nocives.
- Urbanisation et développement industriel : Les effluents industriels, les eaux usées domestiques, et les déchets solides peuvent infiltrer les sols et contaminer les nappes.
- Exploitation minière : Peut entraîner une acidification locale de l'eau et l'introduction de métaux lourds.
- Surexploitation des ressources : Le pompage excessif peut provoquer une intrusion d'eau salée dans les aquifères côtiers ou modifier les flux naturels, augmentant ainsi les risques de contamination.

La combinaison de ces facteurs rend nécessaire une gestion intégrée et prudente des ressources en eaux souterraines, en tenant compte de la variabilité naturelle et des pressions humaines.

I.5. Paramètres de la qualité des eaux souterraines

I.5.1. Paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques regroupent les caractéristiques de l'eau perceptibles par les sens, notamment la couleur, l'odeur et le goût. Bien qu'ils n'impliquent pas nécessairement un danger sanitaire immédiat, ils influencent fortement la perception de la qualité de l'eau par les usagers. De plus, des anomalies organoleptiques peuvent révéler des pollutions d'origine naturelle ou anthropique (Rodier et al, 2009).

I.5.1.1. Couleur

L'eau souterraine de bonne qualité est limpide et incolore. Toutefois, des teintes jaunâtres, rougeâtres ou brunâtres peuvent apparaître en raison de la présence de fer, de manganèse, ou encore de matières

organiques dissoutes. Ces éléments proviennent souvent de formations géologiques riches en minéraux ou de la décomposition de matière organique (Hasnia, 2018).

Dans la région de Ghardaïa, plusieurs forages exploitant la nappe de l'Albien ont montré une teinte jaune pâle. Les analyses ont révélé une teneur en fer dissous de 0,45 mg/L, dépassant la limite fixée par l'OMS (0,3 mg/L) (Adda, 2013).

I.5.1.2.Odeur

L'eau potable est censée être inodore. L'apparition d'odeurs est souvent le signe d'une dégradation de la qualité, pouvant résulter de la présence de gaz dissous (comme le H_2S), de déchets organiques, ou encore de polluants chimiques. Une odeur d'œuf pourri est typiquement associée à l'hydrogène sulfuré, qui se forme dans des milieux anaérobies riches en matière organique (Kankou et al, 2004).

Dans certaines localités du sud de Biskra, des habitants ont signalé une forte odeur désagréable lors de la saison chaude. Celle-ci était attribuée à la décomposition de matières organiques dans les puits peu profonds, libérant du H_2S (Seddi, 2024).

I.5.1.3. Goût

Le goût de l'eau est influencé par la nature et la concentration des sels dissous, ainsi que par la présence éventuelle de gaz ou de métaux. Un goût salé indique généralement une concentration élevée en chlorures, alors qu'un goût amer peut résulter de la présence de sulfates. Des goûts métalliques sont souvent associés au fer ou au cuivre (Touhari, 2015).

I.5.2. Paramètres bactériologiques

Les paramètres bactériologiques permettent d'évaluer la présence de micro-organismes dans les eaux souterraines, en particulier ceux liés à la contamination fécale. Leur détection indique une pollution potentiellement dangereuse pour la santé publique, liée à l'infiltration d'eaux usées, de lisiers agricoles ou d'effluents domestiques non traités (Rodier et al, 2009). Les principaux indicateurs utilisés sont les coliformes fécaux, les coliformes totaux, *Escherichia coli* et les streptocoques fécaux.

I.5.2.1 Coliformes fécaux

Les coliformes fécaux constituent un sous-groupe des coliformes totaux. Ils sont représentés principalement par *Escherichia coli*, et leur présence atteste une contamination d'origine fécale récente (Adda, 2013). Ces bactéries proviennent du système digestif des mammifères et ne devraient pas être détectées dans une eau potable.

À Ouargla, une étude a révélé la présence de coliformes fécaux dans 40 % des forages analysés, liée à la proximité des fosses septiques et au manque de protection des puits (Seddi, 2024).

I.5.2.2. Coliformes totaux

Les coliformes totaux regroupent un ensemble de bactéries en forme de bâtonnets, aérobies ou anaérobies facultatifs, présentes dans l'environnement (sols, eaux, végétaux) et dans les intestins des animaux à sang chaud. Leur présence peut indiquer une contamination par ruissellement de surface ou une infiltration lente de polluants (Hasnia, 2018).

Dans les régions agricoles de Zelfana, la détection de coliformes totaux dans plusieurs forages a été associée à l'épandage excessif de fumier non composté, favorisant l'infiltration de bactéries dans la nappe phréatique (Touhari, 2015).

I.5.2.3. Escherichia coli

E. coli est le principal indicateur de contamination fécale fraîche. Il est strictement d'origine intestinale, et sa détection dans l'eau témoigne d'un risque sanitaire élevé, notamment en cas de consommation directe (Rodier et al, 2009).

I.5.2.4. Les streptocoques fécaux

Les streptocoques fécaux (ex. : *Enterococcus faecalis*) sont des indicateurs complémentaires aux coliformes. Leur présence suggère une pollution fécale ancienne ou persistante, car ils peuvent survivre plus longtemps dans le sol et les eaux que *E. coli* (Adda, 2013).

I.5.3. Paramètres physique et chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont essentiels pour évaluer la qualité de l'eau souterraine. Ils permettent d'identifier les caractéristiques naturelles d'une nappe et de détecter d'éventuelles contaminations liées aux activités humaines (Rodier et al, 2009). Ces paramètres incluent la température, le pH, la conductivité électrique, la turbidité, la salinité, les résidus dissous, la dureté, les ions majeurs et les nutriments.

I.5.3.1. Température (T°)

La température influence directement la solubilité des gaz et des sels, la vitesse des réactions chimiques et la croissance biologique. Elle permet aussi de distinguer les eaux superficielles des eaux profondes (Touhari, 2015).

Exemple : Dans la région de Zelfana, les eaux du Continental Intercalaire présentent une température moyenne de 28 à 30 °C, alors que les eaux peu profondes avoisinent 20 °C, ce qui permet de tracer leur origine (Seddi, 2024).

I.5.3.2. La conductivité électrique

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface, séparées de 1 cm. La plupart des substances dissoutes dans l'eau sont présentes sous forme d'ions chargés électriquement. Par conséquent, la mesure de la conductivité permet d'évaluer la concentration des sels dissous dans l'eau. La conductivité dépend également de la température de l'eau et augmente généralement avec la température. De plus, elle constitue un moyen efficace de valider les analyses physico-chimiques de l'eau. La conductivité de l'eau naturelle varie généralement entre 50 et 1500 µS/cm. En termes de qualité de l'eau, le classement suivant est proposé (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).

Tableau I.1. Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique (Touhari, 2015 ; Seddi, 2024).

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

I.5.3.3. Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'eau exprime la concentration en ions hydrogène (H⁺), ce qui permet d'évaluer son acidité ou son alcalinité, ainsi que son pouvoir corrosif ou sa tendance à provoquer des dépôts calcaires. Les eaux issues des aquifères sableux ou granitiques présentent généralement un pH acide, tandis que celles provenant de formations calcaires tendent à être alcalines. L'ajustement du pH peut se faire en éliminant l'excès de CO₂ dissous ou en modifiant la dureté carbonatée. (Seddi, 2024).

Tableau I.2. Typologie des eaux selon leur valeur de pH (Hassani et Noui, 2022).

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

I.5.3.4. La turbidité

La turbidité résulte de la présence de particules en suspension dans l'eau, telles que les matières organiques, les argiles ou encore les micro-organismes. Elle est mesurée à l'aide d'un turbidimètre et exprimée en unités NTU (Néphélométric Turbidité Unit). Ce paramètre revêt une grande importance, car une eau trouble peut indiquer une contamination microbiologique potentielle (Kankou et al., 2004 ; Seddi, 2024).

Tableau I.3. Catégories courantes de turbidité (NTU : unité néphélométrique de turbidité (Hassani et Noui, 2022)).

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

I.5.3.5. La salinité (SAL):

La salinité correspond à la concentration en sels dissous dans une solution, exprimée en grammes par litre. Elle peut provenir de diverses sources telles que la roche mère, les eaux utilisées pour l'irrigation ou encore les apports d'engrais (Ouzal, 2005 ; Seddi, 2024).

I.5.3.6. Résidus et Total des Solides Dissous (TDS)

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

I.5.3.7. Dureté ou titre hydrotimétrique (TH) :

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

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

La dureté se mesure par le titre hydrotimétrique, exprimé en degrés français (°F), où 1 °F équivaut à 10 mg de carbonate de baryum par litre d'eau. Des valeurs faibles (entre 50 et 120 mg/l) caractérisent

les eaux douces, tandis que les eaux dures présentent un titre compris entre 250 et 320 mg/l (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).

Tableau I.4. Classification des eaux selon leur dureté (Hasnia, 2018 ; Seddi, 2024).

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

I.5.3.8. Les ions majeurs

Les ions majeurs sont les constituants dominants des eaux naturelles. Ils proviennent principalement de l'interaction entre l'eau et les roches traversées (dissolution, altération, échange ionique). Leur concentration et leur nature permettent de déterminer le type hydrochimique d'une nappe et de mieux comprendre les processus géochimiques en jeu (Rodier et al., 2009).

I.5.3.8.1. Cations

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

Ces deux éléments proviennent de la dissolution des carbonates (calcite, dolomite) et parfois des silicates. Ils sont responsables de la dureté de l'eau.

b) Sodium (Na^+) et Potassium (K^+)

Le sodium est un ion très mobile, souvent associé à une origine évaporitique (halite, argiles sodiques). Le potassium, quant à lui, est moins présent dans les eaux car il est adsorbé par les argiles.

I.5.3.8.2. Anions

a) Chlorures (Cl^-)

Les chlorures sont très solubles, non réactifs et non adsorbables, ce qui en fait d'excellents traceurs de pollution saline. Ils peuvent provenir de la dissolution d'halite (NaCl), de l'intrusion marine fossile ou d'activités humaines (irrigation, engrais).

b) Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates proviennent de la dissolution du gypse (CaSO_4), de l'oxydation de pyrite (FeS_2) ou encore d'apports anthropiques (engrais, industries). À fortes doses, ils confèrent un goût amer à l'eau.

c) Fer ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)

Le fer est souvent présent dans les eaux souterraines sous forme ferreuse (Fe^{2+}), surtout en milieu réducteur. Sa précipitation sous forme ferrique (Fe^{3+}) est favorisée par un pH élevé et une bonne oxygénation. À haute concentration, il peut provoquer des dépôts, colorer l'eau, et nuire au goût.

I.5.3.9. Nutriment

Les nutriments regroupent principalement les composés azotés (nitrates, nitrites, ammonium) et les phosphates. Bien qu'essentiels à la vie végétale, leur présence excessive dans les eaux souterraines est souvent synonyme de pollution d'origine agricole ou domestique. Ils peuvent provoquer des déséquilibres écologiques (eutrophisation) et représenter un danger pour la santé humaine, notamment pour les nourrissons (Rodier et al., 2009).

I.5.3.9.1. Phosphate (PO_4^{3-})

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

Eaux usées domestiques et fosses septiques ;

Détergents et engrais (Zereg, 2019 ; Seddi, 2024).

I.5.3.9.2. Nitrates (NO_3^-)

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

I.5.3.9.3. Nitrites (NO_2^-)

Les nitrites jouent un rôle transitoire dans le cycle de l'azote, se situant entre l'ammoniac et les nitrates. Ils résultent soit de l'oxydation bactérienne de l'ammoniac, soit de la réduction des nitrates. Des taux élevés de nitrites sont souvent révélateurs d'une contamination par des substances toxiques (Touhari, 2019).

I.5.3.9.4. Ammonium (NH_4^+)

L'azote ammoniacal est un gaz hydrosoluble présent en très faible concentration dans les eaux naturelles, généralement inférieure à 0,1 mg/l. Il constitue un indicateur pertinent de la pollution des

milieux aquatiques par les rejets urbains. Dans les eaux de surface, sa présence résulte principalement de la dégradation de matières organiques azotées et des échanges gazeux avec l'atmosphère (Makhoukh et al., 2011 ; Seddi, 2024).

I.5.3.10. Métaux lourds

Les métaux lourds sont des éléments métalliques dont la masse atomique est élevée et qui peuvent s'accumuler dans les organismes vivants. Bien que certains soient oligo-éléments essentiels à très faibles doses (zinc, cuivre), d'autres (plomb, mercure, cadmium, arsenic) présentent une toxicité élevée même à de faibles concentrations (Rodier et al., 2009). Leur présence dans les eaux souterraines est souvent liée à des activités anthropiques : industrie, agriculture, rejets domestiques ou corrosion des conduites.

I.5.3.10.1. Plomb (Pb)

Le plomb peut provenir de la corrosion des conduites en plomb, des batteries, ou de l'usage d'insecticides. Il est hautement toxique et ne possède aucun rôle biologique utile. Son accumulation provoque des troubles neurologiques, rénaux et digestifs, surtout chez les enfants (OMS, 2022).

I.5.3.10.2. Cadmium (Cd)

Le cadmium est utilisé dans les batteries, peintures, engrais phosphatés. C'est un cancérogène reconnu et il s'accumule dans les reins et le foie. Il est peu fréquent à l'état naturel dans les aquifères, mais sa détection, même faible, est préoccupante (Rodier et al., 2009).

I.5.3.10.3. Mercure (Hg)

Le mercure est généralement absent des nappes sauf en cas de pollution industrielle, notamment liée à la production de chlore, de pesticides ou de thermomètres. Il peut s'accumuler dans le système nerveux central, provoquant des atteintes irréversibles (OMS, 2022).

I.5.3.10.4. Arsenic (As)

L'arsenic est naturellement présent dans certains contextes géologiques (roches volcaniques, sédiments riches en sulfures), mais sa solubilité augmente en conditions réductrices. Il est hautement toxique et cancérogène à long terme (OMS, 2022).

I.5.3.10.5. Cuivre (Cu) et Zinc (Zn)

Essentiels en petite quantité, le cuivre et le zinc peuvent toutefois affecter le goût de l'eau à forte concentration. Le cuivre peut également provenir de la corrosion des tuyaux (Rodier et al., 2009).

I.6. Normes de qualité des eaux souterraines

Les normes de qualité des eaux souterraines sont des références établies par des organismes internationaux (tels que l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)) ou nationaux pour garantir que l'eau est sans danger pour la consommation humaine, l'irrigation ou les usages industriels.

Ces normes fixent les concentrations maximales admissibles pour les principaux paramètres physiques, chimiques et biologiques.

I.6.1. Normes Physiques

Tableau I.5. Paramètres physico-chimiques de l'eau et leurs normes recommandées

Paramètre	Norme recommandée	Unité	Remarque
Température	15–25°C	°C	Influence indirecte (odeur, goût)
Turbidité	< 5	NTU	À faible turbidité pour une eau potable
Couleur	< 15	Unités Pt-Co	Doit être incolore pour être acceptable
Conductivité électrique	50–1500	µS/cm	Dépend du contexte géologique

I.6.2. Normes Chimiques (selon l'OMS)

Tableau I.6. Limites recommandées des principaux paramètres chimiques de l'eau potable (en mg/L)

Paramètre	Valeur limite (mg/L)	Remarques
pH	6,5 – 8,5	Eau ni trop acide ni trop basique
Résidu sec (TDS)	< 500	Jusqu'à 1500 mg/L accepté selon contexte
Dureté totale (CaCO ₃)	60–180	Eau potable entre douce et dure
Calcium (Ca ²⁺)	75	Concentration acceptable
Magnésium (Mg ²⁺)	50	Limite indicative
Sodium (Na ⁺)	200	Limite gustative
Potassium (K ⁺)	12	Généralement sans risque
Chlorures (Cl ⁻)	250	Goût salé au-delà
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	250	Effets laxatifs au-dessus
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	-	Pas de limite spécifique
Nitrates (NO ₃ ⁻)	50	Toxique (risque de méthémoglobinémie)
Fluorures (F ⁻)	1,5	Carie à faible dose, fluorose à haute dose
Fer (Fe)	0,3	Coloration, goût métallique
Manganèse (Mn)	0,1	Effets esthétiques
Plomb (Pb)	0,01	Très toxique, effets neurologiques
Arsenic (As)	0,01	Carcinogène connu
Mercure (Hg)	0,006	Très toxique

I.6.3. Normes Biologiques (OMS)

Tableau I.7. Normes microbiologiques de potabilité de l'eau

Paramètre	Limite fixée	Remarque
Coliformes totaux	0 / 100 mL	Aucune présence tolérée
Escherichia coli	0 / 100 mL	Indicateur de pollution fécale récente
Pathogènes spécifiques	Absence	Eau considérée comme non potable si présents

I.7. Conclusion

La préservation de la qualité des eaux souterraines représente un enjeu majeur, particulièrement dans les régions arides où ces ressources constituent souvent la seule alternative durable face à la rareté des eaux de surface. Les différentes analyses physico-chimiques, bactériologiques et organoleptiques révèlent que de nombreux facteurs – naturels ou anthropiques – peuvent altérer la potabilité et la fonctionnalité de ces eaux.

Une surveillance rigoureuse et continue des paramètres de qualité est donc indispensable. Elle permet non seulement de détecter précocement les sources de contamination, mais aussi d'ajuster les stratégies de gestion et d'exploitation en fonction des évolutions observées.

La mise en place de réseaux de suivi, la régulation des pratiques agricoles et industrielles, ainsi qu'une meilleure sensibilisation des usagers à la fragilité des aquifères sont des leviers fondamentaux pour garantir une gestion durable, sûre et responsable des eaux souterraines à long terme.

Chapitre II : Présentation des caractéristiques naturelle de la région de Zelfana

II.1. Introduction

Dans les zones arides comme le Sahara Algérien, où l'eau constitue une ressource rare et précieuse, l'analyse du cadre naturel permet d'évaluer les potentialités et les contraintes liées à l'exploitation durable des aquifères. La région de Zelfana, située dans la wilaya de Ghardaïa, illustre parfaitement cette réalité saharienne. Ce chapitre vise à présenter les éléments physiques dominants de cette région, en mettant en évidence son positionnement géographique, les formes de relief qui la caractérisent, ainsi que les principales composantes de son système hydrogéologique. Ce cadre sera également complété par les aspects socio-économiques et climatiques qui influencent fortement la gestion locale des ressources naturelles.

II.2. Cadre Géographique

La région de Zelfana est située dans la partie nord du Sahara Algérien, au sein de la wilaya de Ghardaïa. Elle est localisée à environ 65 km au sud-est du chef-lieu, à une latitude de 32°57'N et une longitude de 3°18'E. Son altitude moyenne est d'environ 380 m. Cette position géographique confère à Zelfana un climat désertique chaud et influence fortement ses caractéristiques géologiques et hydriques (Boudiaf, 2006).

L'accessibilité à Zelfana est assurée par des routes nationales et régionales, reliant la ville aux centres urbains voisins comme Ghardaïa et Ouargla. L'urbanisation reste concentrée autour d'oasis traditionnelles et de nouvelles implantations, reflet d'une dynamique récente de développement rural.

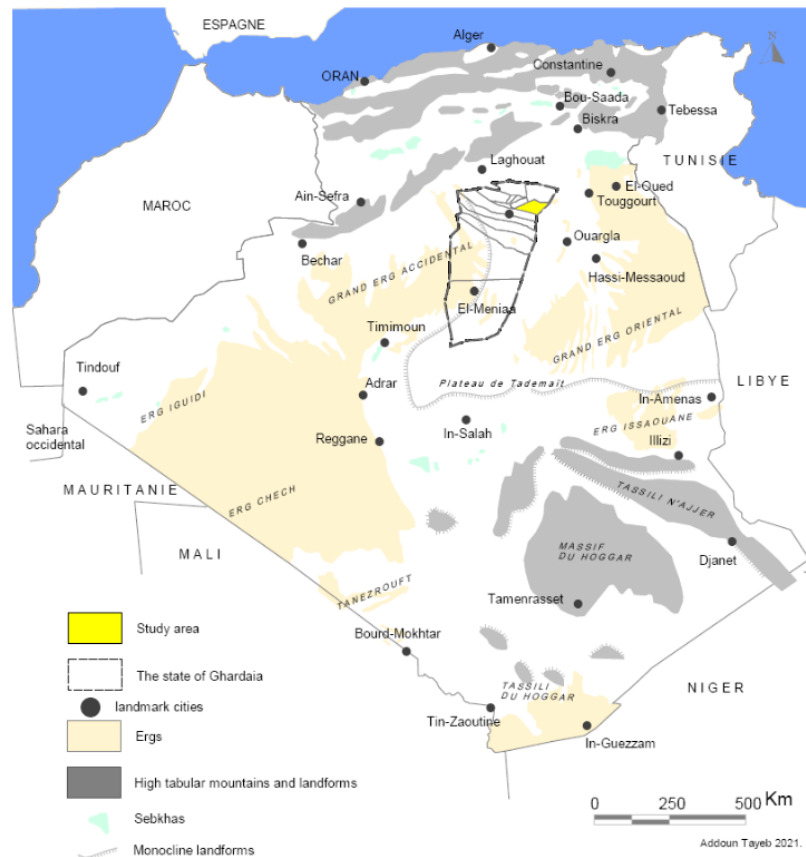


Figure II.1. Localisation de la région de Zelfana

II.3. Cadre Géomorphologique

La région de Zelfana se caractérise par un environnement géomorphologique typique des zones sahariennes, façonné par des processus arides et éoliens. Le paysage est dominé par une alternance de dunes, de regs, de sebkhas et de plateaux, reflétant une dynamique ancienne d'érosion, de dépôt et de sédimentation (Mainguet, 1999).

II.3.1. Relief

Le relief de la région de Zelfana est relativement plat à faiblement ondulé, avec une altitude moyenne oscillant entre 300 et 400 mètres. Il est structuré en trois grandes unités morphologiques :

- Les regs : vastes étendues pierreuses érodées, recouvrant des surfaces dures et stables. Ils occupent la majeure partie du territoire.
- Les ergs ou zones dunaires : localisées au sud et à l'est de la commune, composées de dunes fin modelées par les vents dominants (vents d'est et nord-est). Ces formations témoignent d'une forte activité éolienne.

- Les dépressions fermées : telles que les sebkhas, zones de bas-relief où l'eau stagnante s'accumule temporairement après les pluies, favorisant la concentration des sels.

Ces unités topographiques influencent fortement la circulation superficielle de l'eau et la recharge des nappes souterraines.

II.3.2. Sol

Les sols de Zelfana sont peu développés, souvent squelettiques, avec une faible teneur en matière organique. On distingue plusieurs types:

- Sols sablonneux dans les zones dunaires : perméables, pauvres, très sensibles à l'érosion éolienne.
- Sols salins dans les sebkhas : riches en sels solubles (chlorures, sulfates), souvent impropres à l'agriculture sans traitement préalable.
- Sols caillouteux ou lithosols sur les regs : très minces, reposant directement sur des formations rocheuses ou compactées.

Ces types de sols présentent une faible capacité de rétention d'eau, ce qui limite considérablement leur potentiel agricole naturel sans irrigation adaptée.

II.3.3. Couvert végétal

Le couvert végétal naturel de la région de Zelfana est très clairsemé, typique des milieux sahariens. Il se compose essentiellement:

- D'espèces xérophiles et halophiles, adaptées à la sécheresse et à la salinité des sols, telles que *Tamarix gallica*, *Salsola vermiculata*, et *Haloxylon articulatum*.
- De végétation temporaire après les pluies, notamment des graminées et plantes annuelles à cycle court.

Le couvert végétal joue néanmoins un rôle important dans la protection contre l'érosion éolienne et la stabilisation des dunes, en plus de contribuer à la biodiversité locale.

II.4. Contexte socio-économique de la région

II.4.1. Démographie et répartition

La commune de Zelfana, située dans la wilaya de Ghardaïa, comptait environ 13 000 habitants selon les données issues du Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2021. Cette population, bien que modeste en valeur absolue, connaît une croissance constante, principalement due à l'amélioration de l'accès aux services sociaux de base et au développement progressif des infrastructures.

La répartition spatiale de la population présente une forte concentration autour du centre-ville de Zelfana, qui regroupe les principales activités administratives, commerciales et éducatives. À cela s'ajoutent plusieurs zones résidentielles périphériques en développement, notamment les quartiers de El Moudjahidine, Elmosalaha, et Guifla, où se localisent également plusieurs forages stratégiques d'exploitation d'eau souterraine. En revanche, les zones rurales éloignées sont très faiblement peuplées, en raison des contraintes environnementales fortes (climat aride, sol pauvre, isolement), ce qui accentue le phénomène de polarisation urbaine au sein de la commune.

La structure démographique de Zelfana est dominée par une population jeune, ce qui représente à la fois un potentiel humain pour le développement local et un défi socio-économique, en termes de besoins en éducation, emploi, santé et logement. Cette dynamique impose la mise en œuvre de politiques publiques adaptées à la croissance urbaine et à la pression exercée sur les ressources naturelles, notamment en eau.

II.4.2. Économie locale

L'économie de la commune de Zelfana repose principalement sur le secteur primaire, à savoir l'agriculture et l'élevage, deux activités profondément ancrées dans les traditions locales, mais fortement dépendantes des ressources naturelles et des conditions climatiques extrêmes.

L'agriculture oasienne constitue l'activité dominante, centrée autour de la culture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera*), qui bénéficie d'un savoir-faire local transmis de génération en génération. Cette culture est pratiquée en zones irriguées, alimentées par des forages profonds exploitant la nappe du Continental Intercalaire. Toutefois, la dépendance à l'irrigation, combinée à la salinisation progressive des sols et à l'épuisement des eaux souterraines, rend cette agriculture vulnérable et difficilement extensible.

L'élevage extensif (ovins, caprins, camélidés) reste également présent, notamment en périphérie de la commune, mais il est fortement limité par la désertification des parcours et la rareté des ressources fourragères, accentuées par les sécheresses récurrentes.

Le secteur secondaire est quasi inexistant, hormis quelques activités artisanales traditionnelles (vannerie, poterie, tissage) à faible valeur ajoutée, souvent informelles. Le secteur tertiaire connaît une croissance progressive, avec le développement des commerces de proximité, des services publics (santé, éducation, administration) et une faible dynamique dans le petit commerce local.

II.4.3. Infrastructures

La commune de Zelfana dispose d'un réseau d'infrastructures de base en constante amélioration, bien que des disparités subsistent entre les zones centrales et les périphéries rurales. Les efforts de développement, portés par les programmes publics de soutien au Sud algérien, ont permis de renforcer l'accessibilité, l'approvisionnement en services essentiels, ainsi que les équipements socio-collectifs.

Sur le plan des infrastructures de transport, Zelfana est reliée aux principales agglomérations de la région, notamment Ghardaïa et El Guerrara, par un réseau routier bitumé fonctionnel. Les routes régionales permettent l'acheminement des produits agricoles, le transport des personnes et la mobilité des services administratifs. Toutefois, certaines pistes rurales non aménagées restent difficilement praticables, notamment en période de crue ou de tempêtes de sable.

Concernant l'approvisionnement en eau potable, la commune est alimentée par plusieurs forages profonds, dont ceux de Guifla n°2, Centre-ville n°4, et Elmoudjahidine, captant l'eau de la nappe albienne. Ce système permet de répondre à une partie des besoins domestiques et agricoles, bien qu'il souffre parfois d'interruptions dues à des pannes techniques ou à une baisse du débit. L'eau est distribuée à travers un réseau de canalisation géré par l'Algérienne des Eaux (ADE), qui fait face à des défis de maintenance et de modernisation.

En matière d'assainissement, de nombreux quartiers sont raccordés à un système de collecte des eaux usées, mais des lacunes persistent dans certaines zones rurales ou récentes. Les eaux usées sont généralement dirigées vers des fosses septiques individuelles, avec des risques de pollution localisée des sols en cas de mauvaise gestion.

Les infrastructures de santé comprennent une polyclinique, un hôpital local et plusieurs salles de soins réparties dans les quartiers. Toutefois, le plateau technique reste limité, et de nombreux patients doivent se rendre à Ghardaïa pour des soins spécialisés.

Sur le plan éducatif, Zelfana est dotée de plusieurs établissements d'enseignement primaire et moyen, ainsi que d'un lycée. Des efforts sont en cours pour élargir l'offre éducative, notamment dans les spécialités techniques adaptées au contexte saharien (agriculture, hydraulique, énergie).

En résumé, malgré des avancées notables, le système d'infrastructures de Zelfana demeure en transition, avec des besoins urgents de modernisation, en particulier dans les secteurs de l'eau, de l'assainissement, de la santé et de l'emploi local.

II.4.4. Enjeux

La commune de Zelfana, bien qu'elle bénéficie d'un positionnement stratégique au cœur de la wilaya de Ghardaïa et d'un riche potentiel en ressources souterraines, fait face à une série d'enjeux majeurs liés à son développement socio-économique et environnemental. Ces défis conditionnent fortement la durabilité des activités humaines et la qualité de vie des habitants.

L'un des enjeux fondamentaux est la pression croissante sur les ressources en eau, notamment les eaux souterraines de la nappe albiennaise, qui constituent la seule source fiable d'approvisionnement en eau pour la population, l'agriculture et l'élevage. La surexploitation des forages, l'absence de mécanismes de suivi et de contrôle rigoureux, ainsi que le manque de sensibilisation des usagers contribuent à un risque d'épuisement progressif de la ressource, ou à une détérioration de sa qualité physico-chimique.

Le changement climatique représente un second enjeu de taille. Il se manifeste localement par une hausse des températures moyennes annuelles, une prolongation de la saison sèche, et une intensification des phénomènes extrêmes (sécheresses, vents de sable, orages soudains). Ces phénomènes impactent directement les activités agricoles, les conditions de vie et la résilience des infrastructures.

II.5. Réseau hydrographique

La région de Zelfana, située dans une zone aride du sud-est algérien, ne dispose pas d'un réseau hydrographique permanent en surface. Le contexte climatique saharien, marqué par une très faible pluviométrie et une forte évaporation, limite considérablement le développement d'un drainage fluvial durable. Néanmoins, des traces d'un réseau hydrographique fossile ou temporaire peuvent être observées.

Réseau de drainage temporaire

Le réseau hydrographique de la zone est principalement constitué de "chotts" et de "oueds" intermittents, dont l'activité est conditionnée par les précipitations rares et intenses, généralement sous

forme d'orages localisés. Ces oueds, tels que l'Oued Zelfana, Oued Guifla, ou encore Oued El Guerrara, sont à écoulement épisodique, ne fonctionnant que pendant les crues saisonnières. Ils jouent toutefois un rôle important dans l'alimentation indirecte des nappes souterraines par infiltration rapide dans les lits sableux et les dépressions.

Formations de surface associées

Les sebkhas (zones salées) et regs (plaines pierreuses) constituent des témoins de la dynamique hydrologique passée. Ces formations topographiques indiquent l'existence ancienne d'un drainage plus actif, probablement en lien avec des climats plus humides lors des périodes quaternaires.

II.6. Paramètres climatiques de la région

II.6.1. Température

L'analyse des températures mensuelles de la région de Zelfana pour l'année 2024 met en évidence un climat saharien typique, marqué par une forte amplitude thermique annuelle et journalière. La température moyenne annuelle se situe autour de 24 °C, avec des extrêmes bien marqués entre les mois d'hiver et d'été.

Tableau II.1. Températures Mensuelles À Zelfana - 2024

Mois	T (°C)	T. max moy (°C)	T. min moy (°C)	T. max abs. (°C)	T. min abs. (°C)
Jan	14.6	20.4	8.8	26.7	3.4
Fév	15.4	20.6	10.2	27.2	3.6
Mar	19.5	25.7	13.2	31.7	8.4
Avr	20.8	26.3	15.4	34.7	9.6
May	27.6	34.1	21.2	40.3	13.8
Jui	33.7	40.3	27.2	47.4	20.2
Juil	36.7	43.1	30.3	47.2	25.3
Aou	34.6	40.5	28.6	45.2	25.3
Sep	29.0	34.3	23.6	41.9	17.5
Oct	25.2	30.4	20.0	37.6	13.1
Nov	19.2	24.4	13.9	28.7	10.3
Déc	12.6	17.9	7.4	24.4	2.3

Durant la période hivernale, les mois de janvier et février enregistrent des températures moyennes de 14,6 °C et 15,4 °C respectivement. Les températures minimales absolues descendent jusqu'à 3,4 °C en janvier et 3,6 °C en février, traduisant une fraîcheur nocturne importante malgré des journées relativement douces (maximum moyen autour de 20–21 °C).

Le printemps est caractérisé par une hausse progressive des températures. En mars, la température moyenne grimpe à 19,5 °C, avec des extrêmes allant de 8,4 °C à 31,7 °C, marquant une forte amplitude thermique journalière. Ce phénomène s'intensifie en avril, avec une moyenne de 20,8 °C, et une température maximale absolue de 34,7 °C.

En mai, l'entrée dans la saison chaude est marquée par une nette élévation des températures : la température moyenne atteint 27,6 °C, avec un maximum moyen de 34,1 °C et une valeur extrême de 40,3 °C, témoignant des premiers épisodes de chaleur intense.

Ces données confirment que la région de Zelfana connaît des étés très chauds, des printemps rapidement torrides, et des hivers modérément doux en journée mais froids la nuit. Cette variabilité thermique a des implications importantes sur les besoins en irrigation, le confort thermique, et la conception des infrastructures locales.

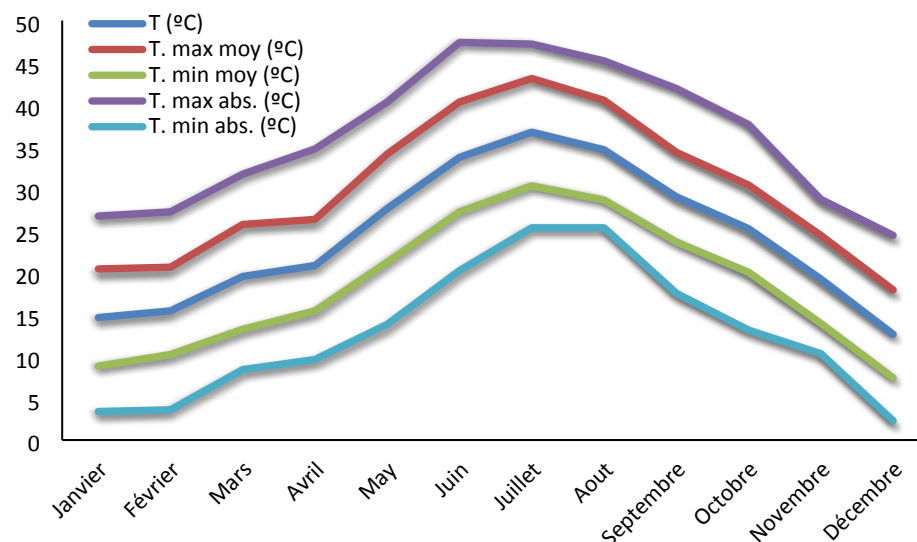


Figure.II.2. Températures Mensuelles À Zelfana - 2024

II.6.2. Précipitations

Le climat de Zelfana entre 2020 et 2024 confirme son appartenance aux régions hyperarides, avec des précipitations annuelles systématiquement très faibles. En 2024, la pluviométrie totale n'a atteint que 28.7 mm, bien en dessous du seuil de 100 mm/an définissant les zones hyperarides. Les années précédentes présentent des tendances similaires : 36.7 mm en 2023, 30.1 mm en 2022, 23.3 mm en 2021 et 20.2 mm en 2020. Ces valeurs montrent une variabilité interannuelle, mais demeurent toujours dans une fourchette extrêmement basse. De plus, les précipitations sont très irrégulièrement réparties au cours de l'année, avec une concentration sur quelques mois seulement (notamment mars, novembre et parfois septembre), tandis que de longs mois restent totalement secs. Ce déficit hydrique chronique,

caractéristique du climat saharien, a des implications majeures sur les ressources en eau, l'agriculture et les écosystèmes locaux.

Tableau II.2. Précipitations mensuelles à Zelfana en 2020-2024

Années	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Total (mm)
2024	7.4	0.0	9.6	0.8	4.2	0.0	2.6	0.0	3.1	0.0	0.0	1.0	28.7
2023	0.0	15.2	11.0	0.0	1.3	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	36.7
2022	0.0	2.1	12.3	6.5	0.0	0.0	0.9	3.7	0.0	0.0	0.0	4.6	30.1
2021	0.0	4.0	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0	3.2	23.3
2020	0.0	1.1	5.9	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.4	20.2

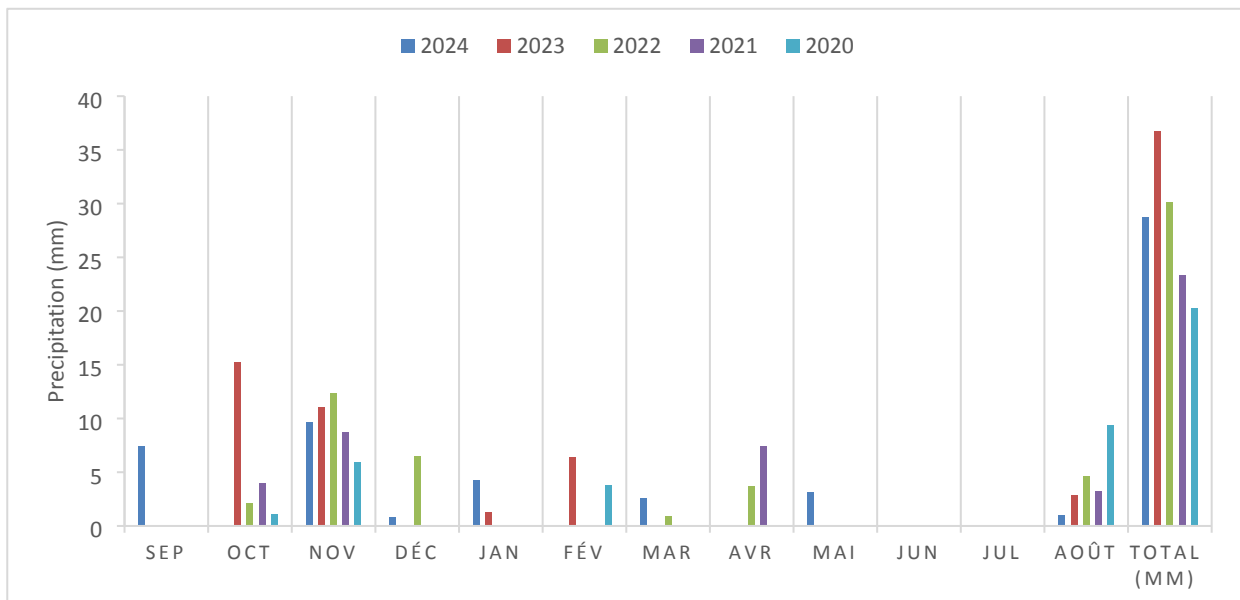


Figure.II.3. Précipitations mensuelles à Zelfana en 2020-2024

II.6.3. Vent

En 2024, les données météorologiques enregistrées à Zelfana révèlent une vitesse moyenne annuelle du vent de 6.63 m/s, soit environ 23.87 km/h, ce qui confirme la présence régulière de vents modérés à forts, typiques des régions sahariennes. Ces vents présentent une dynamique diurne bien marquée, avec des intensités généralement plus élevées en après-midi et en début de soirée, en raison du réchauffement diurne du sol désertique qui intensifie les mouvements convectifs.

La fréquence et l'intensité de ces vents ont des implications environnementales majeures dans cette région :

- Ils favorisent le transport éolien des particules fines et la formation de dunes mobiles, ce qui représente un risque pour les infrastructures locales (routes, habitations, forages).
- Ils contribuent à accroître l'évaporation potentielle, aggravant ainsi le déficit hydrique chronique observé dans la région.
- En contrepartie, cette ressource éolienne pourrait être exploitable à des fins énergétiques, notamment pour le pompage des eaux souterraines ou la production d'électricité rurale, dans une logique de développement durable.

Ainsi, le vent constitue à la fois un facteur de contrainte climatique et une opportunité potentielle pour la gestion des ressources dans le contexte saharien de Zelfana.

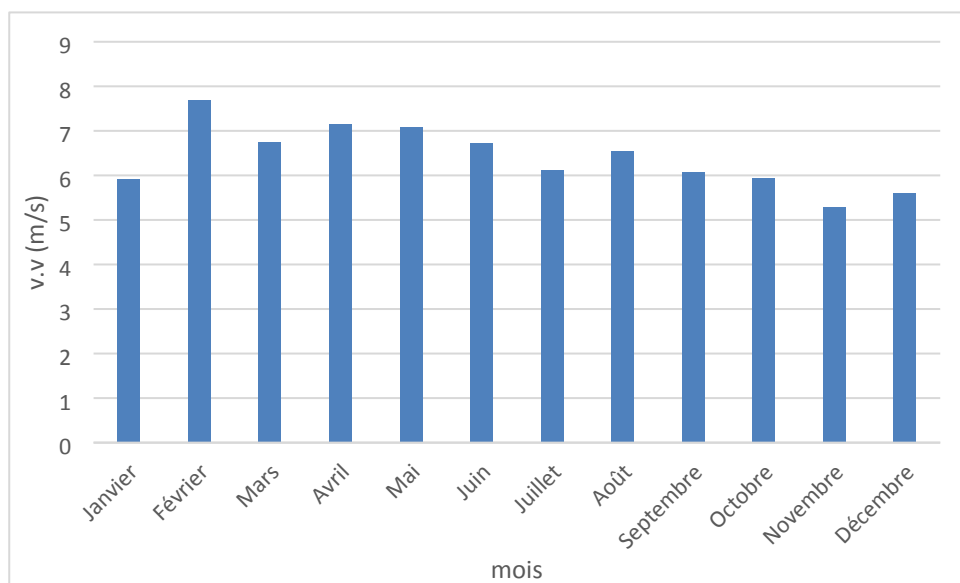


Figure.II.4. Évolution de la vitesse du vent à Zelfana du 2024 (en m/s)

II.6.4. Humidité

En 2024, les relevés météorologiques effectués à Zelfana indiquent une humidité relative moyenne annuelle de 37.77 %, ce qui reflète une aridité atmosphérique élevée, typique du climat saharien hyperaride. Cette valeur moyenne masque cependant une variabilité quotidienne marquée, fortement influencée par le cycle thermique diurne.

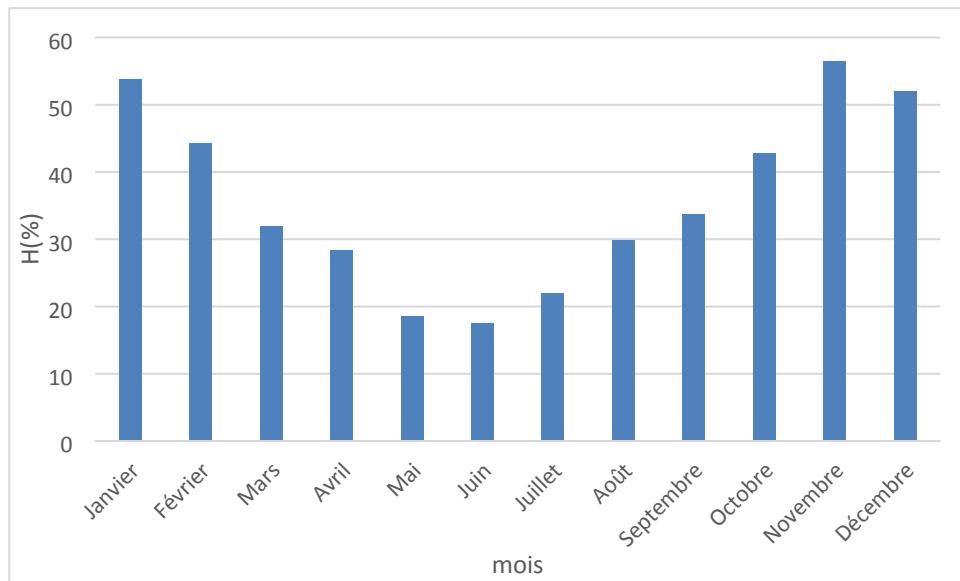


Figure.II.5. Variation de l'humidité relative (%) à Zelfana 2024

L'humidité relative atteint généralement ses valeurs maximales en début de matinée, entre 06 h et 09 h, période pendant laquelle les températures sont encore basses, favorisant une saturation partielle de l'air en vapeur d'eau. À l'inverse, l'après-midi, notamment entre 12 h et 18 h, est marqué par une chute significative de l'humidité, souvent en dessous de 25 %, en réponse au réchauffement rapide du sol et de l'atmosphère.

Ces conditions hygrométriques ont plusieurs impacts notables :

- Elles aggravent le stress hydrique des végétaux, en particulier les cultures en surface sensibles à la dessiccation.
- Elles augmentent l'évapotranspiration potentielle, ce qui réduit la disponibilité effective en eau pour les plantes et les sols.
- Elles accentuent le risque de déshydratation humaine et rendent plus difficile la régulation thermique du corps, surtout pendant les épisodes de chaleur intense.

L'humidité relative, en interaction avec la température, le vent et l'insolation, constitue donc un facteur clé à considérer dans la gestion agro-environnementale de la région de Zelfana.

II.7. Cadre géologique de la région

La région de Zelfana, située au sud-est de la wilaya de Ghardaïa, s'inscrit dans un contexte géologique saharien caractérisé par la prédominance de formations sédimentaires d'âge mésozoïque à cénozoïque. Elle fait partie intégrante du bassin nord du Sahara, un vaste ensemble sédimentaire couvrant une grande partie de l'Algérie, de la Tunisie et de la Libye.

II.7.1. Contexte structural

Zelfana est localisée dans la région du Sahara septentrional, plus précisément sur la bordure orientale du bassin de l'Algéro-Saharo-Touareg, où les affleurements sont relativement rares. Le secteur repose essentiellement sur des couches sédimentaires horizontalement disposées ou légèrement inclinées, traduisant une tectonique relativement stable. Néanmoins, certaines failles régionales peuvent influencer localement les circulations d'eau souterraine, notamment dans les zones de transition entre formations géologiques.

II.7.2. Lithologie dominante

La lithologie de la région est dominée par :

- Des grès et sables du Continental Intercalaire (Crétacé inférieur à moyen), formant L'aquifère profond de la région appartient au système du Continental Intercalaire, également appelé nappe albienne. Il s'étend sur une grande partie du Sahara septentrional et constitue une réserve stratégique en eau pour les pays du Maghreb (OSS, 2003).
- Des formations marno-gypseuses et argilo-sableuses du Complexe Terminal (Éocène à Miocène), recouvrant le Continental Intercalaire dans les zones de transition. Cette nappe superficielle présente une salinité variable selon les conditions locales d'infiltration et de recharge.
- Des formations évaporitiques, notamment des gypses et des anhydrites, qui participent fortement à la minéralisation des eaux souterraines par dissolution.

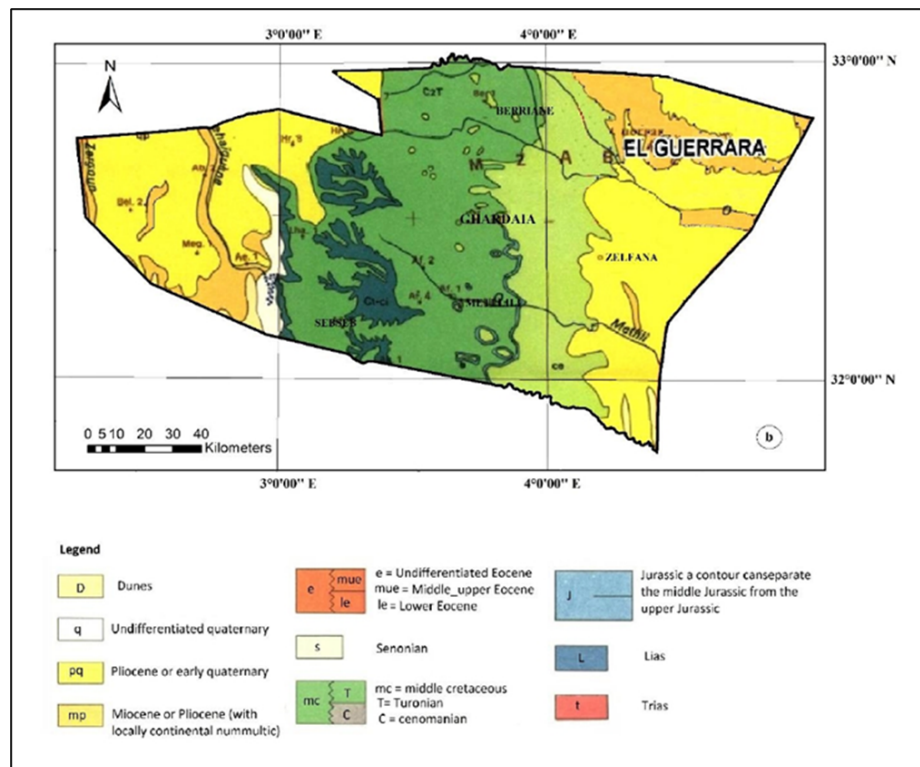


Figure.II.6. Carte géologique de la région de Ghardaïa montrant la zone d'étude (ANRH, 2010).

II.8. Cadre Hydrogéologique

La région d'étude repose sur le Système Aquifère du Continental Intercalaire (SACI), également désigné sous le nom de nappe albienne. Il s'agit d'un aquifère profond, captif, de type multicouche, contenu principalement dans des formations gréseuses et sableuses d'âge Crétacé inférieur (Albien). Ce système aquifère s'étend sur plusieurs pays du Maghreb (Algérie, Tunisie, Libye) et constitue l'un des plus grands réservoirs d'eau fossile au monde (OSS, 2006 ; Seddi, 2024).

Dans la région de Zelfana, la nappe albienne se situe entre 400 et 1000 mètres de profondeur, et est confinée entre des couches imperméables d'argiles et de marnes, ce qui la protège partiellement des pollutions de surface, mais limite aussi sa recharge naturelle, très faible dans ce contexte saharien.

L'exploitation de cette ressource s'effectue par cinq forages principaux :

- Guifla n°2
- El-Moudjahidine
- Route El Guerrara
- Centre-ville n°4
- El-Mosalaha

Ces ouvrages sont équipés de pompes immergées permettant de capter l'eau à grande profondeur pour les besoins domestiques et agricoles. Une anomalie hydraulique a été identifiée sur le forage Guifla n°2, où une baisse du débit et un assèchement partiel ont été observés dès 100 mètres de profondeur, alors que la profondeur totale de l'aquifère dépasse 900 mètres. Cela pourrait être lié à une obstruction

mécanique, à une perte d'intégrité des colonnes ou à une variabilité lithologique locale affectant la transmissivité (Kadri et Mesroua, 2020).

Ce constat souligne l'importance d'un suivi technique régulier des forages, notamment par des tests de pompage, des diagraphies électriques et acoustiques, et une maintenance préventive adaptée aux conditions arides locales.

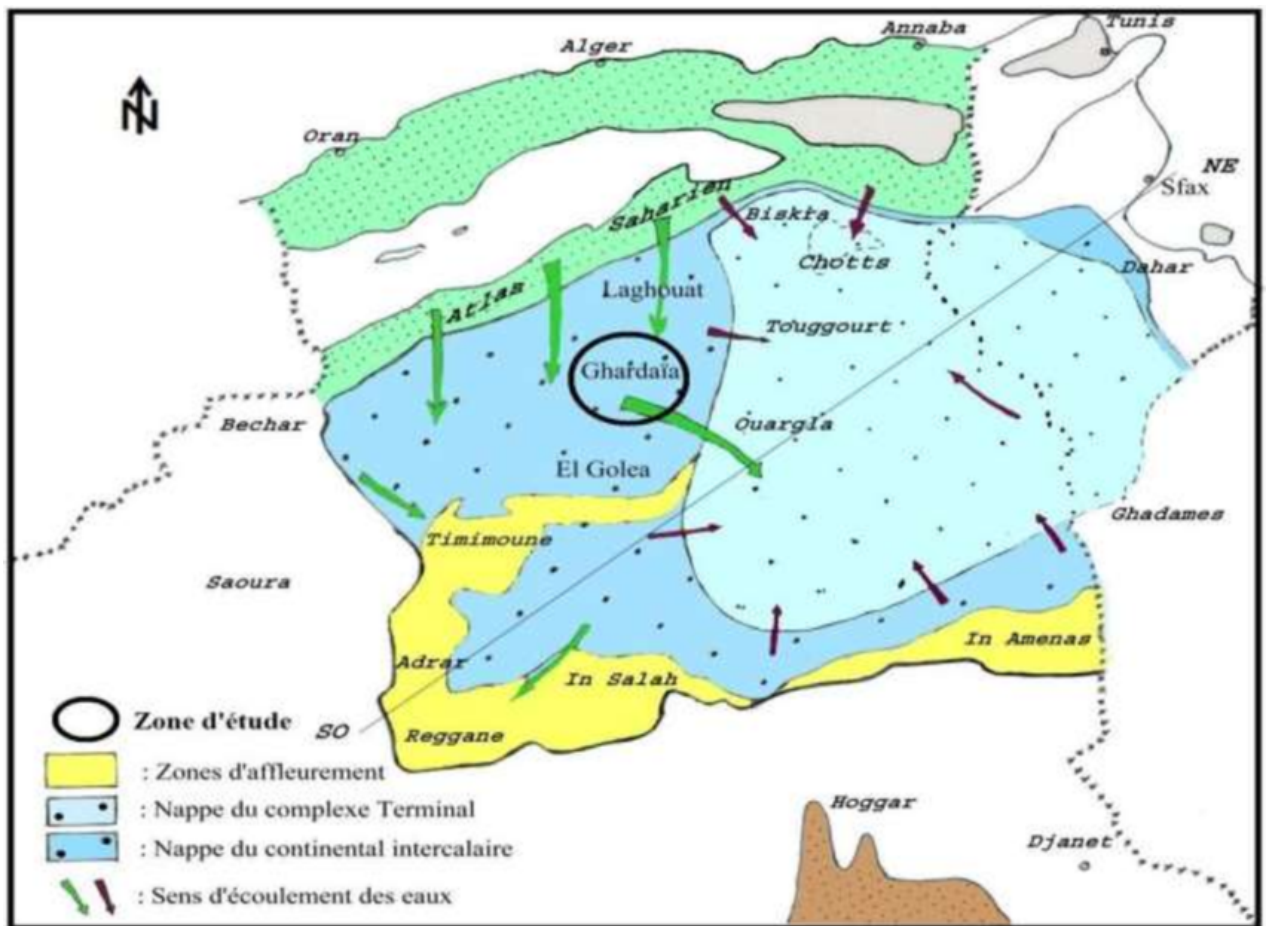


Figure.II.7. Carte géologique et hydrogéologique de la région de Ghardaïa montrant la zone d'étude

II.8.1. Potentiel aquifère

Le sous-sol de Zelfana est traversé par deux grands systèmes aquifères :

- La nappe du Continental Intercalaire, profonde, très étendue et présentant une minéralisation modérée à forte selon les interactions avec les formations traversées.
- La nappe du Complexe Terminal, plus superficielle, souvent affectée par l'évaporation intense et les apports anthropiques, ce qui peut entraîner une dégradation de la qualité de l'eau.

II.8.2. Influence géologique sur la qualité de l'eau

Les caractéristiques géologiques influencent directement la composition chimique des eaux souterraines :

- La présence de roches évaporitiques favorise une forte concentration en ions chlorures et sulfates.
- Les interactions eau-roche dans les formations gréseuses enrichissent les eaux en calcium, magnésium et bicarbonates.

Les zones faillées ou de discontinuité peuvent localement favoriser des remontées profondes ou des mélanges entre nappes, complexifiant le régime chimique.

II.8.3. Vulnérabilité de l'Aquifère

L'aquifère du Continental Intercalaire, bien qu'étendu et relativement protégé par des formations imperméables, présente une vulnérabilité structurelle et fonctionnelle importante, en particulier dans les zones sahariennes comme celle de Zelfana. Plusieurs facteurs interdépendants contribuent à cette fragilité :

II.8.3.1. Recharge naturelle quasi inexistante

La région de Zelfana est caractérisée par un climat hyper-aride, où les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 100 mm/an. Dans ce contexte, la recharge naturelle de l'aquifère est extrêmement lente et repose uniquement sur des infiltrations diffuses très localisées (Hasnia, 2018). L'absence de zones de recharge actives rend l'aquifère non renouvelable à l'échelle humaine.

II.8.3.2. Traversée de formations évaporitiques

Les formations géologiques traversées, notamment les couches contenant du gypse, de l'anhydrite ou des halites, contribuent à la minéralisation excessive des eaux. Cela entraîne une augmentation des teneurs en chlorures, sulfates et sodium, affectant directement la qualité de l'eau captée (Seddi, 2024). Ces éléments géochimiques naturels accentuent les phénomènes de salinité et rendent l'eau moins apte à la consommation humaine ou à certaines cultures sensibles.

II.8.3.3. Surexploitation et absence de suivi technique

Les prélèvements croissants destinés à l'agriculture irriguée, en plus de l'usage domestique, dépassent largement les capacités de renouvellement de l'aquifère. Dans certains cas, comme le forage Guifla n°2, des anomalies de débit ou des baisses de niveau piézométrique ont été constatées, sans qu'aucun programme de suivi systématique ne soit mis en œuvre (Kadri & Mesroua, 2020). L'absence

de suivi hydrochimique régulier rend également difficile la détection précoce des contaminations ou déséquilibres.

II.8.3.4. Conséquences et nécessité d'une gestion intégrée

Cette combinaison de recharge quasi nulle, de salinité naturelle élevée et de prélèvements non contrôlés accentue la vulnérabilité de la ressource. Une gestion intégrée et durable, basée sur :

La modélisation hydrogéologique,

La régulation des prélèvements,

Le traitement ou la réutilisation des eaux usées,

Et la sensibilisation des usagers, est impérative pour préserver la nappe albienne et éviter son épuisement ou sa dégradation irréversible.

II.9. Conclusion

L'étude du cadre géographique, géomorphologique, géologique et hydrogéologique de la région de Zelfana révèle une structure naturelle complexe et fragile, fortement influencée par les conditions climatiques extrêmes du Sahara. Située à la limite des zones steppiques et sahariennes, la commune présente un relief dominé par des formations éoliennes (dunes), des regs et des sebkhas, résultant d'une dynamique géomorphologique aride. Sur le plan hydrogéologique, la région repose sur un aquifère profond du Continental Intercalaire, dont l'exploitation repose sur plusieurs forages stratégiques. Cependant, la surexploitation de cette ressource, combinée à une recharge quasi nulle et à des formations géologiques favorisant la minéralisation, en fait un système vulnérable.

Ce diagnostic du milieu physique constitue une base incontournable pour toute démarche de planification et de préservation des ressources en eau dans la commune de Zelfana.

Chapitre III : Analyse statistique multivariée des eaux souterraines

III.1. Introduction

L'analyse statistique multivariée constitue un outil fondamental pour l'interprétation des données hydrochimiques, notamment dans les zones arides comme celle de Zelfana, où les aquifères sont soumis à des pressions croissantes d'origine naturelle et anthropique. Dans ce contexte, la composition chimique des eaux souterraines est influencée par la lithologie des formations traversées, la durée de séjour de l'eau dans le sous-sol, ainsi que par des facteurs externes tels que la surexploitation pour l'irrigation et les usages domestiques.

Afin de mieux comprendre les processus de minéralisation et d'identifier les relations entre les différents paramètres physico-chimiques, une analyse statistique multivariée a été appliquée à des données issues de cinq forages répartis dans la région de Zelfana. Ces échantillons, analysés avec l'appui du laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE), ont permis de mesurer 15 éléments chimiques et physico-chimiques caractéristiques de la qualité de l'eau souterraine.

Les méthodes d'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ont été mobilisées pour explorer la structure interne des données, identifier les corrélations entre les variables, et regrouper les forages selon leurs similarités chimiques. Ces outils permettent non seulement de visualiser les tendances majeures, mais aussi de dégager des hypothèses sur les processus géochimiques contrôlant la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère étudié.

III.2. Balance ionique des échantillons

Le calcul de la balance ionique est une étape fondamentale dans l'évaluation de la qualité des analyses chimiques, car il permet de vérifier la cohérence entre les concentrations des cations et des anions mesurés. Un écart acceptable se situe généralement dans l'intervalle de $\pm 10\%$, au-delà duquel les résultats sont considérés comme peu fiables (Hem, 1985).

Les valeurs calculées pour les cinq forages de la région de Zelfana sont résumées dans le tableau III.1. L'analyse révèle que tous les échantillons présentent un déséquilibre ionique compris dans l'intervalle admissible. Les écarts varient entre -9% et $+3\%$, ce qui indique une bonne concordance entre les charges ioniques mesurées. Le plus grand écart est observé pour l'échantillon F4 (Forage Centre-ville n°4) avec une valeur de -9% , tandis que l'échantillon F2 (Forage Elmoudjahidine) affiche la plus grande valeur positive ($+3\%$).

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

Tableau III.1 : Valeurs de la balance ionique des échantillons analysés

Échantillons	Forage	BI (%)
F1	F. Guifla n°2	-2%
F2	F. Elmoudjahidine	3%
F3	F. Route El Guerrara	3%
F4	F. Centre-ville n°4	-9%
F5	F. Elmosalaha	-3%

La qualité globale des analyses peut ainsi être jugée satisfaisante. L'ensemble des valeurs se situent dans la marge de tolérance, ce qui garantit la fiabilité des résultats utilisés pour les traitements statistiques et les interprétations géochimiques ultérieures.

III.3. La qualité organoleptique des eaux

La qualité organoleptique de l'eau regroupe l'ensemble des caractéristiques perceptibles par les sens humains, principalement le goût, l'odeur, la couleur et la turbidité. Ces paramètres, bien que non directement liés à la toxicité de l'eau, jouent un rôle essentiel dans l'acceptabilité de l'eau par les consommateurs. Une eau potable doit être claire, inodore et avoir un goût neutre.

Couleur

La couleur de l'eau peut résulter de la présence de matières organiques naturelles, comme les acides humiques et fulviques, ou de métaux dissous tels que le fer et le manganèse. Elle est généralement mesurée en unités Pt-Co (Platine-Cobalt). Une couleur perceptible peut indiquer une contamination ou un dysfonctionnement du traitement.

Odeur et goût

L'odeur et le goût sont souvent liés à des composés organiques volatils, à la présence de chlore résiduel, ou encore à des algues et microorganismes dans les systèmes de distribution. Une eau présentant une odeur ou un goût désagréable, même si elle est conforme aux normes chimiques, sera rejetée par les usagers.

Turbidité

Bien qu'elle soit aussi un paramètre physique, la turbidité influence la perception visuelle de la qualité de l'eau. Elle est causée par des particules en suspension (argiles, matières organiques, microorganismes, etc.). Une eau très trouble peut indiquer une contamination microbiologique potentielle.

Les normes internationales, telles que celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), recommandent des seuils stricts pour ces paramètres afin de garantir l'acceptabilité sensorielle de l'eau potable. Par exemple, la turbidité ne doit généralement pas dépasser 5 NTU, et de préférence rester en dessous de 1 NTU pour une bonne désinfection (OMS, 2017).

III.4. Analyses statistiques des données de qualité

Une analyse statistique des paramètres physico-chimiques a été réalisée sur les eaux souterraines de cinq forages de la région de Zelfana. Le tableau ci-dessous présente les valeurs minimales, maximales, moyennes, ainsi que les écarts-types et les coefficients de variation (CV) de 15 éléments mesurés, en comparaison avec les normes de l'OMS et celles algériennes.

Le pH varie entre 7 et 7.5, avec une moyenne de 7.28, indiquant des eaux légèrement alcalines et conformes aux normes recommandées (6.5–8.5). La température de l'eau reste relativement stable, comprise entre 17.8 et 18.4 °C, avec une moyenne de 18.14 °C, ce qui reflète une stabilité thermique caractéristique des eaux profondes peu soumises aux variations climatiques superficielles.

La salinité (Sal) présente une moyenne de 0.96, légèrement inférieure au seuil critique de 1, bien que certaines valeurs (jusqu'à 1.1) s'en rapprochent. La turbidité (Tur) varie faiblement, avec une moyenne de 0.225 NTU, bien en dessous de la norme de 5 NTU, indiquant une faible présence de matières en suspension.

La conductivité électrique (CE) varie entre 1760 et 2528 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 2150.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bien que ces valeurs restent en deçà de la norme OMS (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), elles dépassent la norme algérienne (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), traduisant une forte minéralisation. De même, les TDS (solides dissous totaux) affichent une moyenne de 1106.8 mg/l, légèrement supérieure au seuil recommandé (1000 mg/l), ce qui confirme cette minéralisation.

Parmi les cations majeurs, le calcium (Ca^{2+}) prédomine avec une moyenne de 168.51 mg/l, dépassant largement la norme algérienne (75 mg/l) mais restant dans la limite OMS (200 mg/l). Le magnésium (Mg^{2+}) affiche une moyenne de 57.15 mg/l, conforme aux normes en vigueur. La dureté totale (TH) atteint en moyenne 715.2 mg/l, excédant la limite recommandée de 500 mg/l, ce qui confirme une eau très dure. Le sodium (Na^{+}) présente une moyenne élevée de 190.24 mg/l, dépassant largement la norme algérienne (60 mg/l), tandis que le potassium (K^{+}) reste faible, avec une moyenne de 11.26 mg/l.

Concernant les anions, les concentrations en chlorures (Cl^{-}) dépassent la norme OMS (250 mg/l), avec une moyenne de 318.51 mg/l. Le sulfate (SO_4^{2-}) est également très présent, avec une moyenne de 495.42 mg/l, soit presque le double de la norme recommandée, ce qui pourrait indiquer une origine évaporitique ou une pollution d'origine anthropique. Le TAC (titre alcalimétrique complet) présente

une valeur moyenne de 180.07 mg/l, supérieure au seuil de 100 mg/l, témoignant d'une bonne capacité tampon de l'eau.

Enfin, le fer ferreux (Fe^{2+}) affiche une concentration moyenne de 0.067 mg/l, nettement inférieure à la limite de 0.3 mg/l fixée par les normes.

Les coefficients de variation indiquent que Fe^{2+} (47.76 %) et Turbidité (9.82 %) présentent des variations relativement importantes entre les échantillons, ce qui pourrait refléter des différences locales marquées dans la composition du sol ou des conditions d'oxydoréduction. La CE, Sal, TH et Na^+ présentent des coefficients de variation modérément faibles (14.35 %, 15.83 %, 23.14 %, 15.84 % respectivement), traduisant une distribution relativement homogène dans la zone.

Enfin, les paramètres tels que le pH, la température, les TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et le TAC présentent des coefficients de variation plus faibles (<10 %), indiquant une faible variabilité spatiale. Cette homogénéité peut être liée à l'influence de formations géologiques équivalentes dans la région, assurant une signature géochimique relativement uniforme.

Tableau III.2 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Zelfana

Variable	Norme OMS 2011	Norme algérienne (2011)	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV(%)
pH	6.5 – 9	6.5 – 8.5	7	7.5	7.28	0.217	2.98
CE	2800	1500	1760.0	2528.0	2150.8	308.67	14.35
T	-	-	17.8	18.4	18.14	0.28	1.54
Sal	< 1	< 1	0.8	1.1	0.96	0.152	15.83
TDS	1000	1000	989.00	1220.0	1106.8	101.10	9.13
Tur	5	5	0.191	0.250	0.225	0.022	9.82
Ca^{2+}	200	75	145.08	185.38	168.51	16.01	9.50
Mg^{2+}	150	100	46.66	61.24	57.154	5.968	10.44
TH	500	500	592	1000	715.2	165.49	23.14
Na^+	200	60	162.5	228.57	190.24	30.141	15.84
K^+	12	20	10.9	11.81	11.26	0.498	4.42
Cl^-	250	250	283.62	371.55	318.51	38.66	12.14
SO_4^{2-}	250	250	424.6	548	495.42	49.29	9.95
TAC	> 100	> 100	168.36	185.44	180.07	6.77	3.76
Fe^{2+}	0.3	0.3	0.014	0.097	0.067	0.032	47.76

La figure III.1 montre la répartition des concentrations moyennes des principaux paramètres physico-chimiques dans les cinq forages de la région de Zelfana. On observe que les ions sulfates (SO_4^{2-}), chlorures (Cl^-), calcium (Ca^{2+}) et sodium (Na^+) sont présents en fortes concentrations, ce qui indique une minéralisation avancée des eaux souterraines. Le sulfate domine largement les anions, tandis que le calcium est le cation majoritaire. La conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS) et la dureté totale (TH) sont également élevés, traduisant une eau fortement chargée en minéraux. Le pH reste stable et légèrement alcalin, tandis que la salinité approche parfois le seuil critique. Le fer (Fe^{2+}) et le potassium (K^+) présentent de faibles concentrations mais une certaine variation selon les forages. Ces résultats confirment une qualité d'eau minéralisée, influencée probablement par la nature géologique du réservoir et des apports évaporitiques. Une attention particulière devrait être portée à certains éléments dépassant les normes, notamment les sulfates, chlorures et la dureté, surtout pour un usage domestique ou agricole.

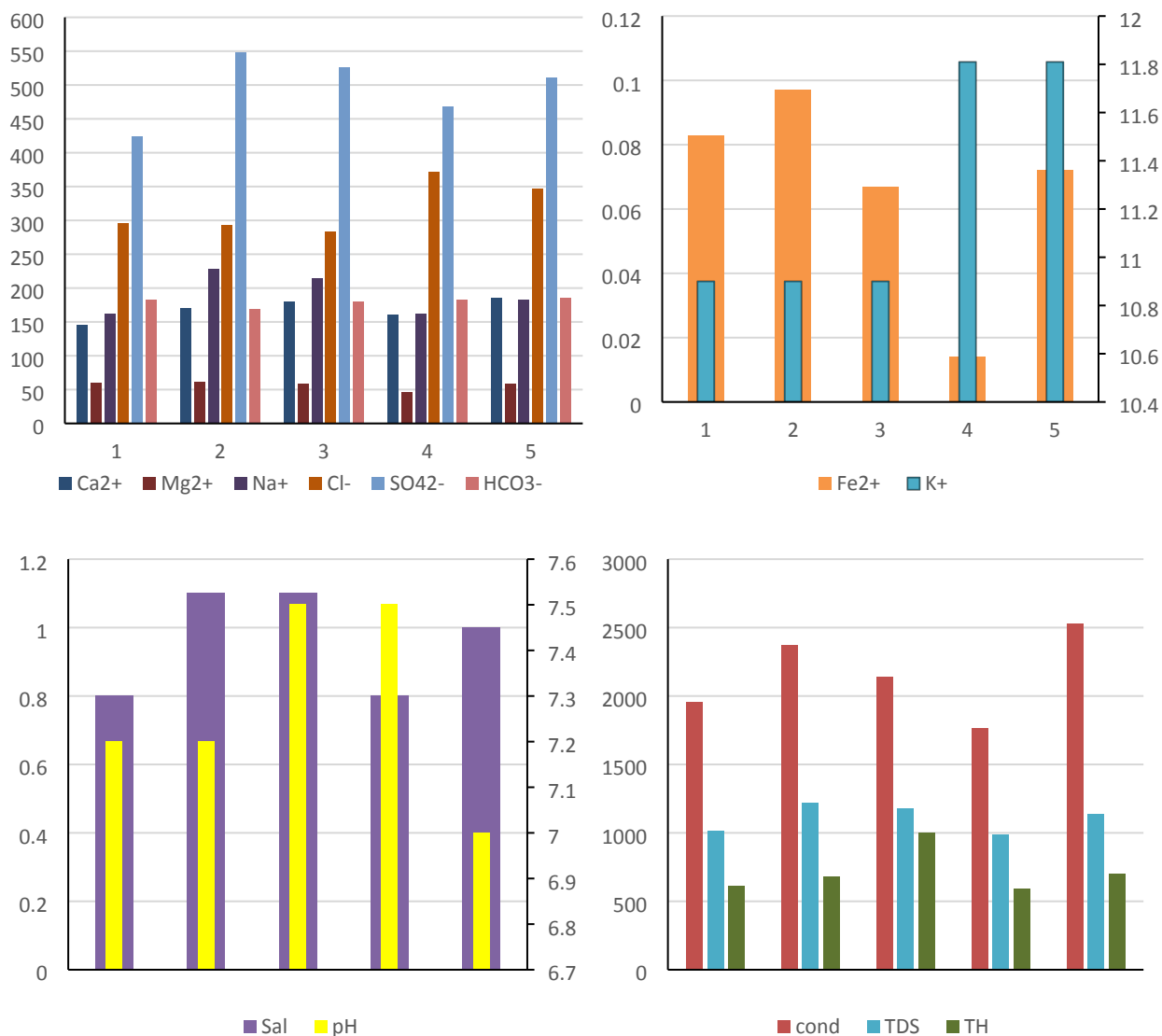


Figure III.1. Répartition des concentrations moyennes des paramètres dans les forages de la région de Zelfana

III.5. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques

Le coefficient de corrélation (R) permet d'analyser les relations linéaires entre deux variables. Il varie de -1 (corrélation négative parfaite) à +1 (corrélation positive parfaite), et une valeur proche de 0 indique une absence de lien linéaire. La matrice de corrélation des variables physico-chimiques est présentée dans le tableau III.3.

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

Selon cette matrice de corrélation, plusieurs relations remarquables entre les variables physico-chimiques des eaux souterraines de Zelfana peuvent être observées :

- Ca^{2+} et Mg^{2+} présentent une corrélation faible ($R = 0,15$), ce qui contredit une origine géologique strictement commune. Ce faible lien peut indiquer des sources géochimiques distinctes (calcite vs dolomie) ou des mécanismes de mobilisation différenciés dans l'aquifère.
- Na^+ est très fortement corrélé à TDS ($R = 0,96$), SO_4^{2-} ($R = 0,90$), et salinité ($R = 0,95$). Cela confirme que ces ions sont majeurs dans la salinisation, probablement d'origine évaporitique (halite, gypse).
- Le couple K^+ / Cl^- montre une corrélation exceptionnellement forte ($R = 0,97$), ce qui pourrait refléter une concentration par évaporation, ou bien une source anthropique, notamment les engrais potassiques.
- TDS est fortement corrélé à Sal ($R = 0,98$), SO_4^{2-} ($R = 0,92$), et Na^+ ($R = 0,96$), ce qui indique que la salinité globale est bien représentée par la charge ionique en sels dissous majeurs.
- Fe^{2+} est très fortement corrélé à Mg^{2+} ($R = 0,97$) et Turbidité ($R = 0,91$), ce qui suggère un comportement commun, possiblement lié à des colloïdes ou matières en suspension dans des contextes de sol lessivé ou mal filtré.
- Le pH est positivement corrélé à la température ($R = 0,84$), ce qui est physiquement cohérent : une eau plus chaude retient moins de CO_2 dissous, d'où une élévation du pH.
- Le pH est modérément à fortement négativement corrélé à Fe^{2+} ($R = -0,61$), en accord avec les équilibres redox : à pH élevé, Fe^{2+} précipite sous forme d'hydroxyde de fer.
- La turbidité est positivement corrélée à Mg^{2+} ($R = 0,91$) et Fe^{2+} ($R = 0,91$), ce qui pourrait traduire la présence de minéraux argileux ou particules métalliques en suspension.

On note des corrélations négatives modérées entre Na^+ et HCO_3^- ($R = -0.78$) Cl^- ($R = -0.61$) K^+ ($R = -0.52$) Cela suggère des échanges ioniques inverses où Na^+ pourrait remplacer d'autres cations sur les complexes argileux.

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

Variables	pH	CE	T	Sal	TDS	Tur	Ca^{2+}	Mg^{2+}	TH	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe^{2+}
pH	1.00														
CE	-0.73	1.00													
T	0.84	-0.34	1.00												
Sal	-0.11	0.74	0.28	1.00											
TDS	-0.23	0.79	0.17	0.98	1.00										
Tur	-0.45	0.33	-0.60	0.24	0.34	1.00									
Ca^{2+}	-0.15	0.72	0.29	0.78	0.71	-0.26	1.00								
Mg^{2+}	-0.53	0.65	-0.49	0.58	0.66	0.91	0.15	1.00							
TH	0.36	0.25	0.43	0.70	0.59	0.12	0.60	0.35	1.00						
Na^+	0.01	0.59	0.37	0.95	0.96	0.30	0.57	0.56	0.59	1.00					
K^+	-0.13	-0.02	0.03	-0.36	-0.40	-0.81	0.27	-0.71	-0.38	-0.52	1.00				
Cl^-	-0.01	-0.22	0.09	-0.52	-0.55	-0.84	0.06	-0.83	-0.53	-0.61	0.97	1.00			
SO_4^{2-}	-0.06	0.69	0.44	0.94	0.92	-0.05	0.82	0.31	0.53	0.90	-0.11	-0.24	1.00		
HCO_3^-	-0.01	-0.27	-0.28	-0.56	-0.64	-0.32	-0.05	-0.38	-0.04	-0.78	0.56	0.50	-0.60	1.00	
Fe^{2+}	-0.61	0.67	-0.53	0.54	0.65	0.91	0.08	0.97	0.17	0.56	-0.68	-0.77	0.32	-0.51	1.00

III.6. Analyse multivariée des paramètres physico-chimique

Dans le but de mieux caractériser les eaux souterraines de l'aquifère de Zelfana, une analyse multivariée a été réalisée à partir des données physico-chimiques collectées au niveau de plusieurs forages de la région. Cette approche repose sur l'utilisation de deux méthodes statistiques complémentaires : la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP), mises en œuvre à l'aide du logiciel XLSTAT.

Le tableau de données utilisé regroupe 15 paramètres hydrochimiques essentiels à la compréhension des processus de minéralisation : pH, température, conductivité électrique (CE), solubilité, TDS, turbidité, calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), dureté totale (TH), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), titre alcalimétrique complet (TAC) et fer (Fe). Parmi ces paramètres, la salinité, représentée par la CE et le TDS, joue un rôle majeur dans la différenciation des groupes d'eau et dans l'interprétation des axes factoriels.

L'application de ces outils multivariés permet de réduire la complexité du jeu de données en identifiant les groupes homogènes d'échantillons et les facteurs dominants de variabilité chimique. Elle offre ainsi une lecture intégrée des influences naturelles (géologiques) et anthropiques (pollution diffuse) dans le fonctionnement de l'aquifère multicouche de la région de Zelfana.

III.6.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

Dans cette étude, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été appliquée aux données hydrochimiques issues de cinq forages de la région de Zelfana. Les données ont d'abord été transformées logarithmiquement puis standardisées à l'aide de l'algorithme *StandardScaler* de la bibliothèque Python Scikit-Learn, permettant d'uniformiser les échelles des paramètres (moyenne = 0, écart-type = 1), selon la méthodologie de Güler et al. (2002). Cette approche facilite le regroupement des échantillons en fonction de leur similarité hydrochimique, sans nécessiter une connaissance préalable du nombre de groupes (Rahbar et al, 2020).

L'analyse a permis d'identifier trois clusters distincts, déterminés à partir de la distance euclidienne et illustrés sur le dendrogramme de la Figure III.2. Le seuil de dis-similarité a été fixé à 1×10^5 , conformément au critère de Sneath (1973).

- Le cluster C1, regroupant les forages F1 et F4, présente une minéralisation faible. Elle regroupe le pH et T ; peut-être indiqué l'effet des eaux chaude cette regroupement est confirmée par la fort corrélation entre pH et T dans le tableau III.3
- Le cluster C2, formé des forages F2 et F5, est le groupe le plus minéralisé se comprend la majorité des ions elle distingue par une conductivité très élevée (2370 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les concentrations en Ca^{2+} (145.08 mg/L), Mg^{2+} (608 mg/L) et Cl^- (296.39 mg/L) reflètent une influence évaporitique, typique des zones de transition entre les zones de recharge et de stagnation. L'eau est de type $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$.
- Le cluster C3, composé uniquement du forage F3, présente une minéralisation plus marquée par les ions de Cl^- , K^+ et HCO_3^- , indiquent une interaction importante avec les formations carbonatées et la dissolution des halites ou peut être influence anthropique ou agricole

Ainsi, la CAH permet de discriminer efficacement les zones aux comportements hydrochimiques contrastés au sein de l'aquifère multicouche de Zelfana. Ces résultats ouvrent la voie à des investigations complémentaires, notamment à travers une modélisation géochimique inverse pour approfondir la compréhension des mécanismes de minéralisation et des dynamiques de recharge.

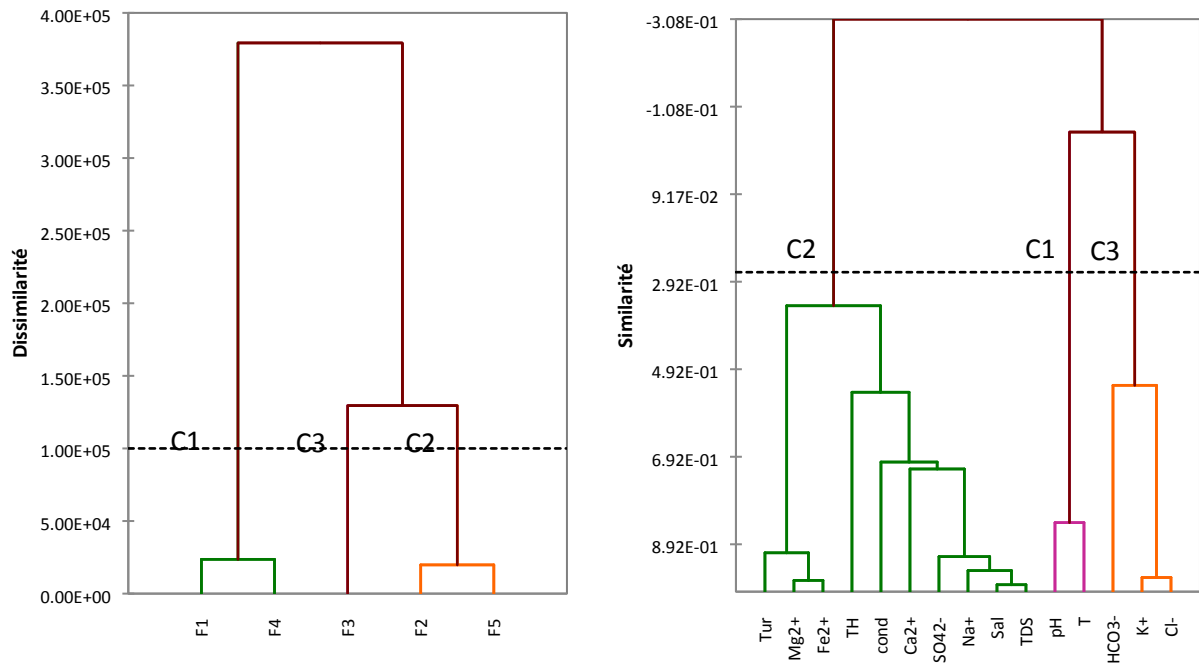


Figure III.2. Dendrogrammes de CAH avec Q-mode et R-mode pour les paramètres et les forages

III.6.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée aux données hydrochimiques recueillies dans la région de Zelfana, dans le but d'identifier les paramètres les plus influents dans la variabilité de la qualité des eaux souterraines. Cette méthode statistique permet de réduire la complexité des données en concentrant l'information d'un ensemble de variables initiales en un nombre restreint de facteurs synthétiques (CP1 à CP3), facilitant ainsi l'interprétation globale.

Les résultats montrent que les trois premiers facteurs cumulent 92.51 % de la variance totale des données, ce qui garantit une interprétation robuste des comportements hydrochimiques observés (Tableau III.5). Le critère de Kaiser (1960), qui recommande de ne retenir que les facteurs dont la valeur propre est supérieure à 1, justifie la sélection de ces trois composantes principales.

- CP1, représentant 50.13 % de la variance, est le facteur dominant. Il est fortement corrélé positivement avec le TDS, la salinité, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , TH, CE, Fe^{2+} et la turbidité. Ces relations indiquent une minéralisation naturelle intense, principalement issue de la dissolution des roches évaporitiques comme le gypse ou l'halite. Ce facteur regroupe les paramètres fortement impliqués dans la salinisation naturelle des eaux souterraines.
- CP2, expliquant 25.50 % de la variance, est fortement lié à la température T et le pH. Cette composante reflète l'influence l'effet thermique des profondeurs de captage.

- CP3, qui compte pour 16.89 % de la variance, est dominé par le K^+ , Cl^- et le HCO_3^- et le calcium (Ca^{2+} : -0.317). Ce facteur met en évidence l'impact de l'influence anthropique ou agricole et la formations carbonatées et la dissolution des halites

Des corrélations négatives significatives renforcent l'analyse. Ainsi, CP1 présente des corrélations inverses notables avec le potassium (K^+ : -0.229), les chlorures (Cl^- : -0.277) et le bicarbonate (HCO_3^- : -0.235), suggérant une dynamique géochimique différente pour ces ions. Sur CP2, Fe^{2+} (-0.280) et Mg^{2+} (-0.257) s'opposent aux processus de dissolution carbonatée, ce qui peut indiquer des variations de provenance ou de réactivité des masses d'eau. CP3, quant à lui, est influencé négativement par des paramètres tels que la turbidité (-0.447), le K^+ (-0.423) et le Cl^- (-0.328), reflétant leur faible lien avec les mécanismes d'alcalinisation.

Ainsi, cette ACP révèle trois axes géochimiques majeurs dans la région de Zelfana :

1. La minéralisation naturelle par dissolution d'évaporites,
2. L'influence des formations carbonatées,
3. Les interventions anthropiques potentielles et la réactivité alcaline.

L'analyse complète efficacement les résultats de la CAH en apportant une vision multidimensionnelle des facteurs contrôlant la qualité des eaux souterraines dans l'aquifère multicouche de Zelfana.

Paramètres	CP1	CP2	CP3
pH	-0.108	0.279	0.487
CE	0.273	0.003	-0.417
T	-0.009	0.444	0.303
Sal	0.332	0.206	-0.051
TDS	0.347	0.143	-0.076
Tur	0.223	-0.391	0.113
Ca^{2+}	0.184	0.336	-0.317
Mg^{2+}	0.309	-0.257	-0.018
TH	0.206	0.226	0.171
Na^+	0.331	0.179	0.089
K^+	-0.229	0.199	-0.423
Cl^-	-0.277	0.177	-0.328
SO_4^{2-}	0.276	0.308	-0.116
HCO_3^-	-0.235	-0.041	-0.191
Fe^{2+}	0.303	-0.280	-0.048
Valeur propre	7.519	3.824	2.534
Variabilité (%)	50.125	25.495	16.890
% cumulé	50.125	75.620	92.510

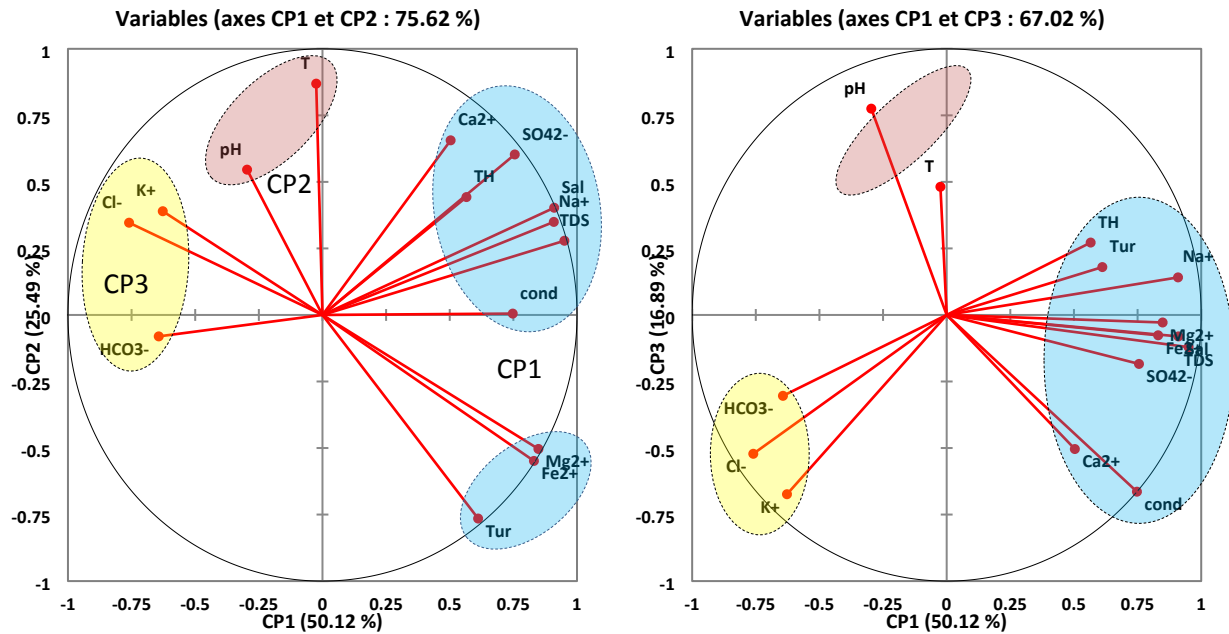


Figure III.3. Corrélation entre les paramètres et les composantes principales d'ACP

III.6.3. Relation entre CAH et ACP

L'application de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis d'organiser les eaux souterraines de la région de Zelfana en trois clusters distincts, chacun caractérisé par une signature hydrochimique particulière. Cette comparaison vise à évaluer la cohérence entre les regroupements statistiques issus de la CAH et les structures latentes révélées par l'ACP.

Les cercles de corrélation (Figure III.3), projetés sur les plans factoriels CP1–CP2 (75,62 % de la variance totale) et CP1–CP3 (67,02 %), montrent une bonne différenciation des paramètres chimiques. Les groupes de variables fortement corrélées sur CP1, CP2 et CP3 confirment les logiques de classification observées dans la CAH.

- Le cluster C2 (forages F1 et F4) est situé dans la zone positive de CP1, dominée par des paramètres fortement corrélés avec ce facteur : TDS, salinité, Na^+ , SO_4^{2-} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} et CE. Cela reflète une minéralisation naturelle intense due à la dissolution des formations évaporitiques comme le gypse dolomite l'anhydrite. Ces paramètres, rassemblés dans l'ellipse bleue sur les deux graphiques, structurent clairement la signature de ce cluster.
- Le cluster C1 (forages F2 et F5) présente une projection positive sur CP2, où l'on retrouve le pH, la température. Ces paramètres, visibles dans l'ellipse rouge du plan CP1–CP2 et

partiellement sur CP1–CP3, suggèrent une influence anthropique probable : apports en engrais, pollution diffuse, ou effets thermiques liés à la profondeur de captage.

- Le cluster C3 (forage F3) se positionne dans la zone négative de CP1 et positive sur CP3, en cohérence avec des variables corrélées à CP3 comme le pH, la température, mais aussi des contributions inverses de K^+ , Cl^- et HCO_3^- (regroupés dans l'ellipse jaune). Cela indique une minéralisation plus modérée, contrôlée par la dissolution des halites et l'influence anthropique probable.

L'axe CP1, expliquant 50,12 % de la variance, reste l'axe principal de séparation entre les niveaux de minéralisation. CP2 permet de distinguer les influences d'origine thermique ou anthropique, tandis que CP3 met en lumière les processus liés à l'alcalinité et aux interactions carbonatées.

Enfin, les proximités spatiales entre C2 et C3 dans le plan CP2–CP3 indiquent une certaine proximité géochimique, contrairement à C1, nettement séparé sur CP1. Cette configuration justifie les regroupements de la CAH et montre qu'un seuil de dissimilarité plus élevé aurait pu fusionner C2 et C3.

En conclusion, la correspondance entre CAH et ACP confirme la robustesse des analyses multivariées. Chaque facteur principal apporte une lecture géochimique cohérente :

- CP1 → minéralisation naturelle par les évaporites (C2),
- CP2 → influences anthropiques et thermiques (C1),
- CP3 → effets des formations carbonatées et mécanismes d'alcalinité (C3).

Cette synergie entre méthodes renforce la compréhension des processus de minéralisation dans l'aquifère multicouche de Zelfana et permet d'envisager des stratégies de gestion adaptées aux spécificités géochimiques locales. Sur la base de variance cumuler Le cumule de 1.2.3 dépasse 75% est suffisant pour couvrir et définir notre échantillon

III.7. Impact de la surexploitation de l'aquifère sur la qualité de l'eau

L'aquifère de la région de Zelfana, intégré au système profond du Continental Intercalaire, constitue la principale ressource en eau utilisée pour les besoins domestiques, agricoles et industriels. Toutefois, dans un contexte saharien marqué par une recharge naturelle quasi inexistante, la pression croissante exercée par les prélèvements non contrôlés entraîne une série de dégradations hydrochimiques notables.

- a) Abaissement piézométrique et concentration des solutés

La surexploitation provoque un abaissement du niveau piézométrique, limitant les échanges naturels avec les zones de recharge éventuelles. Cette diminution du volume d'eau favorise une augmentation relative des concentrations en éléments dissous, notamment le TDS et la CE, amplifiant ainsi la salinité de l'eau souterraine (Foster & Chilton, 2003).

b) Intrusion d'eaux plus profondes

La diminution de la pression dans les couches supérieures peut entraîner une remontée d'eaux plus profondes, souvent plus anciennes et fortement minéralisées, riches en chlorures, sulfates, sodium et magnésium. Ce phénomène aggrave la détérioration chimique de l'aquifère exploité, notamment dans les forages profonds comme Guifla n°2, où des teneurs élevées en SO_4^{2-} et Mg^{2+} ont été relevées (Baba, 2008).

c) Altération des équilibres géochimiques

La perturbation des conditions naturelles d'écoulement peut modifier les processus de dissolution/précipitation des minéraux. Ceci peut provoquer Une augmentation des ions Fe^{2+} ou Mn^{2+} en milieu réducteur, Une modification de l'alcalinité (TAC),

Des eaux présentant un caractère corrosif ou entartrant selon l'indice de saturation (Custodio & Llamas, 2001).

d) Corrélation entre surexploitation et groupes chimiques (CAH/ACP)

Les résultats des analyses multivariées montrent une correspondance significative entre les niveaux de minéralisation et les conditions d'exploitation. Par exemple le cluster C1 (Guifla n°2), fortement minéralisé, est isolé sur l'axe CP1 (ACP) lié aux sulfates, fer et dureté. Tandis que les clusters C2 et C3, moins sollicités ou mieux situés hydrogéologiquement, affichent une qualité chimique plus modérée (Edmunds & Gaye, 1994).

e) Nécessité d'une gestion intégrée

Les conséquences à long terme de la surexploitation rendent indispensable la mise en œuvre d'une gestion rationnelle des ressources en eau souterraine, incluant :

Le suivi piézométrique régulier,

Le contrôle des forages illicites,

L'optimisation des pratiques agricoles (ex. irrigation goutte-à-goutte),

Et une politique de sensibilisation locale visant à préserver la durabilité de l'aquifère.

III.8. Conclusions

L'analyse hydrochimique des eaux souterraines de la région de Zelfana met en évidence une minéralisation élevée, d'origine majoritairement naturelle, influencée par la dissolution des formations évaporitiques (gypse, halite) et par les processus d'évaporation intense typiques des milieux arides. Les différents diagrammes (Piper, Chadha, Gibbs) confirment la prédominance des faciès chlorurés et sulfatés, caractéristiques d'une géochimie dominée par les apports évaporitiques.

L'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux révèle une forte hétérogénéité spatiale. Certains paramètres tels que le pH, la température, ou encore Mg^{2+} et Fe^{2+} , restent dans les limites des normes internationales. En revanche, d'autres, comme la turbidité, les sulfates, les chlorures et le sodium, dépassent nettement les seuils recommandés, reflétant une dégradation de la qualité, possiblement liée à des intrusions anthropiques ou à des conditions géologiques locales défavorables. La turbidité anormalement élevée constitue un indicateur visuel de pollution ou de déséquilibre du milieu aquifère.

L'application des méthodes statistiques multivariées (CAH et ACP), couplée à une analyse descriptive approfondie, a permis de clarifier les mécanismes géochimiques à l'origine de cette variabilité. Trois groupes d'eaux distincts ont été identifiés :

- Un groupe marqué par une forte minéralisation évaporitique (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}),
- Un second influencé par la dissolution de roches carbonatées (Ca^{2+} , HCO_3^-),
- Et un troisième présentant une empreinte anthropique possible (turbidité, K^+ , NO_3^-).

L'axe CP1 de l'ACP (50,13 % de la variance totale) regroupe les ions responsables de la salinité naturelle (SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+}), tandis que CP2 et CP3 révèlent l'impact de l'activité humaine, des conditions thermiques et de la dissolution carbonatée. La concordance entre les résultats de la CAH et ceux de l'ACP valide la cohérence structurelle des données et conforte l'interprétation géochimique des eaux.

Par ailleurs, l'étude met en lumière les effets de la surexploitation sur la qualité de l'eau souterraine. Une augmentation du TDS, de la conductivité électrique (CE), et des concentrations en ions dissous a été observée dans plusieurs forages, traduisant une pression croissante sur l'aquifère et une modification progressive de ses équilibres géochimiques. Cette situation augmente les risques de salinisation irréversible, en particulier dans les zones à faible renouvellement ou dans les forages profonds isolés.

En conclusion, ces résultats soulignent l'urgence d'une gestion durable et intégrée des ressources en eau souterraine dans la région de Zelfana, incluant :

- Un suivi régulier de la qualité hydrochimique,
- La régulation des prélèvements agricoles et domestiques,
- L'utilisation de techniques de recharge maîtrisée ou de réutilisation des eaux,
- Et la sensibilisation des acteurs locaux à la fragilité de la nappe.

Chapitre IV : hydrochimie et origine de minéralisation des eaux souterraines

IV.1. Introduction

L'analyse hydrochimique des eaux souterraines constitue un outil fondamental pour comprendre les processus hydrogéochimiques qui régissent la qualité de l'eau. Ces processus incluent l'interaction eau-roche, la dissolution des minéraux, l'évaporation, ou encore les apports anthropiques. Ce chapitre vise à interpréter les caractéristiques hydrochimiques des échantillons d'eau souterraine de la région d'étude à travers plusieurs diagrammes et analyses afin de déterminer l'origine de leur minéralisation.

IV.2. Les faciès hydrochimiques des eaux souterraines

Les faciès hydrochimiques décrivent la composition ionique dominante des eaux. Ils permettent de regrouper les échantillons selon leur typologie chimique. Les cations et anions majeurs pris en compte sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^- . L'identification de ces faciès est essentielle pour retracer l'évolution géochimique des eaux et leurs interactions avec le milieu traversé (Hem, 1985).

IV.2.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est un outil graphique essentiel pour classifier les eaux souterraines en fonction de leurs principaux ions dissous (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}), et pour identifier les processus géochimiques dominants (Fetter, 2018). Il permet notamment de distinguer les faciès chimiques et d'identifier les influences géologiques, climatiques ou anthropiques (Dalton et al, 1978).

La figure ci-dessous illustre les résultats de l'analyse hydrochimique des cinq forages de la région de Zelfana : F1. Guifla n°02, F2. Elmoudjahidine, F3. Route El Guerrara, F4. Centre-ville n°04 et F5. Elmosalaha.

Tous les échantillons se situent dans le domaine des eaux chlorurées-sulfatées calco-magnésiennes (Cl^- – SO_4^{2-} – Ca^{2+} – Mg^{2+}), indiquant une forte minéralisation caractéristique des aquifères sahariens. Ce faciès est généralement lié à la dissolution de minéraux évaporitiques (gypse, halite). Une faible influence des carbonates, Et une dureté permanente attribuable à la dominance des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Ces observations confirment que les eaux souterraines de Zelfana sont principalement influencées par la dissolution des évaporites, la dissolution partielle de carbonates, et dans une moindre mesure, par l'altération des silicates (Deutsch, 2020). Cette homogénéité traduit également un système aquifère cohérent sur le plan géochimique, avec peu de contrastes entre les forages.

Enfin, les rapports ioniques moyens révèlent une nette domination : des cations alcalino-terreux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$), et des anions forts ($\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$), ce qui confirme une minéralisation naturelle élevée et un faible renouvellement des eaux, typique des contextes arides (Hounslow, 1995).

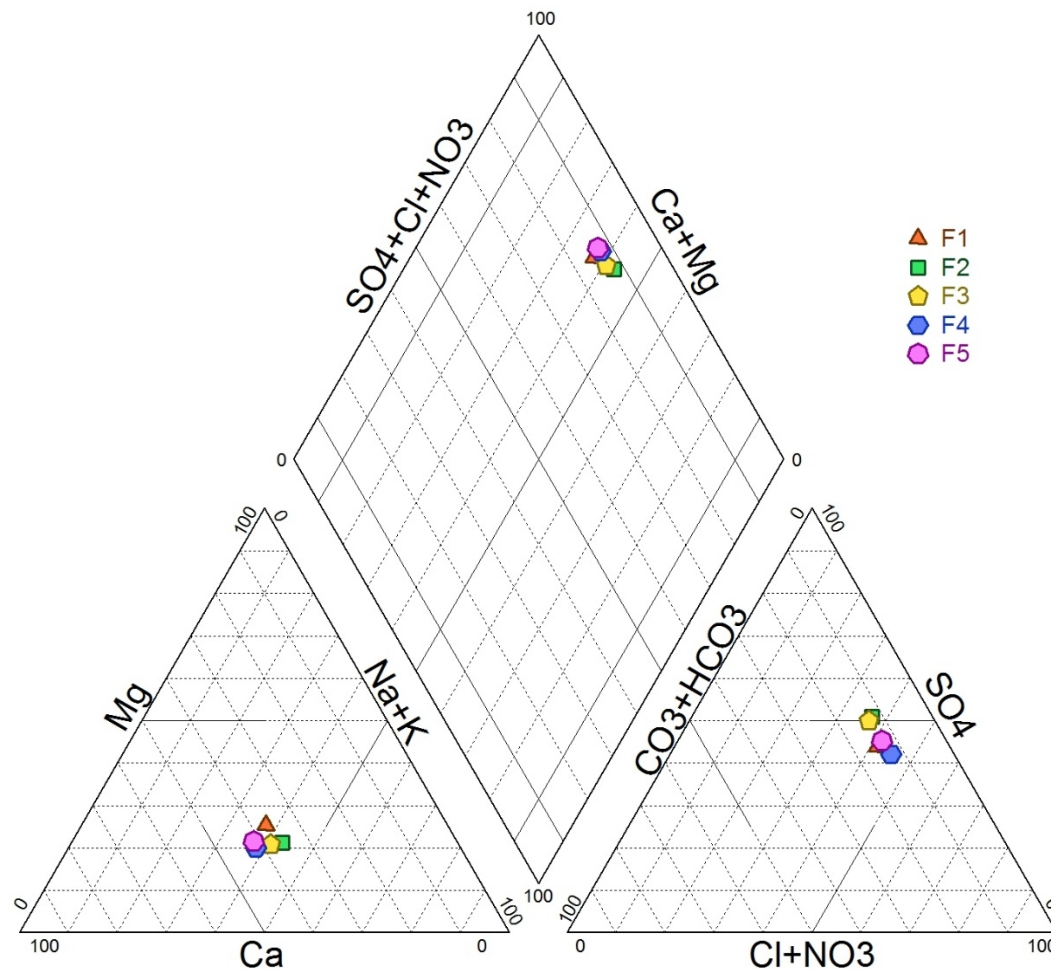


Figure IV.1. Diagramme de Piper illustre la classification des eaux souterraines

IV.2.2. Diagramme de Chadha

Le diagramme de Chadha (1999) est une variante simplifiée du diagramme de Piper. Il repose sur la transformation des valeurs ioniques exprimées en milliéquivalents par litre (meq/L) pour générer un graphique cartésien à deux axes X : $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ et Y : $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) - (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$

Ce diagramme permet de classer les eaux souterraines en huit types hydrochimiques selon la combinaison des cations et anions dominants, facilitant l'identification rapide des processus géochimiques tels que l'échange ionique, la lixiviation, ou l'influence évaporitique.

Analyse des résultats :

Les cinq forages analysés (F2 : Elmoudjahidine, F3 : Route El Guerrara, F4 : Centre-ville n°04, F5 : Elmosalaha, et F1 : Guifla n°02) sont tous localisés dans le quadrant inférieur droit du diagramme de Chadha. Cela indique que :

- Les cations dominants sont les alcalino-terreux ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$),
- Les anions dominants sont les anions forts ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$),
- La combinaison des deux types montre un faciès hydrochimique de type sulfate-chlorure de calcium-magnésium.

Ce type d'eau est typique des milieux arides, notamment dans des aquifères où la dissolution des évaporites (gypse, halite) joue un rôle majeur. L'absence d'échantillons dans les quadrants supérieurs confirme une faible influence des carbonates et bicarbonates dans la chimie des eaux de cette zone.

- Tous les forages indiquent une minéralisation avancée,
- La signature chimique est cohérente avec celle observée dans les diagrammes de Piper et de Gibbs,
- Le contrôle chimique est principalement d'origine géologique (roche) et évaporitique, avec peu ou pas de signal de dilution par des eaux de recharge récentes.

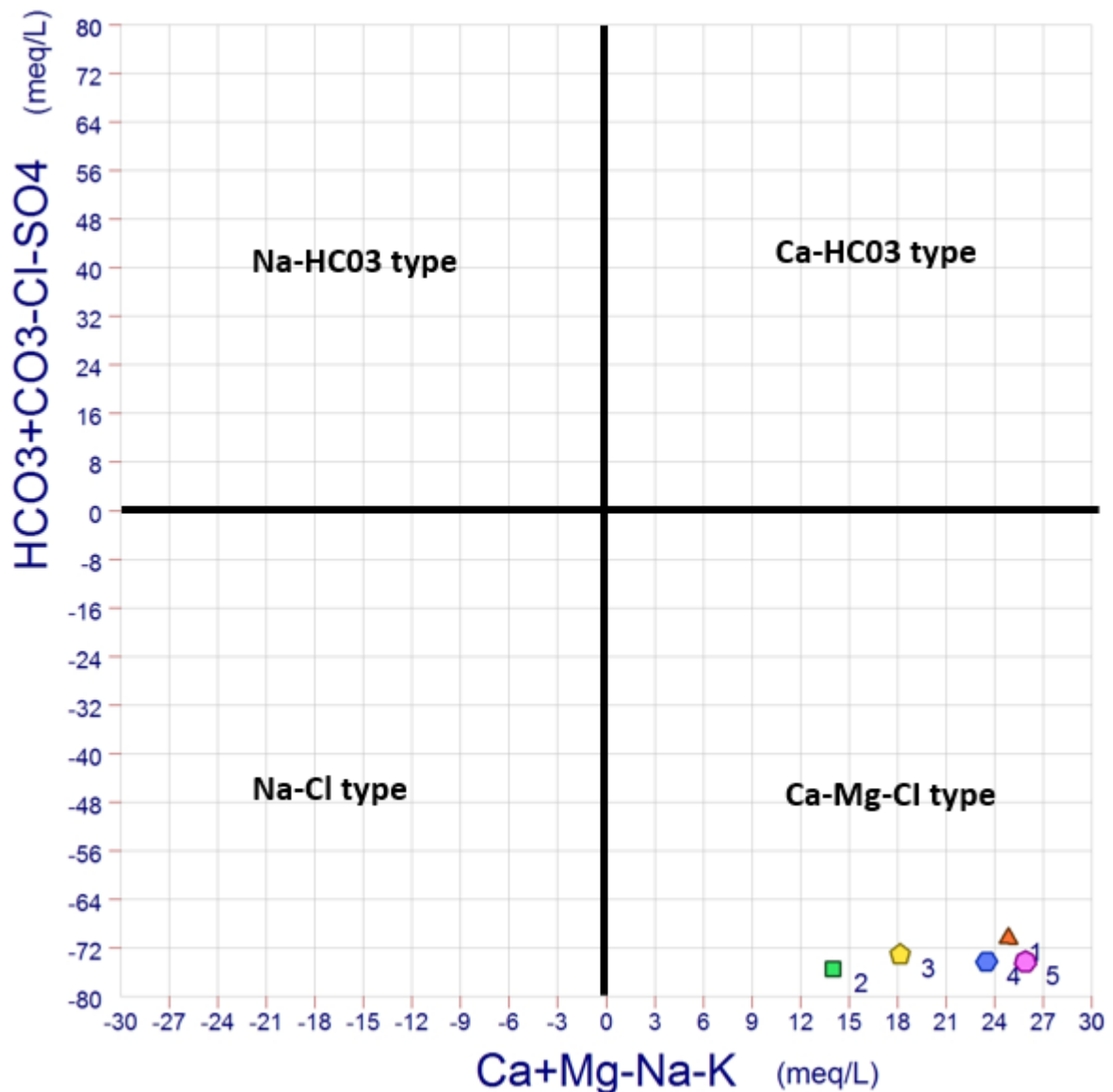


Figure IV.2. Diagramme de Chadha des échantillons de la région de Zelfana

IV.3. Processus hydrochimiques et origine de la minéralisation

Les concentrations des ions majeurs dans les eaux souterraines sont gouvernées par des interactions complexes liées aux mécanismes de dissolution, précipitation, et échanges ioniques. L'eau qui circule à travers les formations sédimentaires alluvionnaires de l'aquifère mixte (quaternaire et profond), constituées de sables, graviers, argiles et galets, subit des modifications chimiques importantes.

La Figure IV.3 illustre la relation entre la somme des anions sulfates et alcalins ($\text{SO}_4^{2-} + \text{TAC}$, exprimés en meq/L) et celle des cations divalents calcium et magnésium ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, également en

meq/L) pour cinq forages de la région de Zelfana. Le passage aux unités en meq/L permet une lecture plus précise des équilibres ioniques et une évaluation directe de la neutralité électrochimique.

Une corrélation croissante entre ces deux groupes d'ions est observée, en particulier entre les forages F2, F3 et F5, ce qui suggère une minéralisation importante influencée par des processus de dissolution. Cette tendance confirme une association géochimique significative, notamment via la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui libère à la fois Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans le milieu.

Les plus fortes concentrations en cations et anions sont enregistrées dans les forages F2, F3 et F5, traduisant un enrichissement en sels caractéristiques des formations évaporitiques. En revanche, le forage F1 se distingue par des valeurs plus faibles, traduisant une minéralisation modérée ou une dilution locale.

Le magnésium, bien qu'inclus dans la somme ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), montre une contribution généralement inférieure à celle du calcium, ce qui pourrait indiquer une origine secondaire liée à la dissolution de dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou à des échanges ioniques avec les argiles. Le forage F4, situé entre les deux extrêmes, suggère une zone de transition entre des secteurs à minéralisation faible et ceux à minéralisation forte.

Ainsi, cette représentation met en évidence le rôle majeur des interactions eau-roche, et en particulier celui de la dissolution des évaporites, dans le contrôle de la chimie des eaux souterraines de Zelfana. Elle appuie l'hypothèse d'un aquifère fortement conditionné par des processus géochimiques naturels dans un environnement aride.

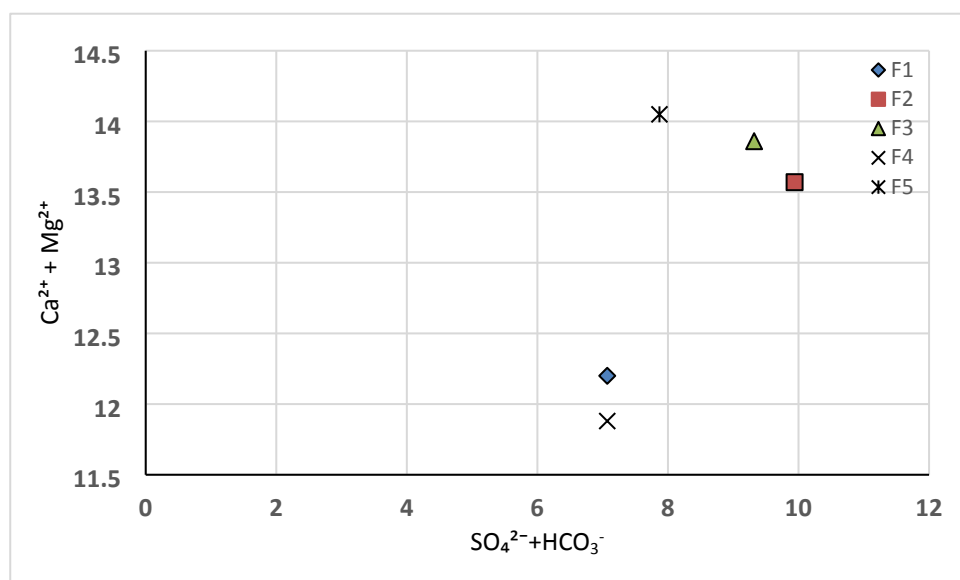


Figure IV.3. Relation entre $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ et $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (meq/L),

La figure IV.4 montre la corrélation entre la concentration en chlorure (Cl^-) et la somme des cations calcium et magnésium ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), exprimée en meq/L, pour les cinq forages étudiés. On observe

une tendance relativement dispersée, mais globalement croissante, indiquant que l'augmentation du chlorure peut être liée à une origine évaporitique, notamment la dissolution de l'halite (NaCl), ou à un mécanisme d'échange ionique. En effet, la présence simultanée de Cl^- et de cations divalents en quantité importante peut résulter de l'altération des minéraux évaporitiques et/ou du remplacement des ions Na^+ en solution par Ca^{2+} et Mg^{2+} sur les sites d'échange des argiles présentes dans l'aquifère. Ce type de processus est fréquent dans les aquifères situés en milieu aride ou semi-aride, comme celui de Zelfana, où les formations évaporitiques et les argiles jouent un rôle central dans la composition géochimique des eaux souterraines. Ainsi, la figure met en évidence l'influence conjointe des apports géogéniques salins et des processus d'échange ionique sur la minéralisation des eaux de la région.

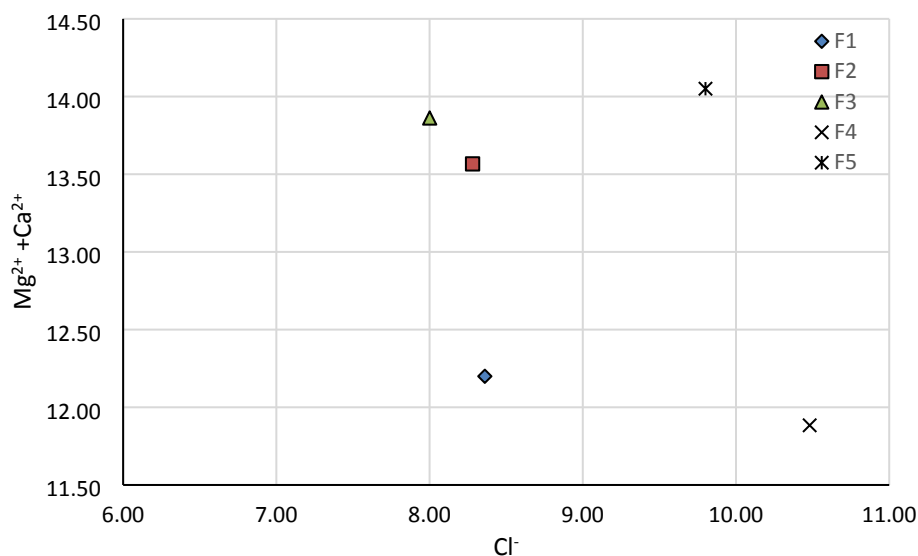


Figure IV.4. Corrélation entre Cl^- et $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ (meq/L).

La figure IV.5 illustre la relation entre la concentration en chlorures (Cl^-) et le rapport molaire $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$. Ce rapport est un indicateur utile pour évaluer les processus hydrogéochimiques responsables de la minéralisation, en particulier la contribution relative des cations divalents par rapport aux bicarbonates.

Dans cette figure, on observe que les forages F2, F3 et F5 présentent des valeurs élevées de chlorures, accompagnées d'un rapport $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ supérieur à 1. Cela traduit un excès de cations divalents par rapport aux bicarbonates, typique des eaux soumises à une forte influence évaporitique ou à des apports d'origine anthropique (par exemple, drainage ou lessivage de sels).

À l'inverse, les forages F4 et F5, bien qu'également riches en Cl^- , présentent des rapports plus modérés, suggérant soit une dilution partielle, soit une précipitation des carbonates réduisant la concentration en HCO_3^- dissous. Ce déséquilibre entre cations et anions faibles indique également que la minéralisation n'est pas uniquement contrôlée par les processus de dissolution des carbonates, mais

également par d'autres apports tels que les sels chlorurés issus de formations évaporitiques ou d'évapoconcentration.

L'ensemble des données met en lumière l'influence des chlorures dans le contrôle du régime ionique local, souvent associé à la salinité résiduelle des milieux arides, et souligne la complexité des interactions hydrochimiques dans l'aquifère de Zelfana.

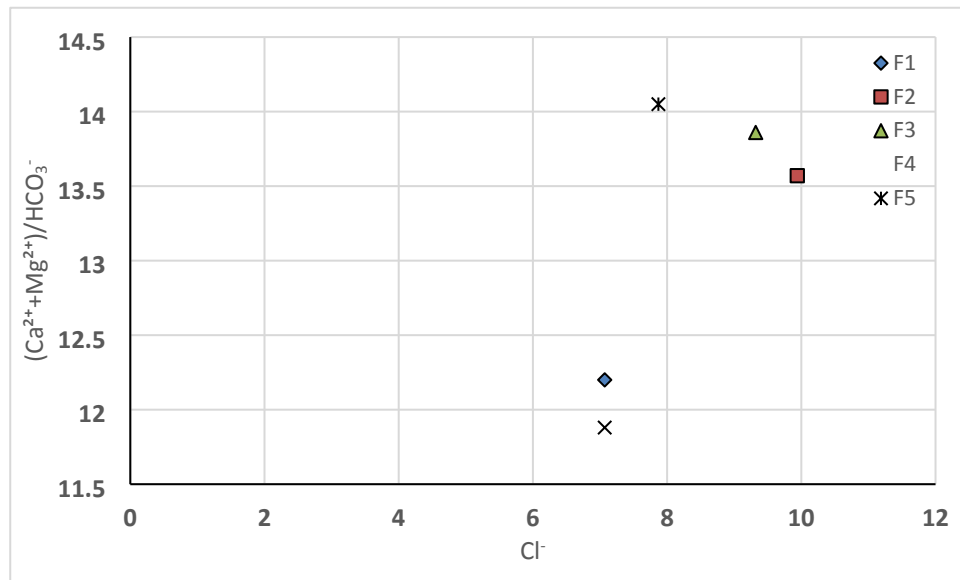


Figure IV.5 Rapport molaire $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/HCO_3^-$ en fonction de Cl^- (meq/L)

La figure IV.6 représente la distribution du rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} pour les cinq forages de la zone d'étude. Les valeurs obtenues varient de manière significative entre les sites, avec des rapports relativement faibles dans les forages F1 et F2 (inférieurs à 3), et plus élevés dans les forages F4 et F5 (proches ou supérieurs à 3,5). Un rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} proche de 1 indiquerait la dissolution de dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), tandis que des valeurs supérieures à 2 traduisent une contribution plus marquée de la calcite ($CaCO_3$) ou des silicates riches en calcium. Dans ce contexte, les valeurs élevées observées dans les forages F4 et F5 suggèrent soit la prédominance de la calcite dans les formations traversées, soit un mécanisme d'échange ionique dans lequel le calcium remplace le sodium sur les surfaces argileuses. Ces observations indiquent une hétérogénéité chimique entre les différents forages, probablement liée aux variations lithologiques locales et aux conditions hydrogéologiques, confirmant l'influence des processus de dissolution sélective et d'échange cationique sur la composition des eaux souterraines.

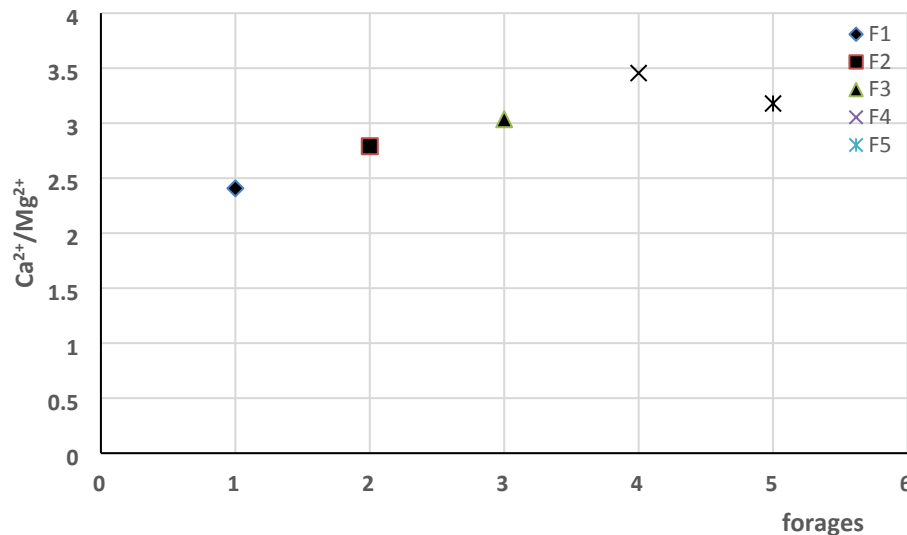


Figure IV.6. Distribution du rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} par les forages

La figure IV.7 illustrent différents rapports ioniques tracés en fonction de la conductivité électrique (CE), afin d'analyser les processus hydrochimiques et la minéralisation des eaux souterraines de la région de Zelfana :

(a) Les rapports Ca^{2+}/Mg^{2+} et SO_4^{2-}/Cl^{-} montrent que la majorité des échantillons possède un ratio Ca^{2+}/Mg^{2+} supérieur à 2, suggérant une prédominance de la calcite ou d'autres sources calciques telles que les silicates. Parallèlement, les rapports SO_4^{2-}/Cl^{-} confirment une prédominance des sulfates dans la composition chimique, témoignant d'une dissolution significative du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

(b) Le rapport Cl^{-}/Na^{+} révèle que plusieurs forages (notamment F4 et F5) présentent des valeurs supérieures à 1. Ceci peut résulter soit d'un apport évaporitique via la dissolution d'halite ($NaCl$), soit d'échanges ioniques où le sodium est substitué par du calcium ou du magnésium sur les sites actifs des argiles (Appelo & Postma, 2005), altérant ainsi l'équilibre ionique du système.

(c) L'évolution des concentrations de Cl^{-} , SO_4^{2-} et HCO_3^{-} en fonction de la CE montre une nette corrélation positive entre CE et les ions chlorure et sulfate, suggérant une augmentation de la salinité liée à la dissolution des minéraux évaporitiques (halite et gypse). En revanche, les bicarbonates restent relativement constants, ce qui pourrait indiquer une source carbonatée stable ou un tamponnement par les carbonates du sol.

(d) Le rapport $HCO_3^{-}/(SO_4^{2-} + Cl^{-})$ montre des valeurs faibles et relativement stables en fonction de la CE, ce qui traduit un appauvrissement relatif en bicarbonates par rapport aux anions évaporitiques. Cette tendance confirme la prédominance des processus d'évaporation et de dissolution des sels dans le contrôle de la minéralisation des eaux, au détriment des apports carbonatés.

Dans l'ensemble, ces quatre diagrammes révèlent que la salinité croissante dans la nappe est dominée par la dissolution des minéraux évaporitiques (gypse, halite), appuyée par des échanges ioniques complexes et une influence limitée des carbonates. Ces processus sont typiques des environnements arides et confirment le rôle majeur des formations géologiques locales dans la géochimie de l'aquifère.

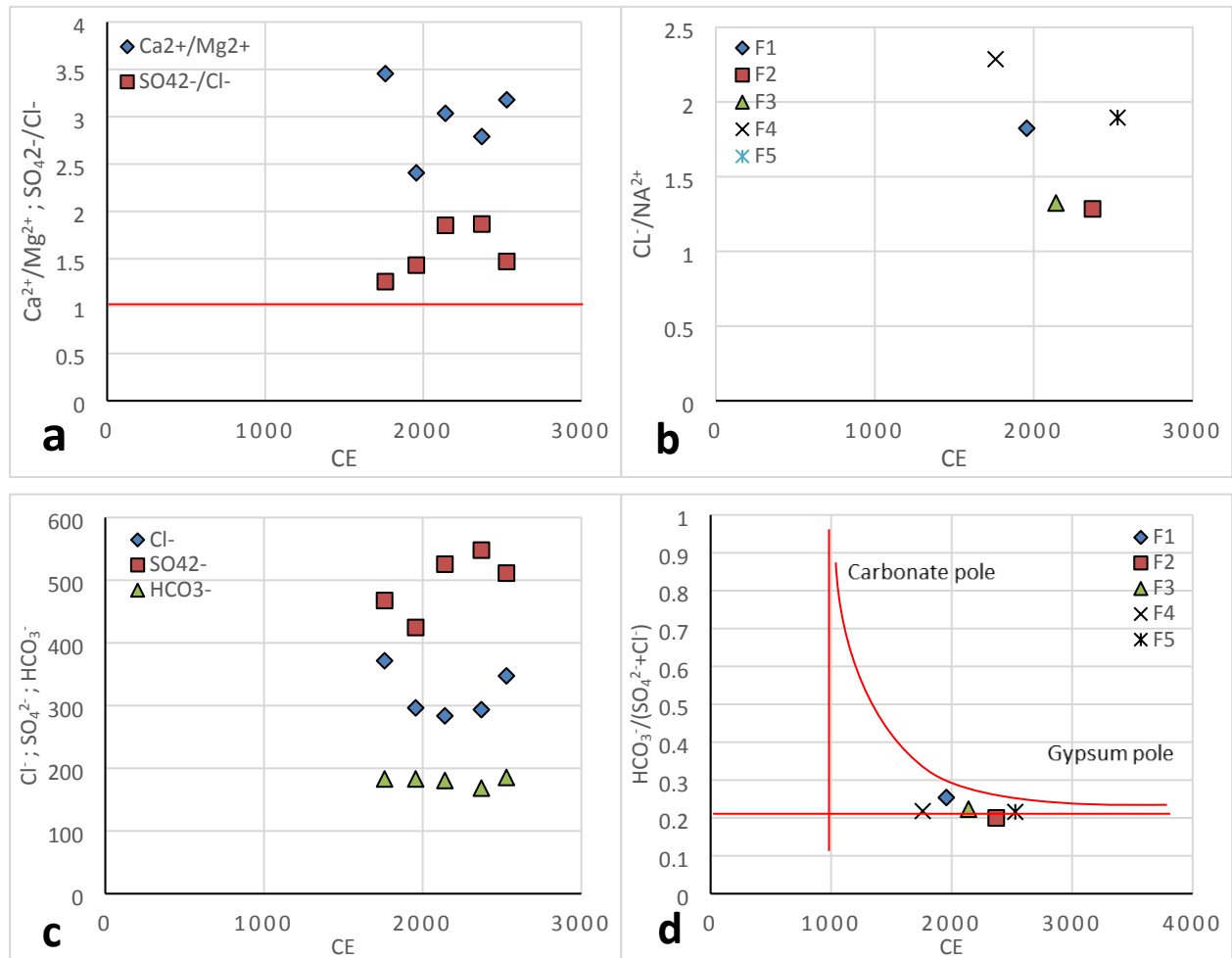


Figure IV.7. Diagrammes d'interprétation des rapports ioniques en fonction de la conductivité électrique (CE)

IV.4. Identification de l'interaction eau-roche

L'évaluation des processus géochimiques contrôlant la qualité des eaux souterraines repose sur l'analyse croisée de plusieurs diagrammes, en particulier le diagramme de Gibbs et des corrélations ioniques bilinéaires. Ces outils permettent de discerner les mécanismes d'altération minérale, de dissolution évaporitique et d'échange ionique intervenant dans l'aquifère de Zelfana.

Le diagramme de Gibbs (Gibbs, 1970) est un outil fondamental pour interpréter les processus géochimiques contrôlant la composition chimique des eaux souterraines. Il permet de distinguer trois mécanismes principaux : la dominance des précipitations, l'interaction eau-roche, et l'évaporation-

précipitation. Les variables utilisées sont les rapports $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ en fonction des solides dissous totaux (TDS).

La figure IV.8 montre que tous les échantillons issus des forages de Zelfana se répartissent exclusivement dans les zones de dominance de l'évaporation et des roches, avec des valeurs de TDS principalement comprises entre 100 et 1000 mg/L, et des rapports ioniques élevés :

Dans le graphique de gauche ($\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$), les points sont majoritairement situés entre 0,3 et 0,7, ce qui correspond à une zone de transition entre l'interaction eau-roche et la dominance évaporative.

Dans le graphique de droite ($\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$), la majorité des échantillons se situent nettement dans la zone d'évaporation, avec des valeurs avoisinant 0,8 à 1, indiquant une minéralisation élevée dominée par les anions évaporitiques (Cl^- , SO_4^{2-}).

Ces résultats confirment que la salinité élevée des eaux souterraines de Zelfana est principalement due à la dissolution des formations évaporitiques (notamment halite et gypse), une évaporation intense, amplifiée par le climat saharien, Et une interaction soutenue avec les roches du réservoir aquifère, notamment les formations sédimentaires riches en sels solubles.

Aucun des échantillons ne se situe dans la zone de dominance des précipitations, ce qui exclut un apport direct significatif en eau météorique récente, et indique que les eaux analysées sont anciennes et faiblement renouvelées. Cela confirme également que les ions n'ont pas encore atteint la saturation complète, traduisant une évolution progressive sous contrainte évaporative.

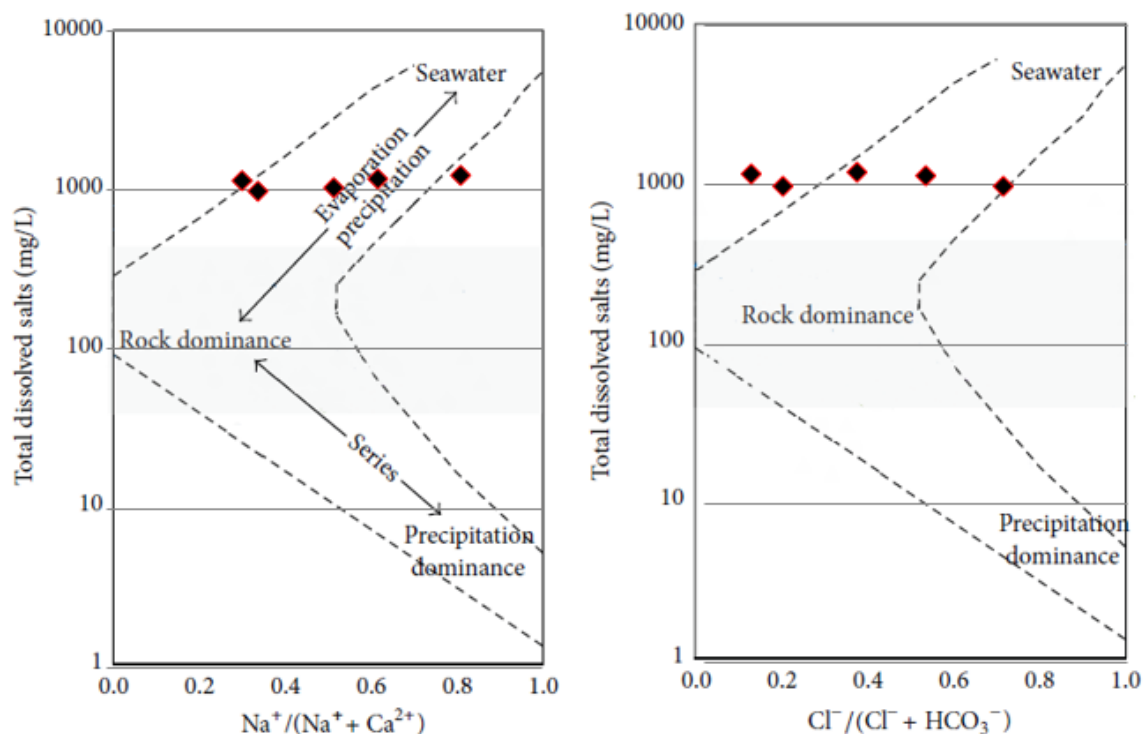


Figure IV.8. Diagrammes de Gibbs des échantillons de la région de Zelfana

Les figures IV.9a à IV.9d apportent un éclairage complémentaire sur les mécanismes géochimiques influençant la composition des eaux souterraines de la région de Zelfana, à travers des relations ioniques exprimées en meq/L.

- Figure IV.9a : Le graphique représentant Cl^- en fonction de SO_4^{2-} montre que l'ensemble des échantillons se situe au-dessus de la droite d'équilibre, ce qui invalide l'hypothèse d'une précipitation carbonatée et indique au contraire une contribution marquée de la dissolution de l'halite (NaCl). La forte concentration en Cl^- , sans équivalence proportionnelle en SO_4^{2-} , confirme ce processus évaporitique.
- Figure IV.9b : Le diagramme reliant $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ à $(\text{SO}_4^{2-} + \text{TAC})$ positionne tous les forages au-dessus de la ligne de dissolution. Cette configuration correspond à la zone d'altération des carbonates, traduisant une forte influence de roches comme la calcite ou la dolomite. L'éloignement relatif des points de la droite suggère que ces cations proviennent majoritairement de l'altération de formations carbonatées, avec une possible contribution silicatée dans certains cas.
- Figure IV.9c : Le graphique Cl^- vs Na^+ illustre une dominance nette du chlore par rapport au sodium. Tous les points se trouvent au-dessus de la droite de dissolution de l'halite, ce qui renforce l'idée que la dissolution du sel gemme (halite) est un mécanisme central dans la minéralisation. Ce déséquilibre peut aussi refléter des processus d'échange ionique affectant la concentration en Na^+ .
- Figure IV.9d : Le rapport entre $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ et Na^+ met en évidence que la majorité des échantillons se situent sous la droite d'équilibre, indiquant un échange ionique inverse. Ce processus se produit lorsque le sodium dissous remplace les cations divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}) initialement fixés sur les surfaces argileuses. Ce mécanisme est typique des temps de résidence prolongés et des milieux riches en minéraux argileux.

Ces résultats révèlent que la chimie des eaux souterraines de Zelfana est gouvernée par une superposition de processus géochimiques, incluant :

1. La dissolution évaporitique (notamment halite et gypse),
2. L'altération des minéraux carbonatés (et secondairement silicatés),
3. Les échanges ioniques, en particulier l'échange inverse entre Na^+ et $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$.

Cette combinaison est caractéristique d'un contexte aride, où les eaux interagissent longtemps avec les roches traversées, accumulant ainsi les signatures d'altérations multiples dans un aquifère fermé ou faiblement renouvelé.

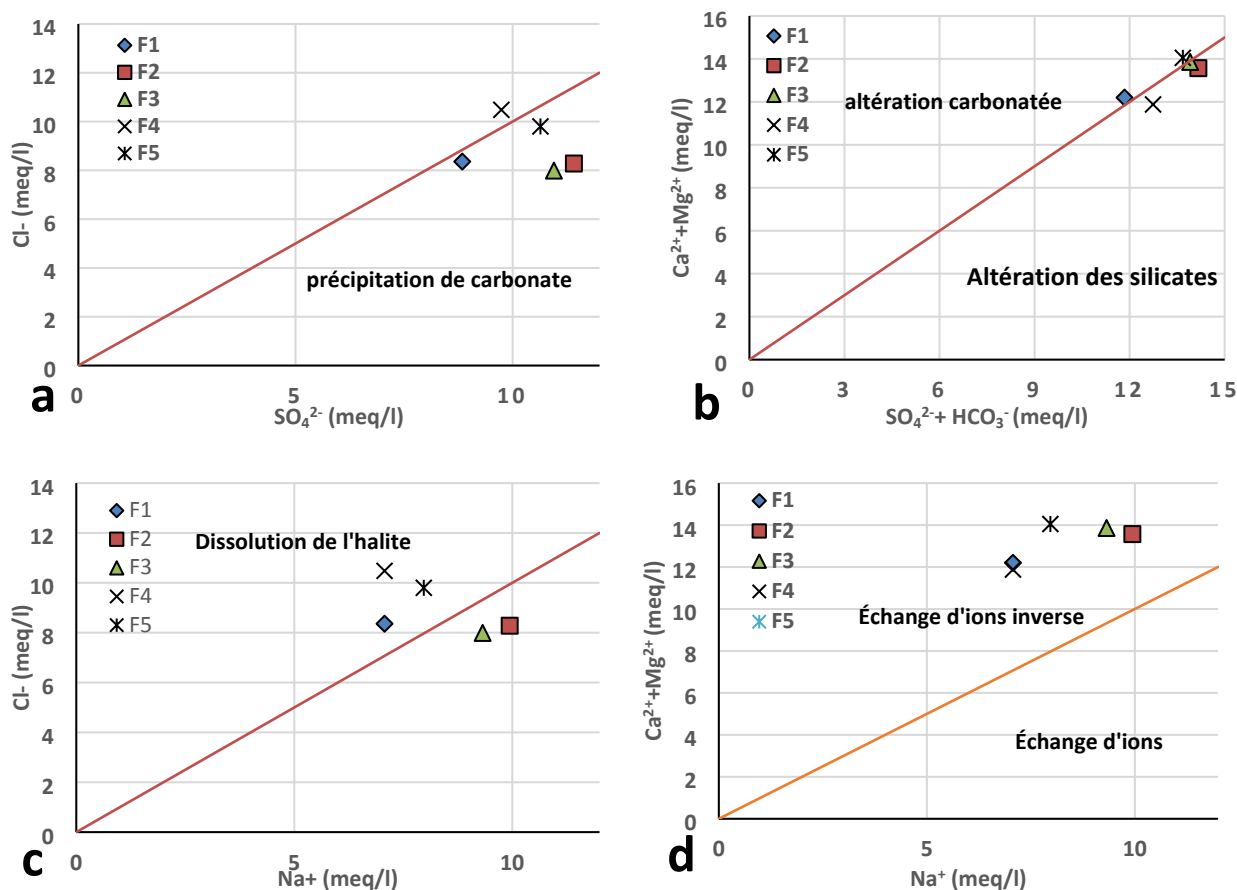


Figure IV.9. Graphes bivariés de a) SO₄²⁻ en fonction de Cl⁻ b) SO₄²⁻+HCO₃⁻ en fonction de Ca²⁺+Mg²⁺ c) Na⁺ en fonction de Cl⁻ d) Na⁺ en fonction de Ca²⁺+Mg²⁺

IV.5. Niveaux de saturation minérale

Les calculs thermodynamiques des indices de saturation (IS) des minéraux dans les eaux souterraines de la région de Zelfana sont présentés dans le tableau IV.1 et illustrés dans la figure IV.10. Ces indices permettent d'évaluer la tendance d'un minéral à se dissoudre (IS < 0), à être en équilibre (IS ≈ 0), ou à précipiter (IS > 0) selon les conditions physico-chimiques du milieu aquifère.

Les résultats montrent que les niveaux de saturation minérale sont globalement homogènes entre les cinq forages étudiés. Les minéraux carbonatés tels que l'aragonite, la calcite et surtout la dolomite présentent des indices largement positifs, respectivement de 2.29, 2.44 et 4.43 en moyenne. Cette sursaturation marquée indique une tendance à la précipitation, en lien avec des concentrations élevées

en Ca^{2+} , Mg^{2+} et CO_3^{2-} , et une probable perte de CO_2 dissous (IS moyen de -0.53), qui favorise le dégagement du carbone et la précipitation des carbonates.

Les minéraux sulfatés, tels que le gypse (IS ≈ 1.40) et l'anhydrite (IS ≈ 1.04), montrent une légère sursaturation, ce qui contraste avec les analyses antérieures où ils apparaissaient en dissolution. Cette évolution peut traduire une situation de quasi-équilibre ou une précipitation partielle, influencée par les conditions locales de saturation et de concentration en SO_4^{2-} et Ca^{2+} .

Les halogénures comme la halite (NaCl) et la sylbite (KCl) conservent des IS fortement négatifs (en moyenne -3.25 et -3.86 respectivement), confirmant une dissolution active et continue dans l'aquifère. Ces minéraux contribuent fortement à la charge saline, particulièrement en Na^+ et Cl^- , et traduisent la présence de formations évaporitiques dissoutes dans le réservoir.

En conclusion, les niveaux de saturation minérale révèlent que :

Les phases carbonatées sont sursaturées et tendent à précipiter dans le système ;

Les halogénures sont nettement sous-saturés, en phase de dissolution active ;

Les sulfates se situent près de l'équilibre, avec un comportement variable selon les forages.

Ces observations confirment que la composition chimique des eaux souterraines de Zelfana est largement gouvernée par les interactions eau-roche, notamment avec les formations évaporitiques et carbonatées, en lien avec les conditions hydrochimiques locales.

Tableau IV1. Description statistique des indices de saturation des minéraux

Phase	Minéral	Moyenne	Max	Min	Ecart-type
Anhydrite	CaSO_4	1.042	1.09	0.95	0.06
Aragonite	CaCO_3	2.294	2.53	2.07	0.21
Calcite	CaCO_3	2.444	2.68	2.22	0.21
$\text{CO}_2(\text{g})$	CO_2	-0.53	-0.24	-0.76	0.22
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	4.438	4.9	3.95	0.40
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.402	1.45	1.31	0.06
$\text{H}_2(\text{g})$	H_2	-22.6	-22.04	-23.04	0.43
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	H_2O	-1.694	-1.69	-1.7	0.01
Halite	NaCl	-3.246	-3.2	-3.33	0.05
Melanterite	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-4.71	-4.42	-5.34	0.36
$\text{O}_2(\text{g})$	O_2	-40.466	-39.49	-41.67	0.95
Siderite	FeCO_3	1.064	1.35	0.68	0.27
Sylbite	KCl	-3.862	-3.77	-3.93	0.07

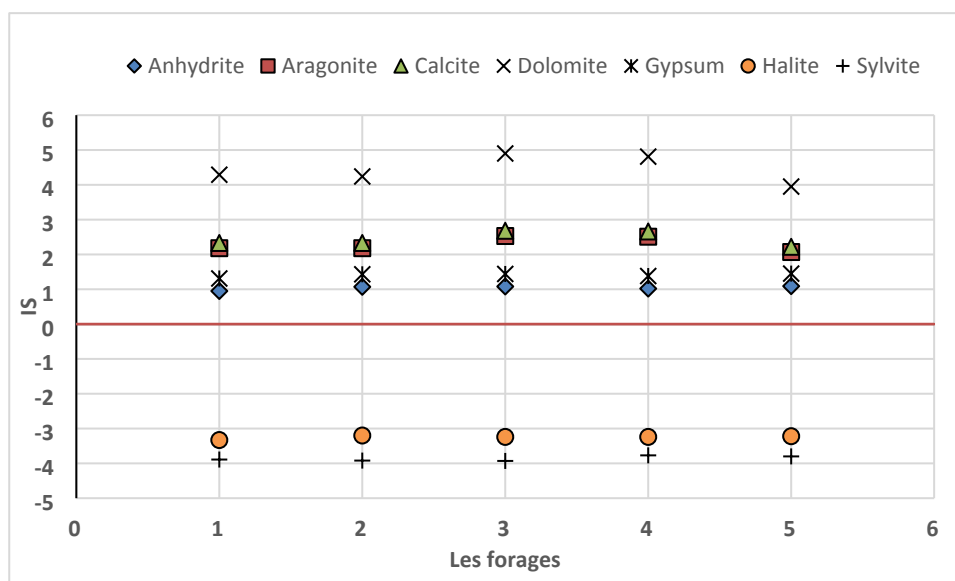


Figure IV.10. Indice de saturation des minéraux des forages de Zelfana

L'étude de la relation entre les indices de saturation (IS) des principaux minéraux et les concentrations en ions dissous dans les eaux souterraines permet de mieux comprendre les processus de précipitation ou de dissolution contrôlant la chimie de l'aquifère.

La figure IV.11a montre l'évolution de l'IS de l'aragonite, de la calcite et de la dolomite en fonction des concentrations en calcium (Ca^{2+}). Tous les échantillons sont clairement situés en zone de sursaturation, notamment pour la dolomite, dont l'IS dépasse 4. Seuls un ou deux points proches de 2 en aragonite indiquent des niveaux de saturation plus faibles, mais toujours positifs, traduisant une forte propension à la précipitation de ces phases carbonatées.

La figure IV.11b, qui représente l'IS des mêmes minéraux en fonction des concentrations en magnésium (Mg^{2+}), confirme cette tendance. Tous les échantillons sont à nouveau sursaturés, avec des valeurs particulièrement élevées pour la dolomite, indiquant que les eaux sont chimiquement propices à la précipitation de Ca^{2+} et Mg^{2+} sous forme de phases carbonatées.

La figure IV.12a met en évidence la relation entre l'anhydrite et le gypse par rapport à la concentration en sulfates (SO_4^{2-}). Contrairement aux résultats précédents où ces phases étaient sous-saturées, les données actuelles indiquent que les échantillons sont modérément sursaturés, avec des IS entre 1.0 et 1.5, ce qui suggère une tendance à la précipitation partielle du gypse et de l'anhydrite dans certains forages.

La figure IV.12b illustre la relation entre les IS de l'halite (NaCl) et de la sylvite (KCl) en fonction des concentrations en chlorures (Cl^-). Les deux minéraux affichent des valeurs négatives stables, autour de -3.5 à -4.0, traduisant une forte sous-saturation. Cela indique une dissolution continue de ces sels

évaporitiques, contribuant directement à l'enrichissement en Na^+ , Cl^- et K^+ dans les eaux souterraines. La corrélation apparente entre l'augmentation du Cl^- et la baisse de l'IS renforce cette interprétation.

Ces quatre figures confirment que la précipitation des phases carbonatées est un processus dominant, alors que les sels évaporitiques (halite et sylbite) sont en dissolution active, et que les sulfates tendent à se stabiliser autour de l'équilibre.

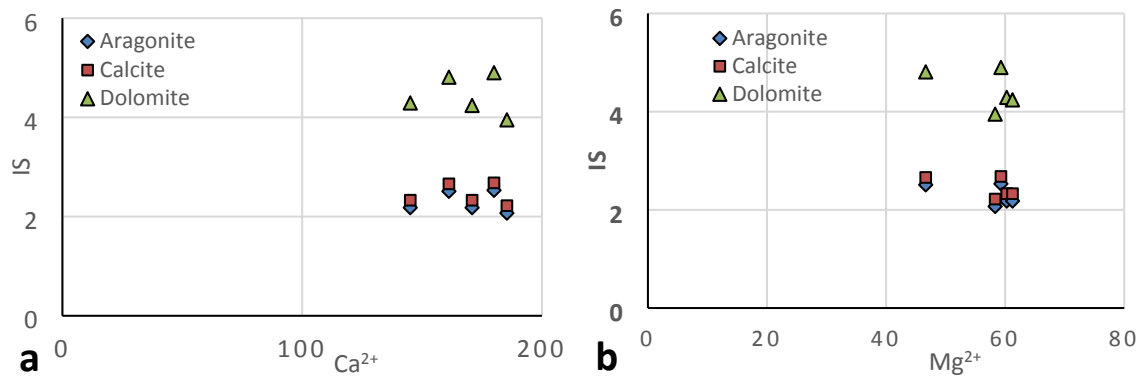


Figure IV.11. Graphes bivariés de a) Ca^{2+} en fonction d'IS des minéraux carbonatés b) Mg^{2+} en fonction d'IS de l'aragonite, calcite et dolomite

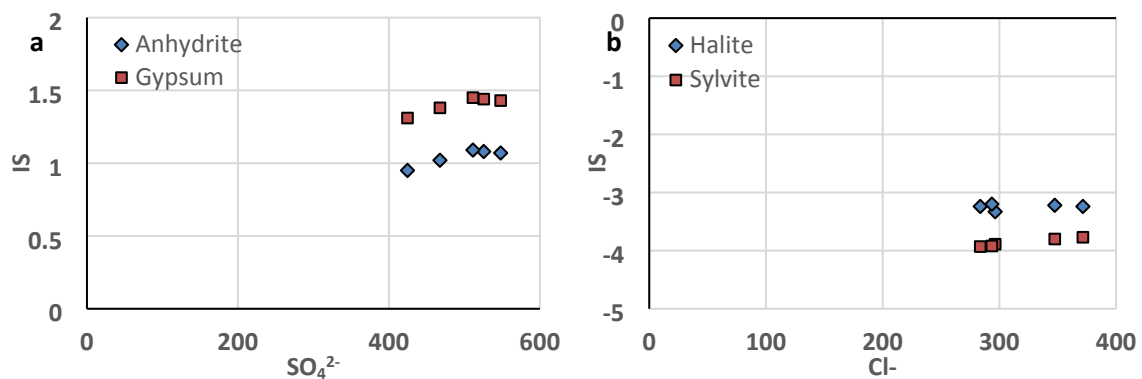


Figure IV.12. Graphes bivariés de a) SO_4^{2-} par rapport aux IS de gypse et l'anhydrite b) Cl^- par rapport aux IS d'Halite et Sylvite

IV.6. Conclusion

L'analyse hydrochimique des eaux souterraines de la région de Zelfana révèle une minéralisation importante d'origine naturelle, principalement liée à la dissolution des formations évaporitiques (notamment l'halite et le gypse) ainsi qu'à l'effet combiné de l'évaporation intense et précipitation, caractéristiques des milieux arides.

Les résultats issus des diagrammes de Piper, Chadha et Gibbs mettent en évidence une prédominance des faciès chlorurés et sulfatés calco-magnésiens, ce qui confirme l'influence dominante des formations

évaporitiques sur la chimie des eaux souterraines. Le diagramme de Chadha souligne une homogénéité chimique marquée entre les différents forages, tandis que le diagramme de Gibbs montre une situation hydrochimique dominée par les processus d'évaporation, avec une absence notable de l'influence des précipitations récentes.

L'étude des rapports ioniques et des indices de saturation (IS) confirme la sursaturation des carbonates (calcite, aragonite, dolomite), traduisant leur tendance à précipiter, alors que les sels évaporitiques (halite, sylbite) sont en sous-saturation constante, indiquant une dissolution active. Les sulfates (gypse, anhydrite), quant à eux, présentent des niveaux de saturation proches de l'équilibre. Ces tendances révèlent une chimie de l'eau influencée à la fois par la dynamique de dissolution-précipitation et par des échanges ioniques inverses, impliquant les cations alcalino-terreux et le sodium dans les minéraux argileux.

L'évolution du rapport $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ en fonction du Cl^- , ainsi que la corrélation entre les IS et les concentrations en ions majeurs, suggèrent que l'origine de la minéralisation est majoritairement évaporitique, avec une contribution secondaire des carbonates et silicates.

En résumé, la composition chimique des eaux souterraines de Zelfana est façonnée par des processus hydrogéochimiques complexes combinant dissolution évaporitique, précipitation carbonatée, altération des silicates, et échanges ioniques, dans un contexte saharien marqué par l'aridité, la faible recharge, et le confinement aquifère. Cette compréhension approfondie des interactions eau-roche constitue un préalable essentiel pour la gestion durable de cette ressource fragile.

Conclusion général



Conclusion général

Conclusion général

L'étude approfondie des eaux souterraines de l'aquifère de la région de Zelfana a permis de mettre en évidence les principaux mécanismes hydrochimiques responsables de leur minéralisation, tout en apportant une contribution significative à la connaissance de la qualité des ressources en eau dans un contexte saharien aride. Dans une zone où la disponibilité hydrique est naturellement très limitée, cette recherche s'inscrit dans une perspective de valorisation scientifique et de gestion durable des ressources (Foster et al., 2000 ; OSS, 2003).

Les analyses physico-chimiques menées sur les échantillons issus de cinq forages ont révélé des teneurs élevées en ions majeurs, notamment Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} , indiquant une minéralisation avancée des eaux. Tous les échantillons analysés présentent des faciès chlorurés et sulfatés, typiques des milieux évaporitiques, confirmant l'influence dominante de la dissolution du gypse et de l'halite, accentuée par des conditions climatiques extrêmes (forte évaporation et absence de recharge active) (Edmunds & Gaye, 1994 ; Rodier et al., 2009).

Les analyses statistiques multivariées, à savoir la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP), ont permis de regrouper les eaux en trois clusters distincts, reflétant des différences significatives en termes de qualité chimique, de profondeur d'exploitation et de pressions anthropiques. Ces regroupements ont mis en évidence une correspondance claire entre les signatures chimiques et les localisations géographiques des forages, notamment l'influence marquée des activités agricoles dans certains points (Güler et al., 2002 ; Rahbar et al., 2020).

Les diagrammes géochimiques utilisés (Piper, Chadha, Gibbs) ont renforcé l'interprétation des faciès et permis d'identifier les processus dominants tels que la dissolution, l'échange ionique, et dans une moindre mesure, l'évapoconcentration (Hem, 1985 ; Appelo & Postma, 2005). Les indices de saturation minérale calculés suggèrent des eaux souvent proches de l'équilibre avec certains minéraux (comme la calcite ou la dolomite), traduisant un cheminement long et confiné au sein de la formation aquifère.

Par ailleurs, la corrélation forte entre certains paramètres chimiques ($R > 0,9$ entre $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, Na^+/Cl^- , etc.) confirme une origine majoritairement naturelle, tandis que des indices d'influences anthropiques localisées ont été détectés, notamment à proximité des zones de cultures irriguées, où des excès de nitrates et de phosphates ont été enregistrés (Rodier et al., 2009 ; WHO, 2017).

Ces résultats démontrent la fragilité de l'aquifère face à la surexploitation et au manque de suivi technique. Ils soulignent l'urgence de mettre en œuvre des actions concrètes telles que :

- la mise en place d'un suivi hydrochimique régulier,
- la réglementation des prélèvements agricoles,
- l'optimisation de l'usage des engrais,
- et la sensibilisation des populations locales à la rareté et à la valeur de cette ressource (Foster et al., 2000 ; Kadri & Mesroua, 2020).

En conclusion, ce travail constitue une base de données originale et fiable sur la qualité des eaux souterraines à Zelfana, et propose des pistes opérationnelles pour une gestion intégrée et durable de l'aquifère dans un contexte de pression croissante sur les ressources en eau.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Adda, A. (2013). *Étude de la vulnérabilité des nappes dans les zones arides*. Mémoire de Master, Université de Ouargla.
2. ANRH. (2010). *Étude hydrogéologique de la nappe du Continental Intercalaire*. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Alger.
3. Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2e éd.). CRC Press.
4. Baba, H. (2008). Impacts des eaux usées sur la qualité des nappes phréatiques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(1), 13–22.
5. Boudiaf, D. (2006). Contribution à l'étude géologique du Sahara septentrional. *Revue Algérienne de Géosciences*, 18, 77–89.
6. Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Groundwater intensive use: Challenges and opportunities*. CRC Press.
7. Dalton, M. G., et al. (1978). Hydrochemical facies and groundwater composition. *Journal of Hydrology*, 37(2), 127–144.
8. Deutsch, W. J. (2020). *Groundwater geochemistry: Fundamentals and applications to contamination*. CRC Press.
9. Edmunds, W. M., & Gaye, C. B. (1994). Estimation of groundwater recharge in the Sahel: A review. *Hydrogeology Journal*, 2(1), 3–12.
10. Fetter, C. W. (2018). *Applied hydrogeology* (4e éd.). Waveland Press.
11. Foster, S., & Chilton, P. J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358(1440), 1957–1972.
12. Foster, S., Chilton, P., Moench, M., Cardy, F., & Schiffler, M. (2000). *Groundwater in rural development: Facing the challenges of supply and resource sustainability*. World Bank.
13. Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088–1090.
14. Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, A. K. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10(4), 455–474.
15. Hasnia, M. (2018). *Étude des éléments nutritifs dans les eaux souterraines de la région de Biskra*. Université de Biskra.
16. Hassani, H., & Noui, Y. (2022). État des nappes phréatiques dans la région de Ghardaïa. *Revue des Ressources en Eau*, 19(3), 34–40.
17. Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3e éd.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.
18. Hounslow, A. W. (1995). *Water quality data: Analysis and interpretation*. CRC Press.
19. Kadri, R., & Mesroua, F. (2020). État des nappes profondes du Sahara algérien: Cas de la nappe du Continental Intercalaire. *Revue des Ressources en Eau*, 12(3), 44–52.
20. Kankou, A. M., et al. (2004). *Les nappes du Sahara et la gestion durable*. Rapport OSS, Observatoire du Sahara et du Sahel.
21. Mainguet, M. (1999). *Aridité: Une contrainte au développement*. Springer.
22. Makhoukh, A., Benmohammed, M., & Ouali, A. (2011). Pollution azotée et qualité des eaux souterraines en zone semi-aride. *Revue des Sciences et Technologies*, 20, 87–96.

Références bibliographiques

23. OMS. (2017). *Lignes directrices pour la qualité de l'eau de boisson* (4e éd.). Organisation mondiale de la santé.
24. OMS. (2022). *Mise à jour des seuils sanitaires des métaux lourds dans l'eau potable*. Organisation mondiale de la santé.
25. OSS. (2003). *Système aquifère du Sahara septentrional: Gestion commune d'un bassin transfrontalier*. Observatoire du Sahara et du Sahel.
26. OSS. (2006). *Ressources en eau et développement durable au Sahara*. Observatoire du Sahara et du Sahel.
27. Ouzal, A. (2005). *Étude de la salinisation des eaux dans la région de Zelfana*. Université de Ouargla.
28. Rahbar, N., Abassi, R., & Ramesht, M. H. (2020). Application of PCA and CAH in the evaluation of hydrochemical characteristics. *Environmental Earth Sciences*, 79(2), 1–14.
29. Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). *L'analyse de l'eau: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* (9e éd.). Dunod.
30. Seddi, R. (2024). *Évaluation de la pollution phosphorée dans les eaux de la région de Ouargla*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla.
31. Selmane, H. (2023). Impacts sanitaires des nitrates dans les eaux souterraines à usage domestique. *Revue Santé & Environnement*, 14(2), 123–131.
32. Touhari, N. (2015). *Comportement des nitrites dans les eaux souterraines d'origine agricole*. Université de Constantine.
33. WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization.

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 ساحة محفوظ تخصص ري حضري
نمنح نحن الأساتذة:

الاسم واللقب	الرتبة والجامعة الأصلية أو المؤسسة	الصفة	الامضاء
أولاد النوي نور الدين	أستاذ محاضر أ بجامعة غرداية	مصحح 1	
بوبلي سليم	أستاذ محاضر أ بجامعة غرداية	مصحح 2	
الطاهر سلمان	أستاذ محاضر ب بجامعة غرداية	مؤطر	
لشهب السنة	أستاذ محاضر ب بجامعة غرداية	مؤطر مساعد	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة الماستر تحت عنوان:

Géochimie et origine de minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère de la région de Zelfana.

إمضاء رئيس القسم

أحمد الطيب
رئيس قسم الري
والهندسة المدنية