

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : TECHNOLOGIE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

**Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique**

Par: **ZABI Nidhal abdeldjalil**

et

YOUNSI Yanis

Intitulé

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

Soutenu devant le jury composé de:

Berghout Ali	Université de M'sila	Président
Merzouk Belkacem	Université de M'sila	Encadreur
Ferhati Ahmed	Université de M'sila	Co-Encadreur
Mezali Farouk	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce mémoire de fin d'études.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre Encadreur, Professeur **MERZOUK Belkacem**, et à notre Co-Encadreur, Docteur **FERHATI Ahmed**, pour leurs conseils avisés, leur accompagnement, leur encouragement, leur disponibilité et leur exigence tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements s'adressent à tous les **membres du jury** qui nous feront l'honneur d'examiner ce travail.

Nos vifs remerciements vont également à tous les **Enseignants** et le **Personnel** du département d'Hydraulique et de l'Université de M'sila.

Nous tenons à remercier le **Directeur Régional** de l'ANRH de la wilaya de Ouargla pour la collecte des données.

Enfin, Merci à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

ZABI Nidhal abdeldjalil

&

YOUNSI Yanis

Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la variation spatio-temporelle de la qualité physicochimique des eaux souterraines de la wilaya de Ghardaïa.

Après avoir déterminé les faciès géochimiques en utilisant les diagrammes (Piper, Schöeller-Berkaloff), le diagramme de Wilcox et l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES) ont été utilisés pour classer les eaux de ces forages selon les normes pour les différents usages (AEP et irrigation).

Les analyses statistiques (ACP, CAH) ont permis d'identifier des regroupements potentiels d'échantillons, indiquant la possibilité de classer les forages en groupes homogènes selon la composition ionique de leurs eaux.

Mots clés : Eaux souterraines, Ghardaïa, Hydrochimie, Diagrammes, Analyses statistiques, Indice de Qualité.

Abstract

The main objective of this work is to study the spatial and temporal evolution in the physicochemical quality of groundwater in the Ghardaïa region.

After determining the geochemical facies using diagrams (Piper, Schöeller-Berkaloff), the Wilcox diagram and the Groundwater Quality Index (GWQI) were used to classify the water from these boreholes according to standards for different uses (drinking water and irrigation).

Statistical analyses (PCA, HAC) identified potential sample clusters, indicating the possibility of classifying the boreholes into homogeneous groups based on the ionic composition of their water.

Keywords: *Groundwater, Ghardaïa, Hydrochemistry, Diagrams, Statistical analyses, Quality Index.*

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة التباين المكاني والزمني في الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية في ولاية غرداية.

بعد تحديد السمات الجيوكيميائية باستخدام المخططات (Schöeller-Berkaloff and Piper)، استخدم مخطط Wilcox ومؤشر جودة المياه الجوفية (IQES) لتصنيف مياه هذه الآبار وفقاً لمعايير الاستخدامات المختلفة (مياه الشرب والسقي).

حددت التحليلات الإحصائية (ACP, CAH) مجموعات عينات محتملة، مما يشير إلى إمكانية تصنيف الآبار إلى مجموعات متجانسة بناءً على التركيب الأيوني لمياهها.

الكلمات المفتاحية : المياه الجوفية، غرداية، الهيدروكيميا، المخططات البيانية، التحليلات الإحصائية، مؤشر الجودة.

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

N° du Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Moyennes mensuelles et annuelles des précipitations (2017/2025)	03
Tableau I.2	Distribution des températures moyennes mensuelles à la station de de Ghardaïa (2017-2025)	04
Tableau I.3	Les caractéristiques des sous bassins étudiés	09
Tableau I.4	Calcul de la forme des sous bassins	10
Tableau I.5	Calcul du rectangle équivalent	11
Tableau I.6	Caractéristiques des altitudes	17
Tableau I.7	Calcul de l'indice de pente globale	18
Tableau I.8	Classification de l'ORSTOM	18
Tableau I.9	Calcul de la dénivelée spécifique	19
Tableau I.10	Calcul de la densité de drainage	21
Tableau I.11	Calcul de la vitesse d'écoulement de l'eau et le temps de concentration	21
Tableau I.12	Calcul de la densité hydrographique	22
Tableau I.13	Principales caractéristiques morphométriques des sous bassins versants étudiés	22
Tableau II.1	Classification des eaux d'après leur pH	30
Tableau II.2	Normes Algériennes de potabilisation	32
Tableau II.3	Normes Algériennes des eaux d'irrigation	33
Tableau II.4	Inventaire et caractéristiques des points d'eau	34
Tableau II.5	Balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude	36
Tableau III.1	Classes du SAR et de la conductivité selon Richards (1954)	60
Tableau III.2	Matrice de corrélation	68
Tableau III.3	Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux étudiées	68
Tableau III.4	Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux	69
Tableau III.5	Corrélations entre les variables et les facteurs	70
Tableau IV.1	Statut de la qualité de l'eau basée sur IQES	78
Tableau IV.2	Paramètres de qualité d'eau, valeurs standard, les valeurs idéales et facteurs de poids de l'eau - Irrigation	79
Tableau IV.3	L'indice de qualité pour les forages - Irrigation	80
Tableau IV.4	Etat récapitulatif de la qualité des eaux souterraines des forages - Irrigation	81
Tableau IV.5	Paramètres de qualité d'eau, valeurs standard, les valeurs idéales et facteurs de poids de l'eau - AEP	83
Tableau IV.6	L'indice de qualité pour les forages - AEP	84
Tableau IV.7	Etat récapitulatif de la qualité des eaux souterraines des forages - AEP	85

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Fig. I.1	Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa	02
Fig. I.2	Carte des sous bassins étudiés	10
Fig. I.3	Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Berriane	12
Fig. I.4	Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Berriane	12
Fig. I.5	Courbe hypsométrique du sous bassin Oued M'Zab	13
Fig. I.6	Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued M'Zab	13
Fig. I.7	Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Metlili	14
Fig. I.8	Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Metlili	14
Fig. I.9	Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Sebseb	15
Fig. I.10	Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Sebseb	15
Fig. I.11	Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Mansoura	16
Fig. I.12	Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Mansoura	16
Fig. I.13	Carte des pentes des sous bassins	19
Fig. I.14	Réseau hydrographique de la wilaya de Ghardaïa	20
Fig. II.1	Carte géologique de Ghardaïa et d'El Meniaa	25
Fig. II.2	Exemple d'une coupe géologique et schématique de la vallée du M'Zab	25
Fig. II.3	Colonne stratigraphique synthétique du bassin Sahara Septentrional (SASS)	27
Fig. II.4	Coupe hydrogéologie NE-SW du bassin SASS	28
Fig. II.5	Carte de positionnement des forages étudiés	35
Fig. II.6	Carte de variation du Titre hydrotimétrique	39
Fig. II.7	Carte de variation des bicarbonates	40
Fig. II.8	Carte de variation du Sodium	41
Fig. II.9	Carte de variation de Calcium	42
Fig. II.10	Carte de variation du Magnésium	43
Fig. II.11	Carte de variation du Potassium	44
Fig. II.12	Carte de variation des Sulfates	45
Fig. II.13	Carte de variation des Chlorures	46
Fig. II.14	Carte de variation de la Turbidité	47
Fig. III.1	Diagramme de Piper de la zone d'étude (F1-F24)	49
Fig. III.2	Diagramme de Piper de la zone d'étude (F25-F48)	50

Fig. III.3	Diagramme de Piper de la zone d'étude (F49-F71)	51
Fig. III.4	Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F1-F12)	53
Fig. III.5	Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F13-F24)	54
Fig. III.6	Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F25-F36)	55
Fig. III.7	Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F37-F48)	56
Fig. III.8	Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F49-F60)	57
Fig. III.9	Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F61-F71)	58
Fig. III.10	Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox log (F1-F24)	60
Fig. III.11	Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox log (F25-F48)	61
Fig. III.12	Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox log (F25-F48)	62
Fig. III.13	$(Ca^{2+}) = f(SO_4^{2-})$	63
Fig. III.14	$(Na^+) = f(SO_4^{2-})$	64
Fig. III.15	$(Na^+) = f(Cl^-)$	64
Fig. III.16	$(Mg^{2+}) = f(SO_4^{2-})$	65
Fig. III.17	$(Mg^{2+}) = f(HCO_3^-)$	65
Fig. III.18	$(Ca^{2+}) = f(HCO_3^-)$	66
Fig. III.19	Valeurs propres des axes et leurs contributions	69
Fig. III.20	Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (Axes F1 et F2)	70
Fig. III.21	Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)	71
Fig. III.22	Répartition des individus sur le plan (F1 et F2)	72
Fig. III.23	Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)	75
Fig. III.24	Hiérarchie des partitions (intra-classes et interclasses) obtenues par CAH	75
Fig. IV.1	Histogramme de classification de la qualité des eaux des forages d'irrigation	80
Fig. IV.2	Répartition spatiale de l'IQES d'irrigation	81
Fig. IV.3	Histogramme de classification de la qualité des eaux des forages d'AEP	83
Fig. IV.4	Répartition spatiale de l'IQES d'AEP	84

Sommaire

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Résumé en français, en anglais et en arabe

Liste des tableaux

Liste des figures

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction	02
I.2. Aperçu géographique	02
I.2.1. Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa	02
I.2.2. Le climat	03
I.2.3. La pluviométrie	03
I.2.4. Les températures	04
I.2.5. Les plans d'eau	04
I.2.6. Le relief	06
I.2.7. Démographie	06
I.3. Caractéristiques économiques de la wilaya de Ghardaïa	06
I.3.1. L'agriculture	07
I.3.2. L'industrie	07
I.3.3. Le tourisme	06
I.4. Les sources de pollution	08
I.5. Etude morphométrique des sous bassins de la région d'étude	09
I.5.1. La surface	09
I.5.2. Le périmètre	09
I.5.3. La forme	10
I.5.4. Le rectangle équivalent	11
I.5.5. Altimétrie et courbe hypsométrique	11
I.5.6. Caractéristiques des altitudes	16
I.5.7. Indice de pente	17
I.6. Les caractéristiques du réseau hydrographique	20
I.6.1. Densité de drainage	20
I.6.2. Temps de concentration	21
I.6.3. Vitesse d'écoulement de l'eau	21
I.6.4. Densité hydrographique	21
I.7. Conclusion partielle	23

Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique

II.1. Introduction	24
II.2. Géologie générale de la wilaya de Ghardaïa	24
II.2.1. Trias	26
II.2.2. Jurassique	26
II.2.3. Crétacé inférieur	26
II.2.4. Crétacé inférieur	26
II.2.5. Tertiaire	26
II.2.6. Quaternaire	27
II.3. Hydrogéologie générale de la wilaya de Ghardaïa	28
II.3.1. Interactions entre les aquifères	28
II.3.2. Problématiques hydrogéologiques	29
II.4. Etude hydrochimique des eaux des forages	29
II.4.1. Paramètres de qualité des eaux	29
II.4.2. Normes de potabilisation	32
II.4.3. Normes d'irrigation	33
II.5. Calcul de la balance ionique	36
II.6. Paramètres physicochimiques	38
II.6.1. Aperçu général sur la méthode d'interpolation spatiale dans le SIG	38
II.6.2. Le krigeage	38
II.6.3. Formule de krigeage	38
II.7. Les cartes de la répartition spatiale hydrochimique	39
II.7.1. Titre hydrotimétrique (TH)	39
II.7.2. Titre Alcalimétrique Complet (TAC)	39
II.7.3. Sodium (Na^+)	40
II.7.4. Calcium (Ca^{2+})	41
II.7.5. Magnésium (Mg^{2+})	42
II.7.6. Potassium (K^+)	43
II.7.7. Sulfates (SO_4^{2-})	44
II.7.8. Chlorures (Cl^-)	45
II.7.9. Turbidité	46
II.8. Conclusion partielle	47

Chapitre III : Hydrogéochimie des eaux souterraines

III.1. Introduction	48
III.2. Faciès hydrochimiques	48
III.2.1. Outil de traitement	48
III.2.2. Classification de Piper	48
III.2.3. Classification de Schöeller-Berkaloff	52
III.2.4. Classification de Wilcox log	59
III.2.5. Origine des minéraux évaporitiques et carbonatés	63
III.3. Analyses statistiques multivariées des variables physicochimiques	67
III.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)	67

III.3.2. Analyse par la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	74
III.4. Conclusion partielle	76

Chapitre IV : Indice de qualité des eaux souterraines

IV.1. Introduction	77
IV.2. Définition de l'indice de qualité des eaux souterraines	77
IV.3. Méthode de calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES)	78
IV.4. Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine de l'irrigation ...	80
IV.5. Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine d'AEP	83
IV.6. Conclusion partielle	84
Conclusion générale	85

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

Les ressources en eau sont essentielles au développement durable dans le monde entier. En raison de la croissance démographique rapide, du développement économique, du changement climatique et d'autres défis affectant les ressources naturelles, l'eau est devenue une ressource rare.

Les ressources en eaux souterraines du monde entier sont précieuses pour répondre aux besoins agricoles, domestiques et industriels. Cela est particulièrement vrai dans les régions arides et semi-arides où les précipitations sont rares et les réserves en eau de surface extrêmement limitées.

Dans les régions arides et semi-arides comme Ghardaïa, les ressources en eau sont particulièrement vulnérables à la surexploitation et à la pollution, ce qui compromet leur durabilité. Par conséquent, une analyse spatiale, temporelle et statistique de la qualité des eaux souterraines est essentielle pour comprendre l'évolution de ces ressources et proposer des mesures de gestion efficaces.

Cette étude vise à étudier la variabilité de la qualité des eaux souterraines dans la wilaya de Ghardaïa à l'aide de méthodes analytiques et statistiques appropriées. Cette approche s'appuie sur des analyses hydrogéochimiques effectuées durant 2018. Par conséquent, nous avons divisé ce travail en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente la zone d'étude et son étude morphométrique.
- Le deuxième chapitre présentera le contexte géologique et hydrogéologique.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines en utilisant les diagrammes (Piper, Schöeller-Berkaloff et Wilcox), ainsi que l'application des méthodes statistiques multivariées sous le logiciel XLSTAT, telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).
- Le quatrième chapitre portera sur l'indice de qualité des eaux souterraines.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et quelques recommandations.

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous fournirons une présentation détaillée de la wilaya de Ghardaïa (ou Taghardait suivant le langage utilisé par les fondateurs de cette ville), du point de vue géographique, climatique, géologique, hydrogéologique et morphométrique, afin de compiler les données et les connaissances nécessaires à l'étude hydrogéochimique des eaux souterraines.

I.2. Aperçu géographique

I.2.1. Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa

La wilaya de Ghardaïa est située au centre de la partie Nord du Sahara algérien. Elle est localisée entre 31.52° et 33.1° de latitude Nord et entre 2.20° et 4.99° de longitude Est. Elle a une superficie de 24 395 km², et elle est constituée de dix (10) communes: Ghardaïa, Zelfana, Dhayet Bendahoua, Sebseb, Berriane, Bounoura, Metlili, El Guerrera, El Atteuf, Mansoura [1-3].

Cette wilaya est limitée (Fig. I.1):

- au nord par les wilayas de Laghouat (1) et de Djelfa (2)
- à l'est par la wilaya d'Ouargla (3)
- au sud par la wilaya d'El Meniaa (4)
- à l'ouest par la wilaya d'El Bayadh (5).

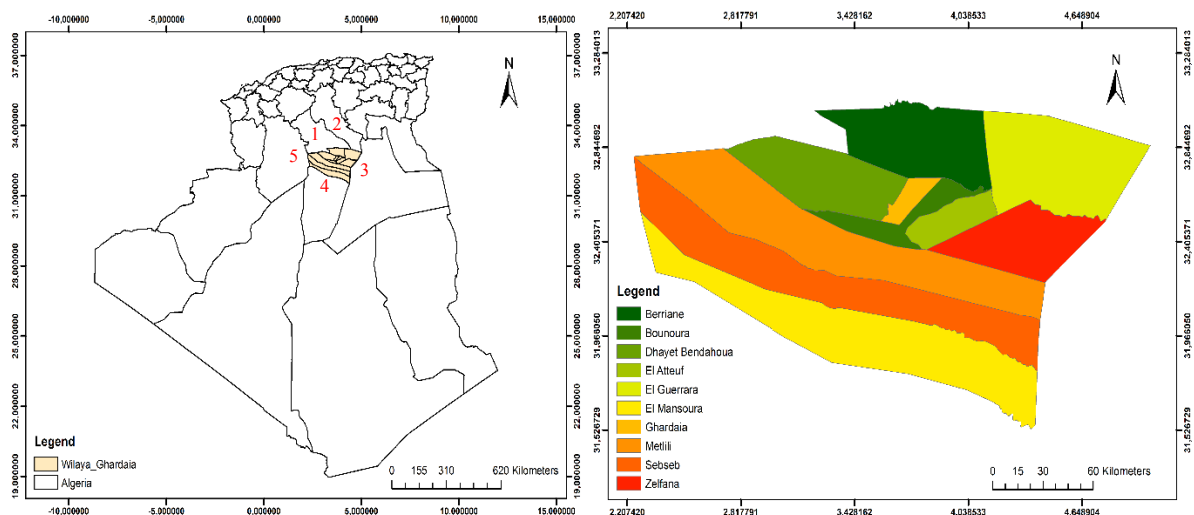


Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa

La wilaya de Ghardaïa se caractérise par trois principales zones géographiques :

- a) Le Grand Erg Oriental dont les dunes peuvent atteindre une hauteur de 200 m.

- b) La Hamada : un plateau caillouteux.
- c) La vallée du M'Zab : une région du Sahara septentrional algérien qui se présente comme un vaste plateau rocaillieux découpé de vallées profondes et enchevêtrées. Sa configuration en résille a valu à la région le nom de Chebka.

Le plateau crétacé est formé par des calcaires durs du Turonien. Il est raviné en tous sens par l'érosion fluviale du début du quaternaire et sillonné d'un réseau complexe d'Oueds dont les quatre principaux forment des vallées encaissées. L'Oued M'Zab le traverse du Nord-Ouest au Sud-Est.

1.2.2. Le climat

Le climat de Ghardaïa est subtropical désertique, avec des hivers doux (durant lesquels, il peut faire froid la nuit) et des étés très chauds et ensoleillés. La ville est située dans le centre-nord de l'Algérie, dans le désert, à une altitude de 500 m.

En hiver, il peut y avoir des journées assez froides, avec des températures minimales proches de zéro et des maximales autour de 10 °C. En janvier 2005, il y a eu une journée avec une température maximale de 5 °C et même de la neige. Une autre chute de neige s'est produite en février 2018.

Le printemps est la saison où les tempêtes de sable sont les plus fréquentes. En été, aux pires moments, la température peut dépasser 45 °C. En juillet 2023, elle atteint 48 °C, avec pluviométrie et une température minimale de 33.6 °C [2]. Les vents de sable en automne, printemps et hiver sont de direction Nord-Ouest. Les vents chauds (Sirocco) qui dominent en été sont de direction Sud-Nord, sont très secs et entraînent une forte évapotranspiration.

1.2.3. La pluviométrie

La wilaya de Ghardaïa connaît une variation saisonnière minime en termes de fréquence des jours de précipitation (c'est-à-dire, les jours connaissant une précipitation d'eau ou mesurée en eau supérieure à 1 mm). La fréquence varie de 1 % à 6 %, avec une valeur moyenne de 4%.

Pour les jours de précipitation, nous distinguons les jours avec pluie seulement, neige seulement ou un mélange des deux. Le mois avec le plus grand nombre de jours de pluie seulement à Ghardaïa est septembre, avec une moyenne de 1.6 jour. En fonction de ce classement, la forme de précipitation la plus courante au cours de l'année est de la pluie seulement, avec une probabilité culminant à 6 % le 17 septembre [3].

Tableau I.1: Moyennes mensuelles et annuelles des précipitations (2017/2025)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Pluie (mm)	8.8	5.1	7.7	5.3	5.0	3.0	1.2	2.6	8.2	8.2	8.8	8.0

1.2.4. Les températures

La wilaya de Ghardaïa présente des hivers doux et des étés très chauds. La température moyenne du mois le plus froid (janvier) est de 11.4 °C, celle du mois le plus chaud (juillet) est de 34,4 °C. Les températures moyennes mensuelles sur une période de 9 années (2017-2025) enregistrées à la station de Ghardaïa sont représentées dans le tableau ci-dessous, font apparaître un hiver doux et un été très chaud et ensoleillé [3].

Tableau I.2 : Distribution des températures moyennes mensuelles à la station de Ghardaïa (2017-2025)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
T_{max} (°C)	16	18	22	26	31	36	39	39	34	27	21	16
T_{min} (°C)	10	12	16	20	25	30	34	33	28	22	16	11
T_{moy} (°C)	6	8	11	14	19	24	27	27	22	17	11	7

1.2.5. Les plans d'eau

La wilaya de Ghardaïa, bien qu'aride, dispose de plusieurs plans d'eau essentiels qui jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau et l'agriculture. Ces plans d'eau se divisent principalement en barrages, lacs et Oueds.

1.2.5.1. Barrages et lacs

- Barrage de Bounoura : Ce barrage permet la collecte et la régulation des eaux de surface pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable. Il contribue également à la recharge des nappes phréatiques.
- Lac Souk El Had : Un plan d'eau naturel temporaire qui se forme lors des précipitations intenses et qui joue un rôle dans la biodiversité locale et le maintien de l'humidité des sols.
- Retenues collinaires : Plusieurs petites retenues collinaires ont été construites pour collecter l'eau de pluie et réduire l'impact des périodes de sécheresse sur l'agriculture.

1.2.5.2. Oueds

La région de Ghardaïa est jalonnée par un grand réseau d'Oueds dont les principaux sont : Oued M'Zab , Oued Metlili, Oued N'Tissa et Oued Zegrir [4].

- **Oued M'Zab** : Principal cours d'eau de la région. Il joue un rôle crucial dans l'alimentation des nappes phréatiques. Ses contours sont imprécis dans la partie orientale. Limitée à Ghardaïa, point le plus bas généralement atteint par les crues. Il coule sensiblement de l'ouest vers l'est sur 320 km de la région de Botma Rouila, à 750 m d'altitude où il prend sa source sous le nom d'Oued El Abiod, à la Sebket Safioune (l'exutoire du bassin).

Les principaux affluents du M'Zab sont:

- En amont de Ghardaïa sur la rive gauche, Oued El-Haïmeur ; sur la rive droite : Oued Touzouz qui rejoint le M'Zab immédiatement en amont de la palmeraie de Ghardaïa.
- En aval de Ghardaïa, nous rencontrons à droite de Béni Isguène, Oued N'Tissa qui traverse la palmeraie de cette dernière. A gauche et à quelques centaines de mètres en aval du précédent nous trouvons Oued Azouil dans le lit duquel sont situés les jardins de Bounoura.
- **Oued Zegrir** : est l'un des grands Oueds qui traversent le M'Zab. Il coule sur une longueur qui varie entre 270 km et 300 km selon l'importance de la crue. Il prend sa source à l'Oued Ajerma au Nord - Ouest, à une altitude de 850 m. Oued Zegrir passe au nord de Berriane pour atteindre El Guerrara en aval et se dirige vers le Sud -Est pour terminer son parcours à la vallée du Zgag [4].
- **Oued Metlili** : Il a pour origine la confluence de deux principaux Oueds ; El Botma et Gaa au méridien 03°25' Est et la parallèle 32°23' Nord à une altitude de 650 m. il parcourt environ 270 km de l'Ouest vers l'Est pour atteindre la dépression de Sabkhet Safioune à une altitude de 120 m dans la région de Ouargla. L'écoulement de l'Oued est sporadique se manifestant à la suite de grandes averses orageuses.
- **Oued N'Sa** : Il prend sa source à Tilghemt qui culmine à cet endroit à 750 m d'altitude et passe au Nord-Est du Berriane et se dirige vers le Sud où il reçoit l'apport de deux affluents, Soudan et Ballouh qui passent par la palmeraie de Berianne. Il continue son cours vers le Sud-Est pour atteindre la Sabkhet Safioune, au nord de Ouargla sur une longueur de 320 km.

Ces plans d'eau constituent des ressources précieuses pour la région, nécessitant une gestion rigoureuse pour prévenir leur surexploitation et leur pollution.

1.2.5.3. Les ressources en eau

Les principales nappes d'eau souterraine de la wilaya de Ghardaïa sont :

i) Nappe phréatique – Complexe Terminal (CT)

L'eau captée par des puits traditionnels de 20 m de profondeur en moyenne, mais qui peuvent atteindre 50 m et plus (100 à 500 m pour la nappe du CT), permet l'irrigation des cultures pérennes et en particulier les dattiers et l'alimentation des foggaras. L'alimentation et le comportement hydrogéologique sont liés étroitement à la pluviométrie. La qualité chimique des eaux est bonne à la consommation du côté amont. À l'aval, elle est mauvaise à la consommation directe à cause de la présence des sulfates, ou le risque de contamination par les eaux usées urbaines et industrielles.

ii) Nappe du Continental Intercalaire (CI)

Elle draine, d'une façon générale, les formations gréseuses et grésos-argileuses de l'Albien. Elle est exploitée, selon la région, à une profondeur allant de 250 à 1000 m. Localement, l'écoulement des eaux se fait d'Ouest en Est. L'alimentation de la nappe bien qu'elle soit minime, provient directement des eaux de pluie au piémont de l'Atlas Saharien en faveur de l'accident Sud-Atlasique. La nappe du CI, selon l'altitude de la zone et la variation de l'épaisseur des formations postérieures au CI, est :

- Jaillissante et admet des pressions en tête d'ouvrage de captage (Zelfana et El Guerrara).
- Exploitée par pompage à des profondeurs importantes, dépassant parfois les 120 m (Ghardaïa, Metlili et Berriane) [4].

1.2.6. Le relief

Le relief de la wilaya de Ghardaïa est marqué par des formations géologiques variées influençant l'écoulement des eaux et la recharge des nappes souterraines [5]. On trouve :

- **Plateaux et collines** : La région est caractérisée par des plateaux arides et des collines rocheuses qui limitent l'infiltration des eaux de surface.
- **Vallée du M'Zab** : Elle constitue l'élément principal du paysage, avec des formations calcaires et des oueds saisonniers facilitant l'écoulement des eaux vers les zones de captage.
- **Dépressions et cuvettes** : Ces zones de faible altitude favorisent l'accumulation d'eau, notamment en période de crues.

Le relief joue un rôle essentiel dans la dynamique hydrologique locale, influençant la disponibilité et la qualité des eaux souterraines.

1.2.7. Démographie

La population totale de la wilaya de Ghardaïa est estimée à la fin de l'année 2018 à 402921 habitants. La wilaya de Ghardaïa couvre une superficie de 24789 km², soit une densité de peuplement de 16 habitants/km². La population de la wilaya est constituée de 50.94 % d'hommes et de 49.06 % de femmes. Dans son ensemble, la population de la wilaya est jeune, dont 64.27 % ont moins de 30 ans [6].

I.3. Caractéristiques économiques de la wilaya de Ghardaïa

L'économie de la wilaya de Ghardaïa repose principalement sur les secteurs suivants [2,6]:

- **Agriculture** : L'activité agricole est essentielle, avec des cultures adaptées au climat aride, notamment les palmiers dattiers et les cultures maraîchères irriguées par des systèmes traditionnels de foggaras.

- **Artisanat et commerce** : Ghardaïa est réputée pour la diversité et la beauté de son artisanat qui comprend entre autres, le tissage de la laine (tapis et vêtements mozabites traditionnels), la dinanderie, la poterie, la tannerie, etc.
- **Industrie et services** : Le secteur industriel n'est pas vraiment développé, mais certaines unités de transformation agroalimentaire et de construction existent.
- **Tourisme** : Le patrimoine architectural et culturel unique de la vallée du M'Zab attire de nombreux visiteurs, contribuant à l'économie locale.

Ces caractéristiques économiques influencent directement la gestion des ressources en eau, en raison des besoins croissants en irrigation et en eau potable.

1.3.1. L'agriculture

L'agriculture est l'un des piliers économiques de la wilaya de Ghardaïa. Malgré un climat aride et des ressources en eau limitées, l'ingéniosité des agriculteurs locaux et les techniques traditionnelles ont permis de développer un secteur agricole productif et adapté aux conditions désertiques. Elle repose principalement sur :

- **Les palmeraies** : La culture du palmier dattier constitue l'activité agricole dominante. Les variétés de dattes produites, telles que la Deglet Nour, sont réputées à l'échelle nationale et internationale.
- **Les cultures maraîchères** : Cultivées sous serres ou en plein champ, elles comprennent la tomate, la courgette, l'oignon et d'autres légumes adaptés aux conditions locales.
- **Les cultures fourragères** : Essentielles pour l'élevage, elles incluent la luzerne et d'autres plantes fourragères utilisées pour nourrir le bétail.
- **L'arboriculture** : Certaines plantations d'amandiers, de figuiers et d'oliviers sont présentes malgré la rareté de l'eau.

Les systèmes d'irrigation utilisés sont :

- **Les foggaras** : Ce système traditionnel de captage et de distribution de l'eau souterraine, vieux de plusieurs siècles, est encore utilisé pour alimenter les oasis.
- **Les puits profonds** : Creusés pour extraire l'eau des nappes souterraines profondes, ils constituent une source majeure d'eau pour l'agriculture.
- **L'irrigation goutte-à-goutte** : De plus en plus adoptée, cette méthode permet d'optimiser la consommation d'eau et d'améliorer le rendement des cultures.

1.3.2. L'industrie

Ghardaïa dispose de plusieurs zones industrielles et unités de production.

- **Zones industrielles de Bounoura et de Métili** : Elles regroupent différentes unités de production spécialisées dans l'agroalimentaire, les matériaux de construction et la mécanique.

- **Petites et moyennes entreprises (PME)** : De nombreuses PME locales participent activement à l'économie, notamment dans la transformation des produits agricoles et l'artisanat.
- **Unités artisanales et coopératives** : Ces structures favorisent l'emploi local et le maintien des traditions industrielles de la région.

I.3.3. Le tourisme

Riche de siècles d'histoire, dotée d'un remarquable patrimoine naturel et possédant des splendeurs architecturales, la wilaya de Ghardaïa s'érige en wilaya touristique par excellence [2].

i) La vallée du M'zab

D'une valeur universelle exceptionnelle, elle se distingue par son aspect urbanistique remarquable et unique en son genre. Elle recèle des Ksours avec leurs palmeraies, classés patrimoine de l'humanité par l'UNESCO du fait de leurs spécificités architecturales et urbaines.

ii) Le secteur sauvegardé

- Ksar d'El Atteuf (un ksar millénaire aux minarets de mosquées de forme pyramidale).
- Ksar de Bounoura (l'extension réalisée au XIII^{ème} siècle et actuellement habitée).
- Ksar de Ghardaïa (place du marché appelée Rahba).
- Ksar de Melika (érigé au début du XI^{ème} siècle).
- Ksar de Beni Isguène (érigé à partir de 1347).

iii) Les sites classés

- Ksar de Berriane, classé patrimoine national en 1998.
- Ksar de Guerrara, classé patrimoine national en 1998.
- Ksar de Metlili, classé patrimoine national en 1982.
- Ksar de Tafilalt : se dresse sur la plus haute colline de l'oasis de Beni Isguène et s'étend sur une superficie de 22 hectares ; il est classé cité écologique par excellence ; il concilie architecture locale et développement durable.

I.4. Les sources de pollution

Les Oueds dont dispose la wilaya de Ghardaïa sont exposés à diverses sources de pollution qui compromettent la qualité de leurs eaux. Parmi les principales causes de pollution, on peut citer :

- **Rejets domestiques** : Le déversement d'eaux usées non traitées provenant des habitations contribue à la contamination microbiologique et chimique des Oueds.
- **Activités industrielles** : Les unités de production situées à proximité de ces plans d'eau peuvent rejeter des effluents chargés en polluants organiques et chimiques, notamment des métaux lourds et des hydrocarbures.

- **Agriculture intensive** : L'utilisation excessive d'engrais et de pesticides entraîne un ruissellement de substances chimiques qui finissent par se retrouver dans les Oueds, augmentant ainsi la charge en nitrates et phosphates.
- **Dépôts de déchets solides** : L'accumulation de déchets plastiques, de métaux et d'autres résidus solides dans le lit de l'oued obstrue l'écoulement de l'eau et favorise la prolifération de bactéries pathogènes.
- **Érosion et ruissellement** : En raison du climat aride et des précipitations irrégulières, l'érosion des sols entraîne l'apport de particules en suspension et de matières organiques dans l'oued, affectant sa turbidité et sa qualité.

I.5. Etude morphométrique des sous bassins de la région d'étude

Les bassins versants de Ghardaïa s'appuient sur divers paramètres qui jouent un rôle très important dans l'aspect hydrologique, tel que le relief, la forme, l'altitude, la pente, ...

I.5.1. La surface (A)

Un bassin versant (BV) est défini comme étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits d'eau vont donc être en partie reliés à sa surface, correspondant à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) exprimée en km², peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou par les techniques de digitalisation (Global Mapper, Map Info, ArcGIS...). La surface des sous bassins versants qui constituent la wilaya de Ghardaïa est déterminée en utilisant le logiciel ArcGIS. Elle est de l'ordre 14973 km².

I.5.2. Le périmètre (P)

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre mesuré par ArcGIS est de 644.5 km.

Le tableau ci-après nous résume les surfaces et les périmètres des sous-bassins étudiés.

Tableau I.3 : Les caractéristiques des sous bassins étudiés (SBV)

	Code de grille	Surface (km²)	Périmètre (km)
Oued Berriane	23	3302.79	366.25
Oued M'Zab	48	4206.56	375.75
Oued Metlili	51	4505.59	409.75
Oued Sebseb	86	703.25	220.07
Oued Mansoura	85	2254.74	307.89

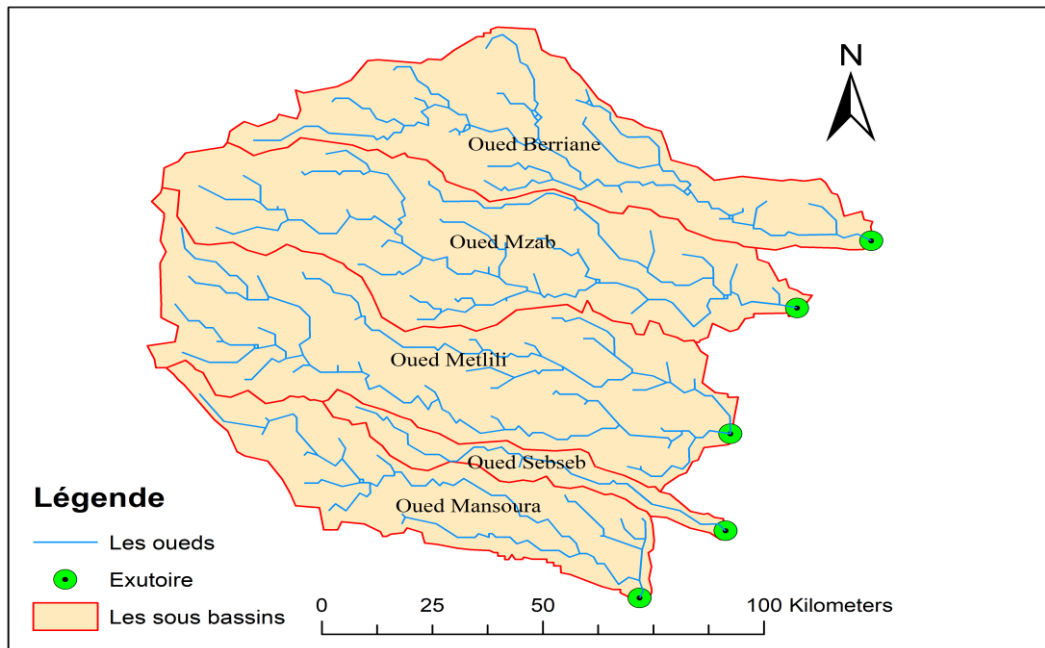


Figure I.2: Carte des sous bassins étudiés

1.5.3. La forme

L'indice le plus utilisé pour déterminer la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de Gravelius (K_G). La forme d'un bassin a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau, et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin (P) à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Cet indice est donné par la relation suivante [7]:

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec,

K_G : Indice de compacité de Gravelius.

P : Périmètre du sous bassin versant en (km).

A : surface du sous bassin en (km²).

- Si K_G est proche de 1, le bassin versant est de forme circulaire.
- Si K_G est supérieur à 1, le bassin versant est de forme allongée.

Tableau I.4 : Calcul de la forme des sous bassins

	Surface (km ²)	Périmètre (km)	K_G
Oued Berriane	3302.79	366.25	1.78
Oued M'Zab	4206.56	375.75	1.62
Oued Metlili	4505.59	409.75	1.70
Oued Sebseb	703.25	220.07	2.32
Oued Mansoura	2254.74	307.89	1.81

Dans les cinq sous bassins versants étudiés, le K_G est supérieur à 1, donc ils présentent une forme allongée (Fig. I.2).

I.5.4. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent permet de rendre une forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangle ayant le même périmètre, la même superficie et le même indice de Gravelius K_G afin de comparer les bassins entre eux à propos de la différence de leurs paramètres géométriques sur l'écoulement. Il s'exprime par la combinaison de ces relations [7].

$$K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$A = L_r * l_r$$

$$P = 2 (L_r + l_r)$$

Avec :

L_r : longueur du rectangle équivalent (km) ; l_r : largeur du rectangle équivalent (km)

Les formules empiriques de calcul :

$$L_r = \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right] \frac{K_G \sqrt{A}}{1.128}$$

$$l_r = \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_G} \right)^2} \right] \frac{K_G \sqrt{A}}{1.128}$$

Tableau I.5 : Calcul du rectangle équivalent

	Surface (km ²)	Périmètre (km)	K_G	L_r (km)	l_r (km)
Oued Berriane	3302.79	366.25	1.78	161.35	20.46
Oued M'Zab	4206.56	375.75	1.62	160.30	26.24
Oued Metlili	4505.59	409.75	1.70	178.12	25.29
Oued Sebseb	703.25	220.07	2.32	102.389	6.86
Oued Mansoura	2254.74	307.89	1.81	136.31	16.54

I.5.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

Le relief influe sur l'écoulement par divers paramètres hydrométéorologiques variant avec l'altitude (précipitations, température...) et la morphologie du bassin. Par ailleurs, la pente influe sur la vitesse d'écoulement.

Les fréquences altimétriques sont représentées par la courbe hypsométrique et celle des altitudes. La courbe hypsométrique est la répartition de la surface du bassin versant ou le pourcentage de

surface en fonction de son altitude. Elle est tracée à partir du cumul de l'histogramme d'altitudes. Cette courbe permet de faire des recherches sur le niveau de maturité d'un cours d'eau. Son but est de comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elle permet aussi de calculer l'altitude moyenne, l'altitude la plus fréquente et l'indice de pente global du bassin [7,8].

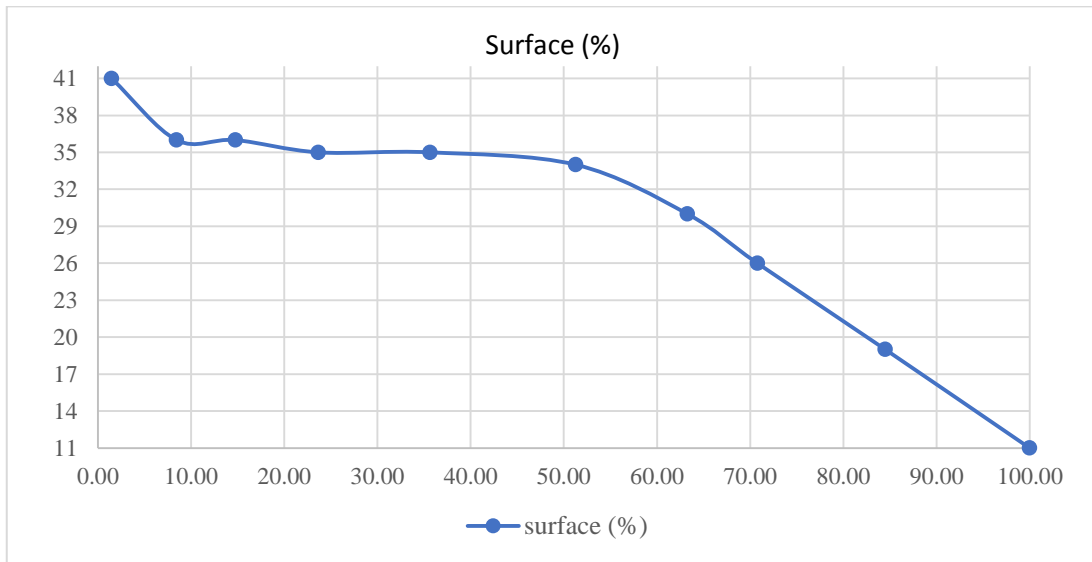


Figure I.3 : Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Berriane

Selon la courbe d'élévation, trois zones sont distinguées :

- La première zone présente une pente relativement raide.
- La deuxième zone présente une pente douce qui est presque inexistante.
- La troisième zone présente une pente modérée.

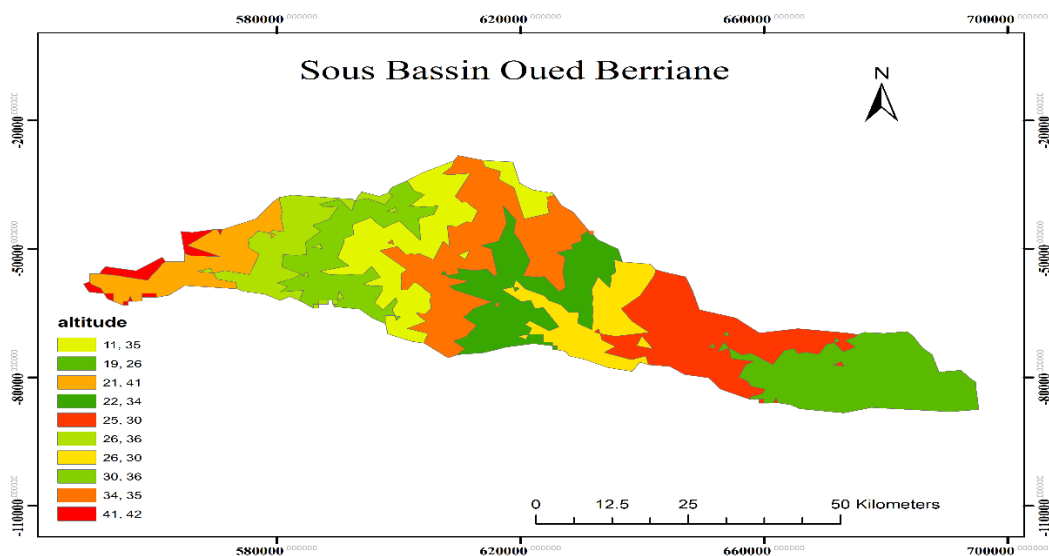


Figure I.4 : Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Berriane

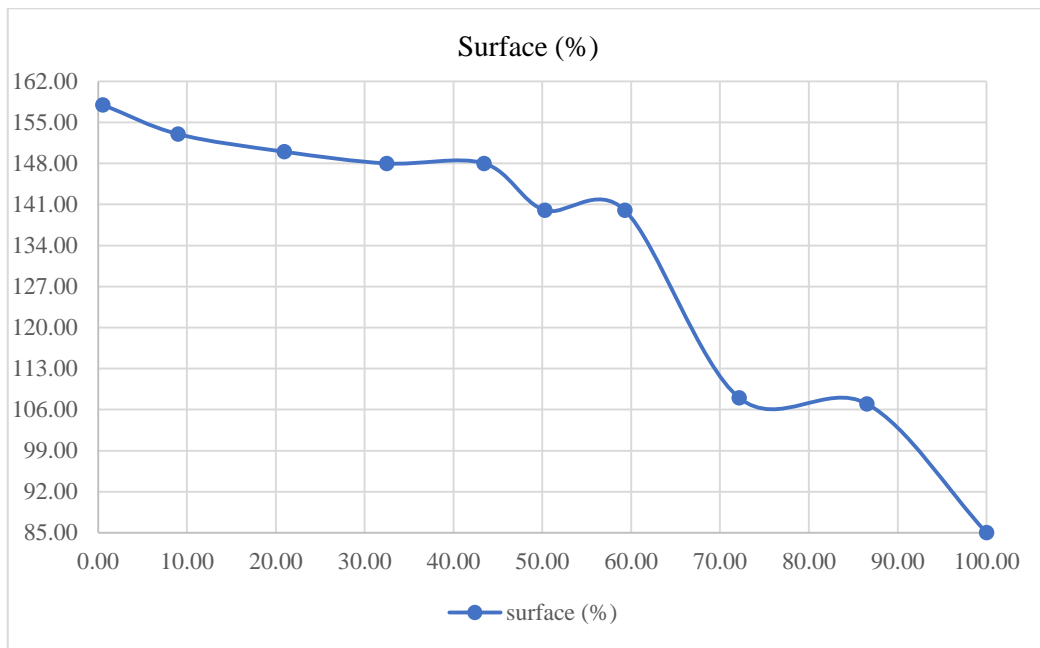


Figure I.5 : Courbe hypsométrique du sous bassin Oued M'Zab

Selon la courbe d'élévation, on distingue deux zones :

- La première zone présente une pente semi-moderée.
- La deuxième zone présente une pente modérée (présence de plateaux).

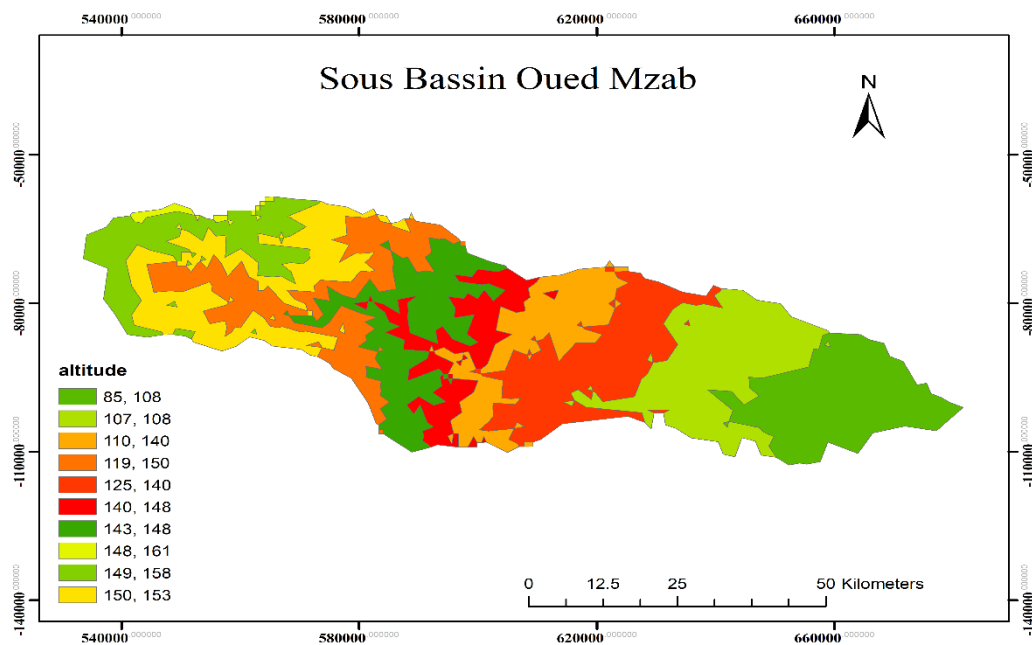


Figure I.6 : Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued M'Zab

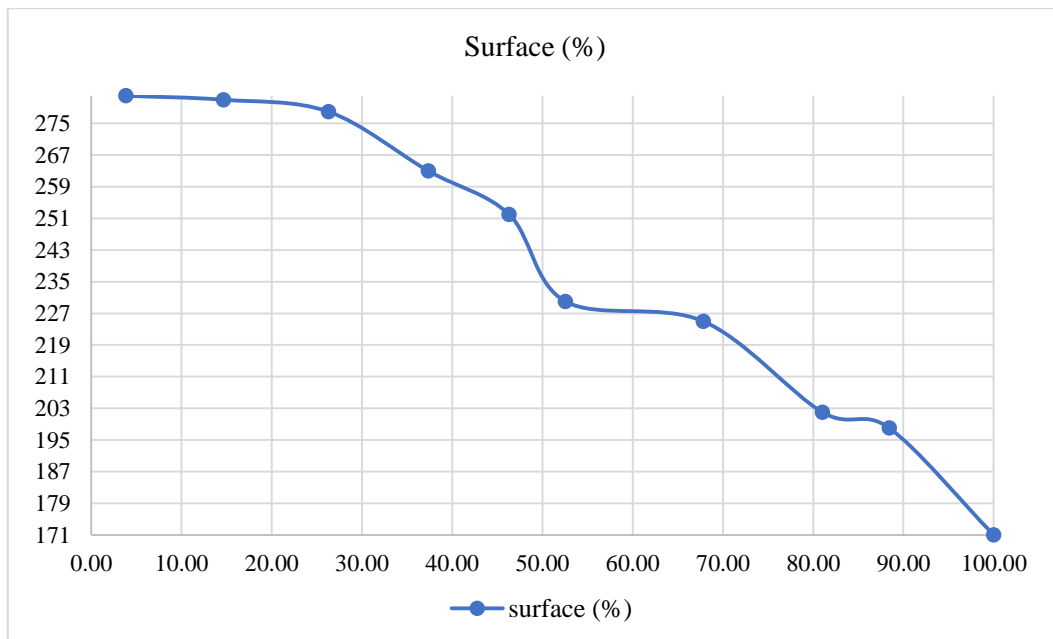


Figure I.7 : Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Metlili

Selon la courbe d'élévation, on distingue deux régions :

- La première zone présente une pente douce.
- La deuxième zone présente une forte pente due aux reliefs.

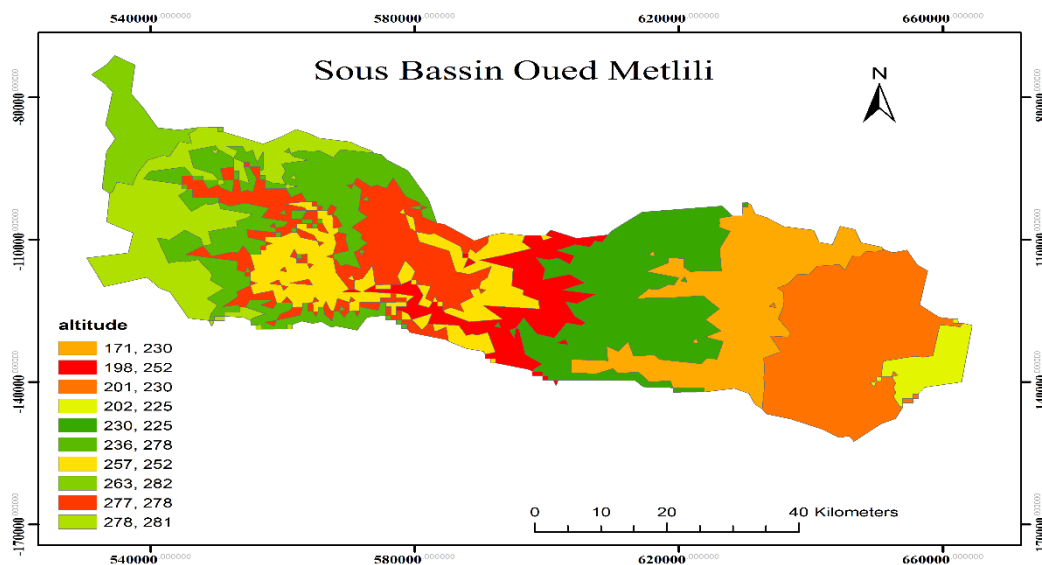


Figure I.8 : Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Metlili

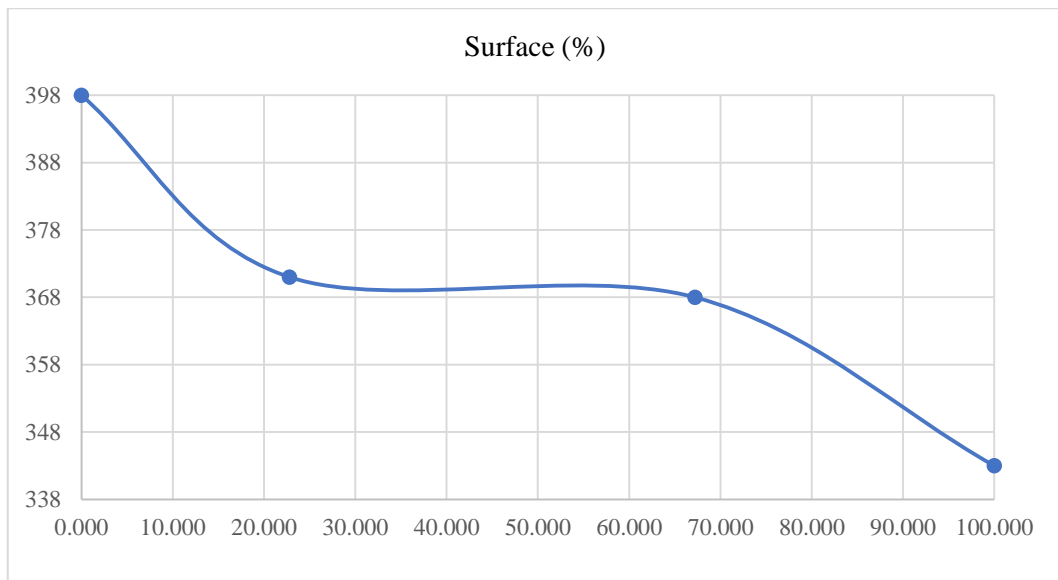


Figure I.9 : Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Sebseb

Selon la courbe d'élévation, trois zones sont distinguées :

- La première zone présente une pente relativement raide.
- La deuxième zone présente une pente douce qui est presque inexistante.
- La troisième zone de faible pente associée.

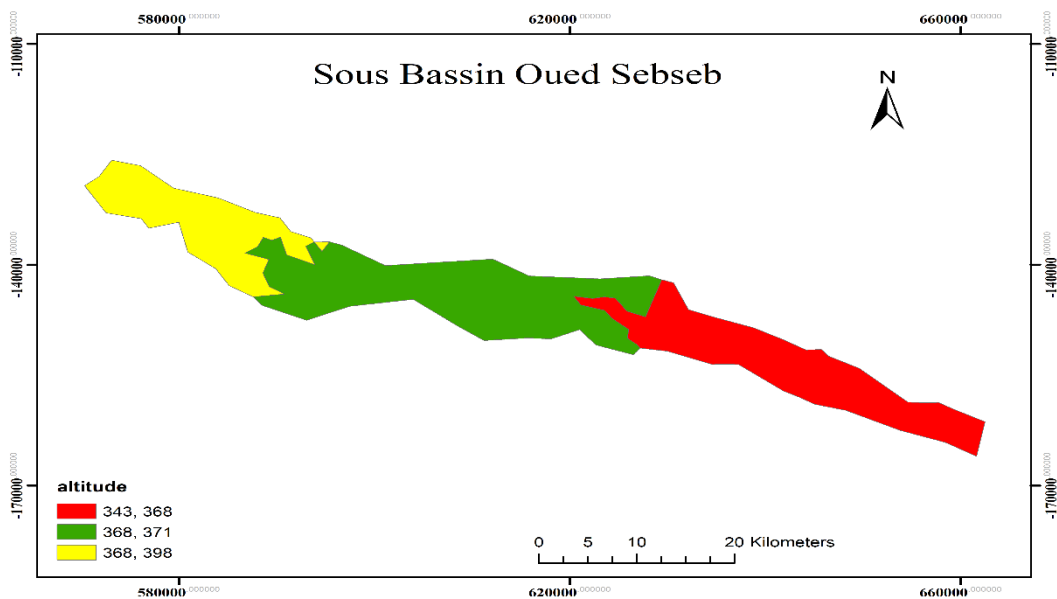


Figure I.10 : Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Sebseb

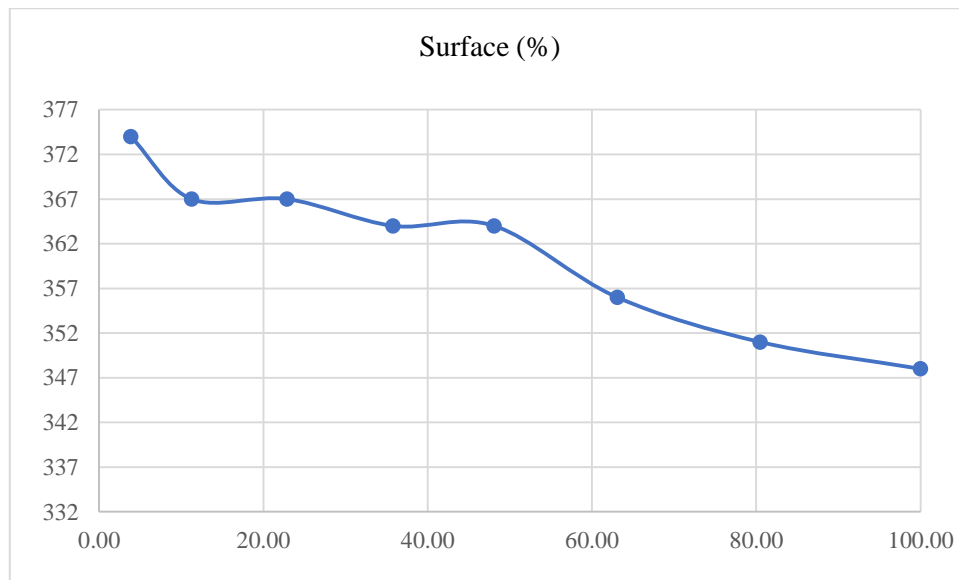


Figure I.11 : Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Mansoura

Selon la courbe d'élévation, trois zones sont distinguées :

- La première zone présente une pente relativement raide.
- La deuxième zone présente une pente douce qui est presque inexistante.
- La troisième zone présente une pente modérée.

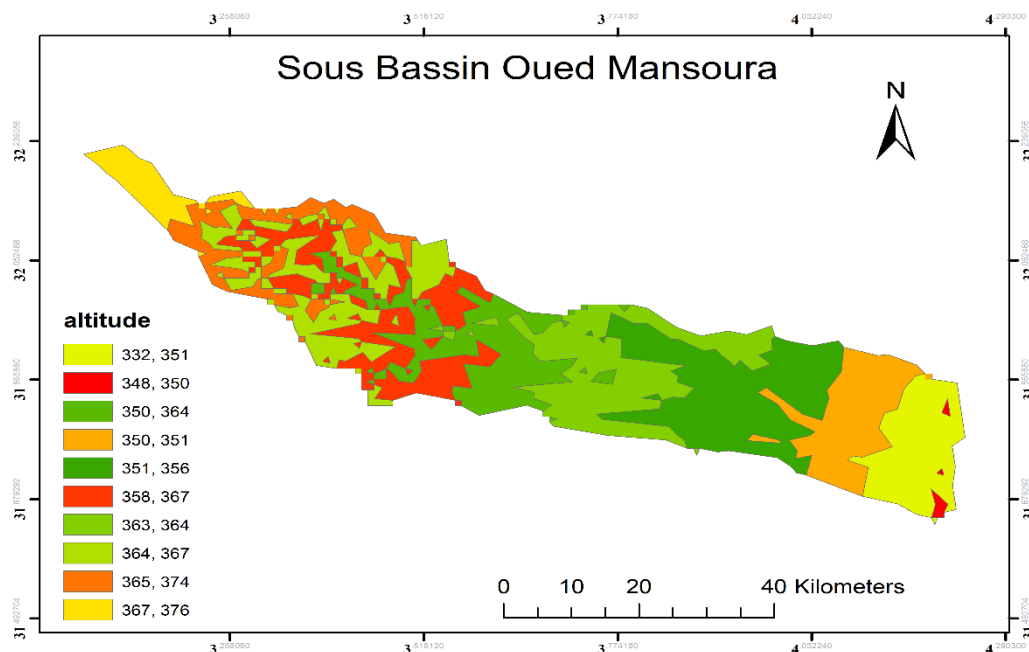


Figure I.12 : Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Mansoura

I.5.6. Caractéristiques des altitudes

1) **Altitudes maximale et minimale** : ce sont les points culminants et les plus bas au niveau de l'exutoire du bassin versant. Elles sont obtenues directement à partir de la courbe hypsométrique.

2) Altitude moyenne : L'altitude moyenne est lue directement de la courbe hypsométrique. Elle correspond au rapport du volume montagneux ($V = \sum H_i \cdot A$) du bassin versant par sa surface totale. Elle s'exprime par la formule :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum A_i H_i}{A_t}$$

Avec,

H_i : Altitude moyenne de chaque classe (m)

A_i : Surface partielle des tranches d'altitude (km²)

A_t : Surface totale du sous bassin (km²).

Le tableau ci-après nous résume les résultats obtenus pour chaque sous bassin.

Tableau I.6 : Caractéristiques des altitudes

	H_{min} (m)	H_{max} (m)	H_{moy} (m)
Oued Berriane	11	42	31
Oued M'Zab	85	161	136
Oued Metlili	171	282	238
Oued Sebseb	343	398	370
Oued Mansoura	332	376	359

1.5.7. Indice de pente

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. On trouve généralement:

1.5.7.1. Indice de pente globale (I_g)

L'indice de pente globale est déterminé à partir de la courbe hypsométrique en éliminant les valeurs extrêmes, de manière à ne garder que 90 % de l'aire du sous bassin. Cet indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = D/L_r$$

Avec,

D : Dénivelée simple (m) ; L_r : Longueur du rectangle équivalent (km).

A partir de la courbe hypsométrique, on obtient : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

Selon la classification du relief par l'ORSTOM (*Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer*), le relief d'un bassin est estimé en fonction de son indice de pente globale (Tableau I.7).

$I_g < 0.002$ Relief très faible

$0.002 < I_g < 0.005$	Relief faible
$0.005 < I_g < 0.010$	Relief assez faible
$0.010 < I_g < 0.020$	Relief modéré
$0.020 < I_g < 0.050$	Relief assez fort

Tableau I.7 : Calcul de l'indice de pente globale

	$H_{5\%}$	$H_{95\%}$	D (m)	L_r (km)	I_g (m/km)	Relief
Oued Berriane	38	13.04	24.96	161.36	0.00015	très faible
Oued M'Zab	155	95	60	160.30	0.00037	très faible
Oued Metlili	281	183	98	178.13	0.00055	très faible
Oued Sebseb	392	347	45	102.39	0.00044	très faible
Oued Mansoura	373.25	350	23.25	136.31	0.00017	très faible

D'après les résultats obtenus, tous les sous bassins versants présentent un relief très faible.

1.5.7.2. Dénivelée spécifique (D_s)

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la deuxième classification d'ORSTOM (Tableau I.8).

L'indice I_g décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité d'introduire le paramètre (D_s).

$$D_s = I_g * [A]^{1/2}$$

Tableau I.8 : Classification de l'ORSTOM

R1	Relief très faible	$05 < D_s < 10$ m
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25$ m
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$ m
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100$ m
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$ m
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500$ m
R7	Relief très fort	$500 < D_s < 750$ m

Tableau I.9 : Calcul de la dénivelée spécifique

	I_g	A (km ²)	$[A]^{1/2}$	D_s	Relief
Oued Berriane	0.00015	3302.44	57.47	8.62	très faible
Oued M'Zab	0.00037	4206.57	64.86	24	faible
Oued Metlili	0.00055	4505.59	67.12	35.26	assez faible
Oued Sebseb	0.00044	703.25	26.52	11.66	faible
Oued Mansoura	0.00017	2254.74	47.48	8.07	très faible

Les cartes des pentes (en °) des sous bassins versants étudiés sont présentées dans les figures suivantes.

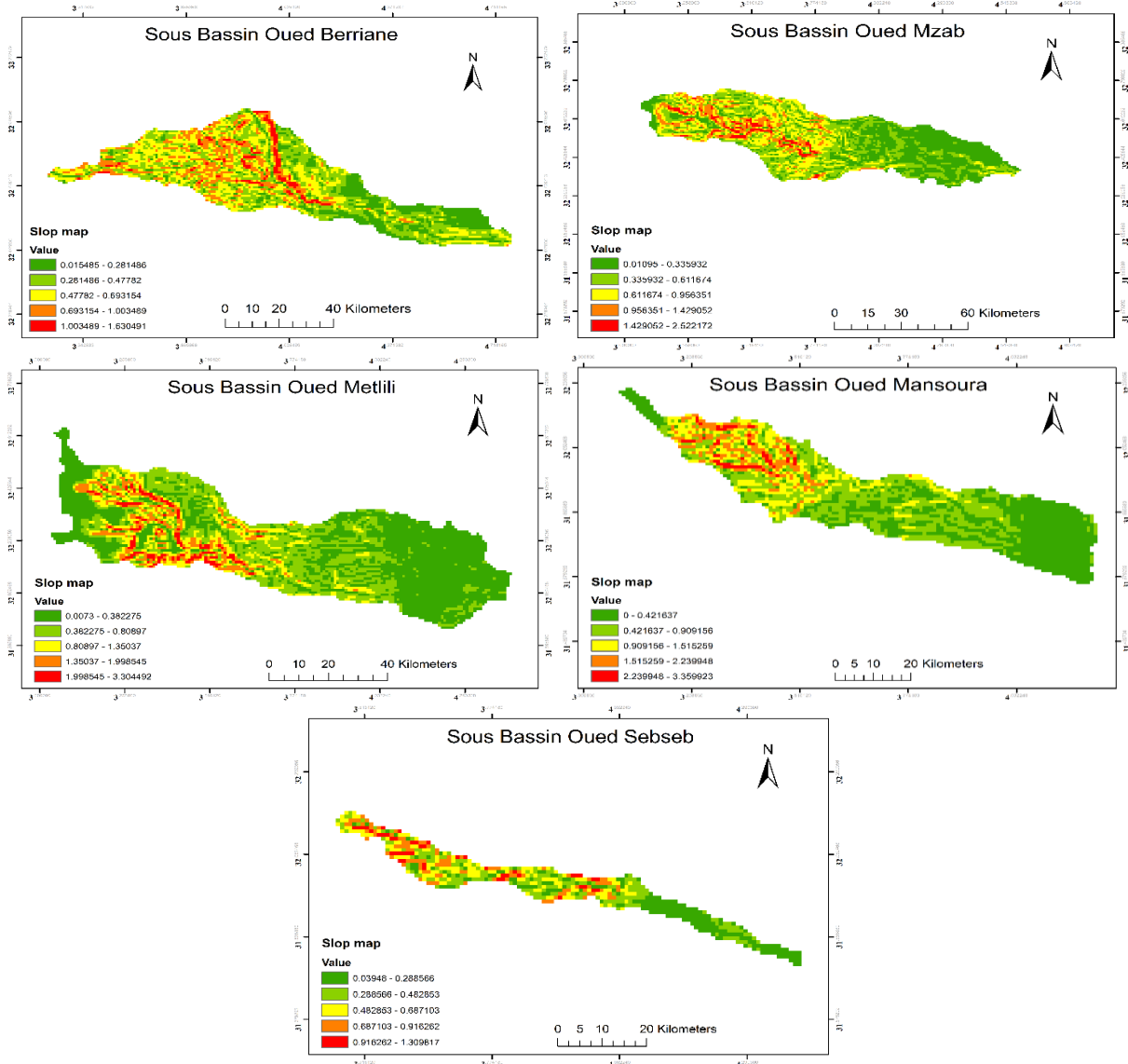


Figure I.13 : Carte des pentes des sous bassins

I.6. Les caractéristiques du réseau hydrographique

Un réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels (rivières) ou artificiels (réseaux) drainant un bassin versant.

Le réseau hydrographique des sous-bassins étudiés est tracé par le logiciel ArcGis. Il est marqué par cinq Oueds principaux : Oued Berriane, Oued M'Zab, Oued Metlili, Oued Sebseb et Oued Mansoura (Fig. I.14).

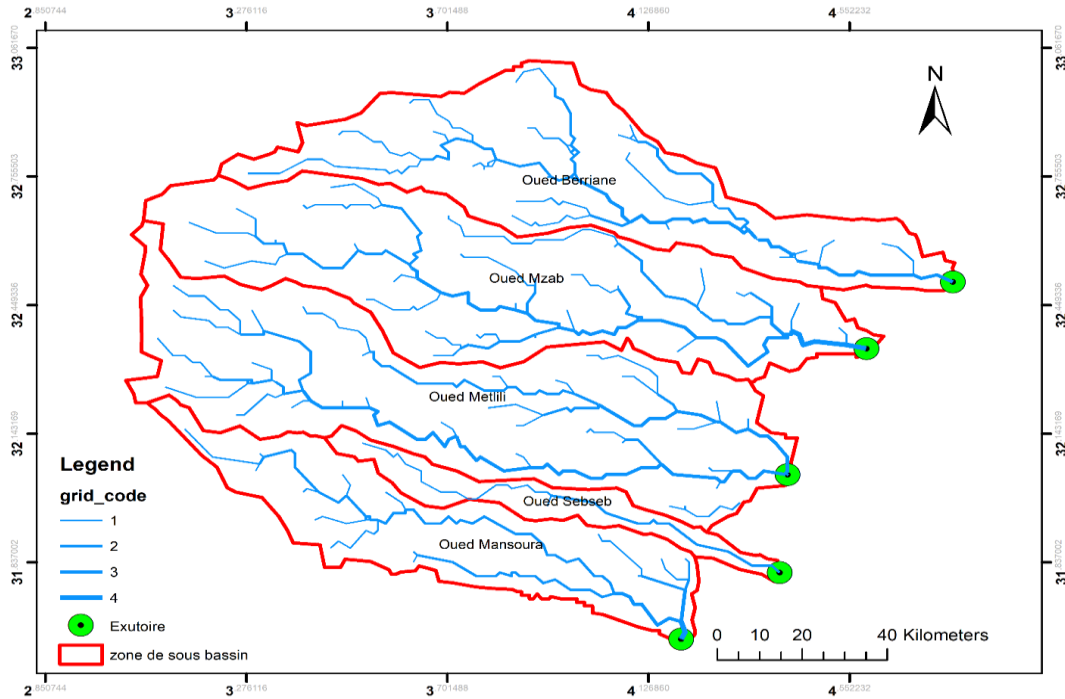


Figure I.14: Réseau hydrographique de la wilaya de Ghardaïa

I.6.1. Densité de drainage (D_d)

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité, et se trouve centralisé ; ces valeurs dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon *Shum*, la valeur inverse de la densité de drainage, ($C = 1/D_d$), s'appelle "*constante de stabilité du cours d'eau*" [7,8]. Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire (section du réseau). La densité de drainage est définie par:

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A} \dots\dots (km/km^2)$$

Où,

L_i : Longueur des talwegs en km ; A : surface du sous bassin (km^2).

Tableau I.10 : Calcul de la densité de drainage

	$\sum_{i=1}^n L_i$ (km)	A (km ²)	D _d (km/km ²)
Oued Berriane	3410.42	3302.79	1.032
Oued M'Zab	9249.25	4026.57	2.198
Oued Metlili	4152.2	4505.59	0.92
Oued Sebseb	1366.8	703.25	1.94
Oued Mansoura	2921.7	2254.74	1.295

I.6.2. Temps de concentration (T_C)

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe dans le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Il est exprimé par la formule de *Giandotti* suivante.

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1.54 * L_p}{0.8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

L_p : Longueur du talweg principal (km).

I.6.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (v_e)

Elle est donnée par l'expression suivante.

$$v_e = \frac{L_p}{T_C} \dots \dots (m/s)$$

Tableau I.11 : Calcul de la vitesse d'écoulement de l'eau et le temps de concentration

	L _p (km)	A (km ²)	H _{moy} (m)	H _{min} (m)	T _C (h)	v _e (m/s)
Oued Berriane	925.43	3302.79	31	11	7.71	33.34
Oued M'Zab	1642.61	4026.57	136	85	8.12	56.19
Oued Metlili	1557.97	4505.59	238	171	6.79	63.73
Oued Sebseb	922.30	703.25	370	343	6.12	41.86
Oued Mansoura	1766.71	2254.74	359	332	11.67	42.05

I.6.4. Densité hydrographique (F)

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

Elle est donnée par la relation :

$$F = \sum \frac{N_i}{A} \dots \dots (km^{-2})$$

N_i : nombre de cours d'eau.

Tableau I.12 : Calcul de la densité hydrographique

	ΣN_i	A (km ²)	F (km ⁻²)
Oued Berriane	32	3302.79	0.0096
Oued M'Zab	267	4026.57	0.066
Oued Metlili	29	4505.59	0.0064
Oued Sebseb	13	703.25	0.018
Oued Mansoura	30	2254.74	0.013

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques des sous bassins versants étudiés.

Tableau I.13 : Principales caractéristiques morphométriques des sous bassins versants étudiés

Paramètre	Unité	SBV 1	SBV 2	SBV 3	SBV 4	SBV 5
Aire (A)	km ²	3302.79	4206.57	4505.59	703.25	2254.74
Périmètre (P)	km	366.25	375.75	409.75	220.07	307.89
Indice de compacité (K _C)	/	1.78	1.62	1.71	2.32	1.82
Altitude maximale (H _{max})	m	42	161	282	398	376
Altitude minimale (H _{min})	m	11	85	171	343	332
Altitude moyenne (H _{moy})	m	31	136	238	370	359
Indice de pente globale (I _g)	m/km	0.015	0.037	0.055	0.044	0.017
Largeur du rectangle équivalent (I _r)	km	20.47	26.24	25.29	6.87	16.54
Longueur du rectangle équivalent (L _r)	km	161.36	160.30	178.13	102.39	136.31
Dénivelée (D)	m	24.96	60	98	45	23.25
Dénivelée spécifique (D _s)	m	8.6205	24	35.266	11.66	8.07
Altitude à 5% (H _{5%})	m	38	155	281	392	373.25
Altitude à 95% (H _{95%})	m	13.04	95	183	347	350
Densité de drainage totale (D _d)	km/km ²	1.032	2.198	0.92	1.94	1.295
Temps de concentration (T _C)	heure	7.71	8.12	6.79	6.12	11.67
Vitesse d'écoulement de l'eau (v _e)	m/s	33.34	56.19	63.73	41.86	42.05
Densité hydrographique (F)	km ⁻²	0.0096	0.066	0.0064	0.018	0.013

I.7. Conclusion partielle

La wilaya de Ghardaïa a 402921 habitants en 2018 et couvre une superficie de 24789 km², soit une densité de population de 16/habitant/km².

Le climat dominant est un climat désertique caractérisé par des hivers courts et rigoureux et des étés longs et chauds. Les températures sont très élevées peuvent dépassées 48 degrés en été.

L'étude morphométrique des sous bassins versants nous a permis de dire qu'ils présentent une forme allongée avec un relief très faible selon leurs indices de pente globale. Le réseau hydrographique est très développé contenant cinq Oueds principaux, à savoir, Oued Berriane, Oued M'Zab, Oued Metlili, Oued Sebseb et Oued Mansoura.

La principale ressource hydrique exploitée dans les régions de Ghardaïa est la nappe souterraine captive du continental intercalaire, par l'exécution de forages à des profondeurs variables selon les régions : 100 à 250 à El-Menia, 450 à 500 à Sebseb et Ghardaïa, et 900 à 1000 m à Zelfana et El Guerrara.

Chapitre II

Contexte géologique et hydrogéologique

Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous discuterons de l'importance des études géologiques et hydrogéologiques, qui sont des étapes essentielles pour comprendre le fonctionnement des systèmes naturels et assurer une gestion durable des ressources en eau.

Les études géologiques nous aident à comprendre les propriétés du sol et les changements qui se sont produits au fil du temps. Ils nous permettent également de comprendre comment l'eau s'infiltré, se déplace et est stockée sous terre.

L'hydrogéologie s'intéresse à la distribution et au mouvement des eaux souterraines dans différents types de roches et de sols. Cela dépend de deux propriétés : la porosité et la perméabilité ; l'emplacement des réservoirs souterrains et la relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Comprendre ce contexte est essentiel pour évaluer la disponibilité de l'eau, prévenir les risques de contamination ou de surexploitation des eaux souterraines et guider les décisions liées à la planification, au forage ou à la protection des ressources en eau.

II.2. Géologie générale de la wilaya de Ghardaïa

La wilaya de Ghardaïa est située sur le rebord occidental d'une très vaste structure géologique appelée la cuvette Nord orientale du Sahara maghrébin. L'étude des structures géologiques de cette cuvette montre que les terrains affleurant dans la partie centrale de la wilaya correspondent à l'aboutissement d'une série de transgressions et de régressions marines : les périodes marines ont générées des terrains calcaires, tandis que les périodes continentales ont donné des sables et des grès qui constituent des réservoirs potentiels pour les eaux souterraines. Le réservoir le plus connu étant le Continental Intercalaire (CI) dont l'étage albien constitue la partie supérieure.

Du fait de la structure des terrains qui présentent une alternance de zones dures et de zones plus tendres, on a des vallées à versants raides taillées dans les calcaires et des fonds de vallées plats. Cette disposition a permis le développement d'un réseau hydrographique très ramifié [9].

La région de Ghardaïa est faiblement tétanisée par rapport aux zones nordiques du pays. Toutefois, la présence de failles anciennes et de structures tabulaires légèrement plissées peut influencer [10-13] :

- Le sens d'écoulement des eaux souterraines.
- Les zones de recharge préférentielles.
- Les communications hydrauliques entre nappes.

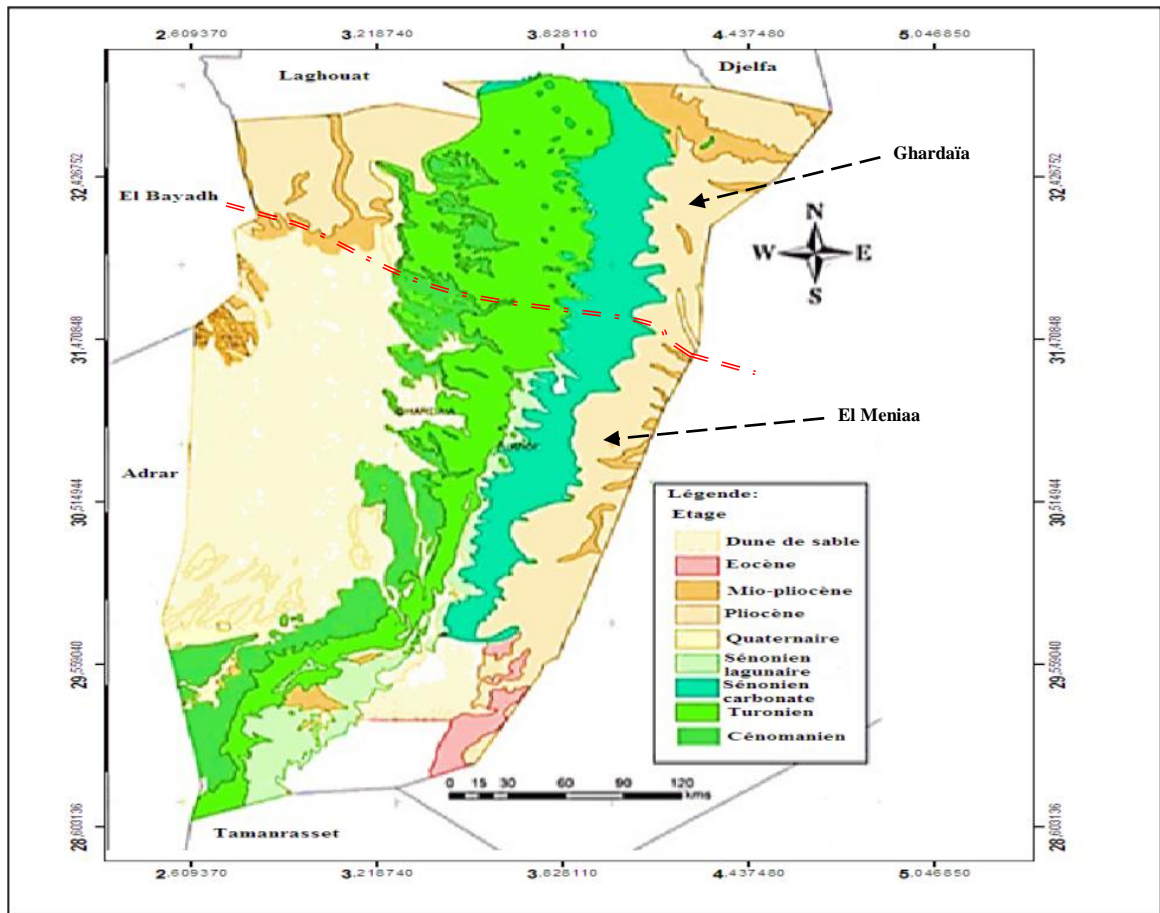


Figure II.1 : Carte géologique de Ghardaïa et d'El Meniaa

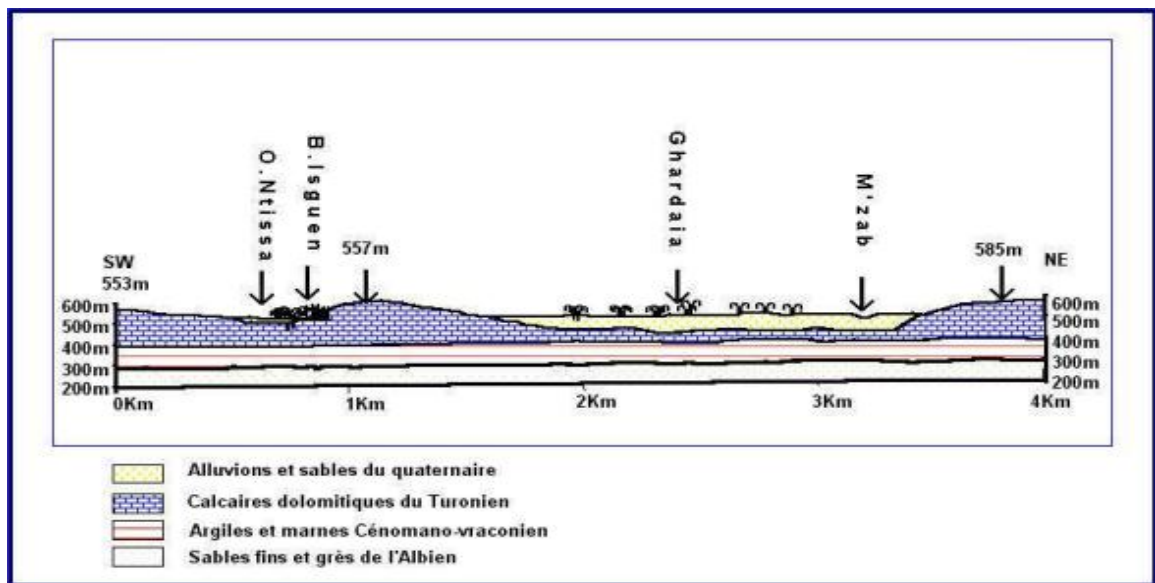


Figure II.2 : Exemple d'une coupe géologique et schématique de la vallée du M'Zab
(Source ANRH)

II.2.1. Trias

A l'exception de ses affleurements au sud tunisien à la Jeffara, on pensait que la mère triasique n'a pas atteint le Sahara. Ce n'est qu'à l'occasion d'un sondage de prospection exécuté à Berriane (Nord de Ghardaïa) en 1953, puis un autre sondage réalisé à Hasi R'mel en 1956, ont révélé son existence à une profondeur de 2200 m. Il correspond à des dépôts épais de grès perméable d'environ de 500 m d'épaisseur, surmontés par une puissante série salifère de 500 m, composée de sel gemme, d'anhydrite, de dolomite et d'argile. Le Trias s'étend dans tout le bassin et repose sur une surface de pédiplanation du socle primaire [14].

II.2.2. Jurassique

Ses limites inférieures et supérieures ne sont repérées que sur les diagraphies. Il est formé essentiellement de bancs de calcaires et de calcaires dolomitiques à fossiles. Au sondage de Berriane (1953), il a été recoupé sur une épaisseur de 689 m [10,14].

II.2.3. Crétacé inférieur

Affleurant seulement aux bordures du bassin du bas-Sahara ; Tademaït et Tinhret au Sud et Sud-Est, à l'Ouest formant la dorsale du M'zab, et plus loin sous les dunes du Grand Erg occidental. À l'Est, il forme les massifs du Dahar en Tunisie et Djebel Nefusa en Lybie. Il a été recoupé dans tous les sondages exécutés dans le bassin du bas-Sahara. Il correspond à une énorme série détritico-fluvio-deltaïque de 200 à 1100 m d'épaisseur (Fig. II.3).

En partant des séries les plus anciennes, le Crétacé inférieur comprend :

- *Néocomien*
- *Barrémien*
- *Aptien*
- *Albien*.

II.2.4. Crétacé supérieur

Cette période est marquée par la prédominance de dépôts carbonatés de calcaires et calcaires dolomitiques à faune benthique (Fig. II.3), invoquant une transgression marine. Le Crétacé supérieur comprend :

- *Cénomannien*
- *Turonien*
- *Sénonien (Sénonien inférieur lagunaire, Sénonien supérieur carbonaté)*.

II.2.5. Tertiaire

En continuité lithologique avec le Crétacé supérieur, l'homogénéité de faciès rend délicat la séparation. L'Eocène marque la fin du dernier épisode marin du Sahara [10-12,14]. Il comprend :

- *Eocène inférieur*

- Eocène moyen
- Mi-Pliocène
- Pliocène continental (Croute calcaire saharienne).

II.2.6. Quaternaire

Dépôt détritique de remblaiement constitué de sables fin à moyen parfois gypseux. Au centre du bas-Sahara, l'ensemble est surmonté par une formation argilo-sableuse et gypseuse qui résulte d'une sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes des chotts [10-12,14].

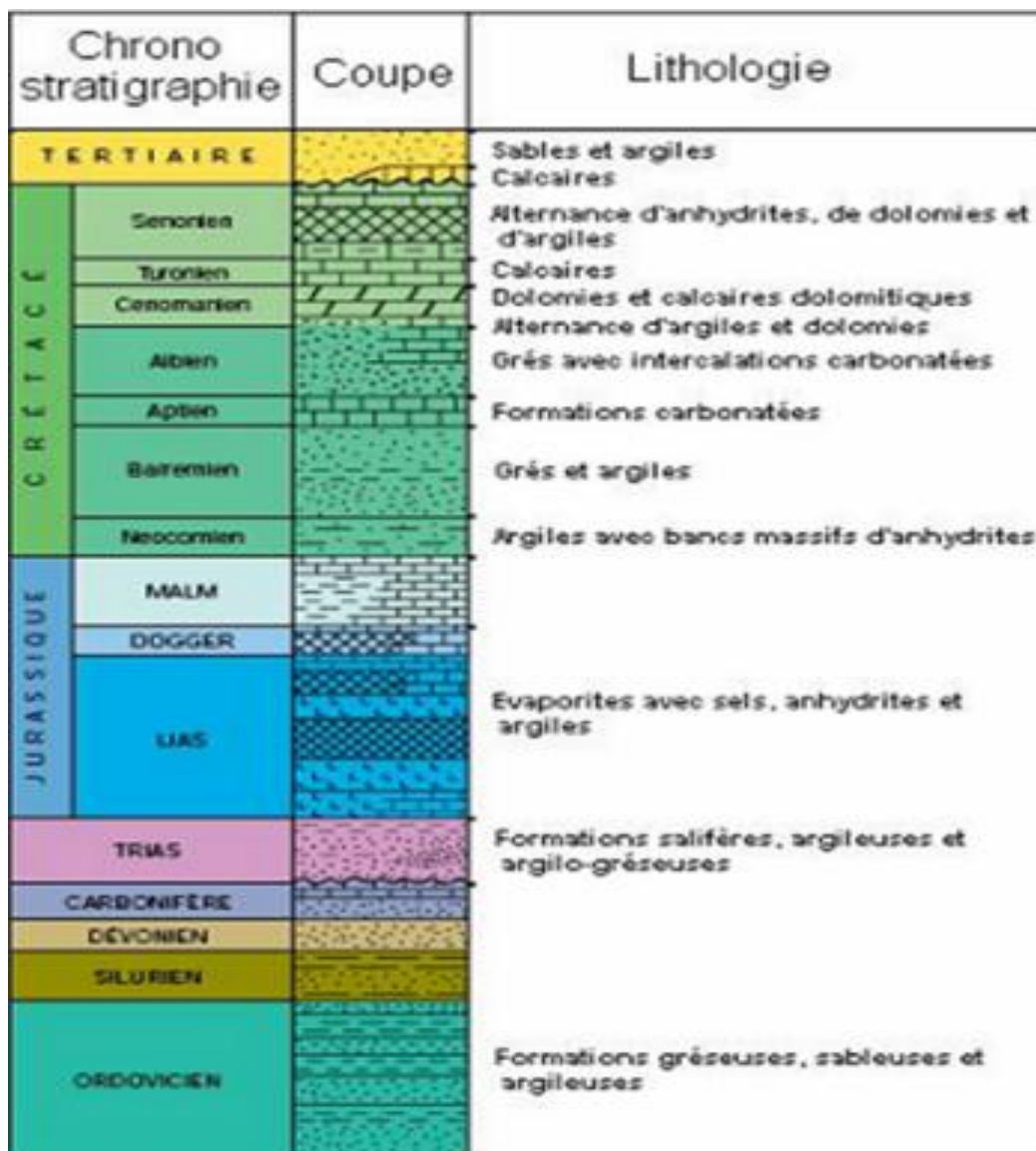


Figure II.3 : Colonne stratigraphique synthétique du bassin Sahara Septentrional (SASS)

II.3. Hydrogéologie générale de la wilaya de Ghardaïa

Les eaux souterraines constituent la principale ressource de la région. Elles sont contenues dans deux types d'aquifères : les eaux souterraines superficielles d'inféro-flux, situées dans les alluvions des vallées des Oueds de la région. Leur recharge est fortement liée aux précipitations. La profondeur du niveau d'eau varie entre 10 et 30 m. Ces aquifères sont captés par des centaines de puits traditionnels et servent principalement à irriguer les palmeraies des vallées. Le deuxième type d'aquifère présent dans la zone d'étude est l'eau souterraine profonde captive de l'aquifère albien de la région. Selon l'altitude de la zone et la variation de l'épaisseur des formations après le niveau Albien, cet aquifère est jaillissant et admet des pressions en tête de puits dans les zones nord-est et sud-est, et est exploité par pompage à des profondeurs allant de 0.5 m à 140 m dans la zone centrale et occidentale. L'impact de la forte exploitation de cet aquifère se traduit généralement par la disparition de l'artésianisme dans certaines zones et un rabattement considérable des zones de pompage. À l'échelle hydrogéologique, cela peut conduire à une interférence plus sensible avec les couches environnantes et au risque de dégradation de la qualité chimique par le biais de charges différentielles et de la nature lithologique de la roche environnante [11,13,15,16].

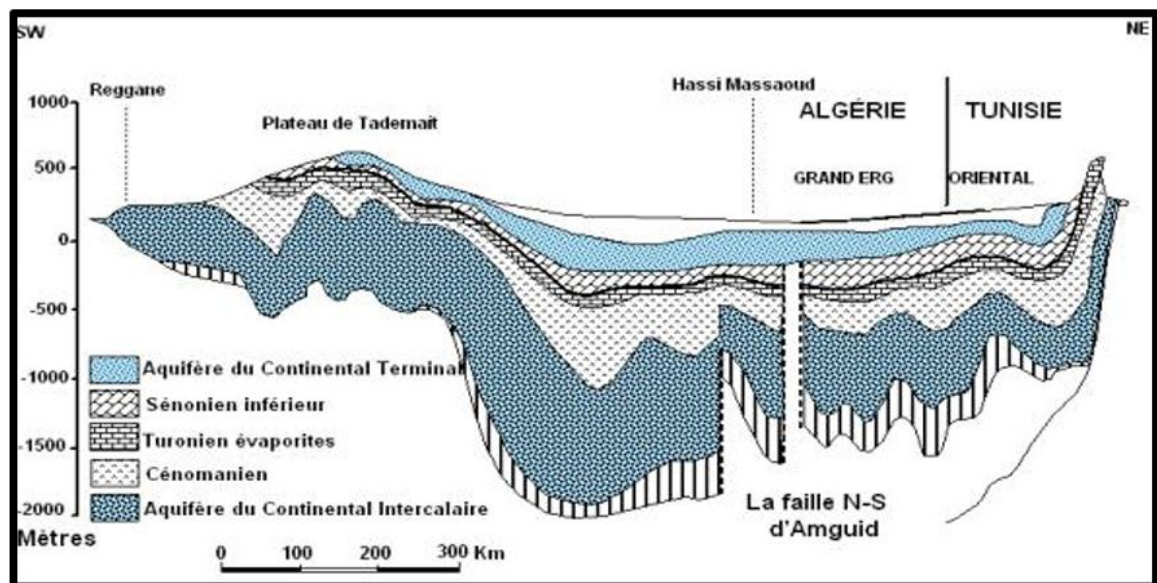


Figure II.4: Coupe hydrogéologique NE-SW du bassin SASS

II.3.1. Interactions entre les aquifères

Bien que séparés par des couches semi-perméables, des échanges verticaux peuvent exister entre le Continental Intercalaire (CI) et le Continental Terminal (CT) dans certaines zones, particulièrement là où la couverture argileuse est fracturée ou discontinue. Ces échanges influencent la composition chimique des eaux du CT, qui peut être enrichie par remontée d'eau plus minéralisée [16].

II.3.2. Problématiques hydrogéologiques

- **Surexploitation:** L'extraction intensive des eaux souterraines, en particulier pour l'agriculture (irrigation des palmeraies) entraîne une baisse piézométrique significative, notamment dans le CT.
- **Pollution:** Le CT, plus proche de la surface, est vulnérable à la pollution par les nitrates, les pesticides, les eaux usées domestiques et les infiltrations industrielles.
- **Salinisation :** Dans certaines zones, l'évaporation intense combinée à une mauvaise gestion de l'irrigation favorise l'accumulation de sels dans le sol et les eaux souterraines [16].

II.4. Etude hydrochimique des eaux des forages

II.4.1. Paramètres de qualité des eaux

II.4.1.1. Paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques correspondent à l'évaluation de la qualité d'un produit, notamment l'eau, à l'aide des sens humains, principalement la couleur, l'odorat et le goût [7,17].

a) La couleur

La coloration d'une eau peut être soit d'origine naturelle, soit associée à sa pollution. Elle est donc très souvent synonyme de la présence des composés dissous. D'une manière plus simple, une estimation de la couleur peut être déduite de l'examen visuel de l'échantillon placé dans un récipient large et incolore.

b) L'odeur

L'odeur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles, la qualité de cette sensation particulière provoquée par chacune de ces substances.

c) Le goût

Le goût peut être défini comme l'ensemble des sensations gustatives, et de sensibilité chimique commune perçue lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche, la propriété des produits provoquant ces sensations. La saveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation, par certaines substances solubles des bourgeons gustatifs. La qualité de cette sensation particulière est provoquée par ces substances.

II.4.1.2. Paramètres physicochimiques

a) Température

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle exprime la fraîcheur de l'eau ; la température optimale se situe entre 9 et 12 °C. La norme ne doit pas dépasser 25 °C.

- Les eaux très profondes ont une température de 25 °C
- Les eaux de surface ont des températures entre 0 et 25 °C.

b) pH

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ ou H_3O^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Tableau II.1 : Classification des eaux d'après leur pH

pH < 5	Acidité forte \Rightarrow présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
7 < pH < 8	Neutralité approchée \Rightarrow majorité des eaux de surface
5.5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines

c) Minéralisation

Elle est un processus de transformation de certains éléments (azote, soufre...) en substances minérales dissoutes (nitrates, sulfates...). La détermination de la minéralisation d'une eau est la mesure de la concentration de cette eau en sels solubles. Les eaux peuvent être classées comme suit :

Min. (mg/L)	très faible	faible	moyenne	forte	Très forte
Résistivité η ($\Omega.cm$)	> 10000	3000 < η < 5000	1500 < η < 3000	1000 < η < 1500	η < 1000

d) Le titre en Sel d'Acide Fort (SAF)

Il est la somme des teneurs en chlorures, sulfates et nitrates.

$$SAF = [Cl^-] + [SO_4^{2-}] + [NO_3^-]$$

e) Ions majeurs

La minéralisation de la plupart des eaux est dominée par huit (8) ions appelés couramment les ions majeurs. On distingue

- les **cations** : Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+) et Potassium (K^+)
- les **anions** : Chlorure (Cl^-), Sulfate (SO_4^{2-}), Nitrate (NO_3^-) et Bicarbonate (HCO_3^-).

f) Autres éléments dissous : Le fer, le fluor, l'aluminium.

g) La dureté

La dureté d'une eau est déterminée par la présence d'ion calcium et magnésium. Lorsque ces deux ions sont présents en forte concentration, l'eau est dite dure. Dans le cas contraire, elle est dite douce. Lorsque une eau dure est chauffée, on observe l'apparition d'un précipité : il s'agit du tartre ou calcaire.

La dureté des eaux naturelles dépend largement de la nature du sol d'où elles proviennent. Les eaux issues de terrains formés de grès, de granit sont souvent très douces alors que celles des sols calcaires, gypseux sont souvent très dures. Cette dureté s'exprime en degré hydrotimétrique.

Par définition, un degré hydrotimétrique ($^{\circ}\text{TH}$) correspond à une concentration en ions (Ca^{2+}) et (Mg^{2+}) égale à 10^{-4} mol/L. Un degré hydrotimétrique correspond aussi à un degré français ($^{\circ}\text{F}$).

On distingue :

- **La dureté totale ou le titre hydrotimétrique (TH)**: correspond à la somme des concentrations en $[\text{Ca}^{2+}]$ et $[\text{Mg}^{2+}]$.
- **La dureté calcique (D_{Ca})**: correspond à la teneur globale en ions Ca^{2+} .
- **La dureté magnésienne (D_{Mg})**: correspond à la teneur en ions Mg^{2+} .
- **La dureté carbonatée ou le titre alcalimétrique complet (TAC)**: c'est la somme des alcalinités carbonatée et bicarbonatée.
- **La dureté permanente (P)**: c'est la dureté qui persiste après ébullition prolongée de l'eau, elle est égale à $(\text{TH} - \text{TAC})$ et correspond à l'association des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} avec les anions Cl^- , SO_4^{2-} ou NO_3^- .
- **La dureté temporaire (D_t)**: elle est égale à $(\text{TH} - \text{P})$ et correspond à la combinaison des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} avec les ions HCO_3^- , CO_3^{2-} et OH^- . Cette dureté est éliminée par ébullition de l'eau.

On utilise la classification suivante :

TH ($^{\circ}\text{F}$)	0 – 7,5	7,5 - 15	15 - 30	30 – 50	> 50
Eau	Très douce	douce	Moyennement dure	dure	Très dure

h) L'alcalinité

L'alcalinité (basicité) d'une eau peut être définie comme la capacité des milieux aqueux à réagir avec les ions H_3O^+ . Elle est due à la présence des ions bicarbonates (hydrogénocarbonates) HCO_3^- , carbonates CO_3^{2-} et hydroxydes OH^- [17].

L'alcalinité est mesurée par un dosage avec un acide fort (acide chlorhydrique HCl ou sulfurique H_2SO_4). Par convention, on exprime ce résultat par le Titre Alcalimétrique (TA) et par le Titre Alcalimétrique Complet (TAC).

Le TA correspond à la mesure des teneurs en ions hydroxydes et de la moitié des carbonates.

Le TAC indique globalement les teneurs en ions hydroxydes, carbonates et bicarbonates.

II.4.1.3. Indicateurs biologiques

Une eau de consommation ne doit renfermer aucun germe pathogène. Les deux groupes de microorganismes les plus utilisés comme indicateurs de contamination bactérienne sont : Les coliformes totaux et les coliformes fécaux.

Germes tests : ce sont les principaux germes faciles à isoler et à dénombrer. Utilisées pour apprécier la qualité bactériologique de l'eau. Les plus connus sont :

- Escherichia coli - Streptocoques fécaux - Clostridium sulfitoréducteurs.

II.4.2. Normes de potabilisation

Le tableau ci-après nous résume les normes algériennes de potabilisation des eaux de consommation humaine [18].

Tableau II.2 : Normes Algériennes de potabilisation (*Journal officiel N° 18 – 23 mars 2011*)

Paramètre	Valeur limite
A. Paramètres organoleptiques	/
- Couleur	20 mg (Co-Pt)/L
- Turbidité	5 NTU
- Odeur et Saveur	absence
B. Paramètres physico-chimiques	/
- Température	25 °C
- pH	6.5 - 8.5
- Conductivité	2800 µS/cm à 23 °C
- Chlorures Cl ⁻	200 mg /L
- Sulfates SO ₄ ²⁻	200 mg /L
- Magnesium Mg ²⁺	150 mg/L
- Sodium Na ⁺	200 mg/L
- Potassium K ⁺	20 mg/L
- Calcium Ca ²⁺	200 mg/L
- Aluminium Al ³⁺	0.2 mg/L
- Dureté totale TH	50 °F
- Résidu sec à 105 °C	2 g/L
- Minéralisation	2 g/L
<u>Paramètres concernant les substances indésirables</u>	/
- Nitrates NO ₃ ⁻	50 mg/L
- Nitrite NO ₂ ⁻	0.1 mg/L
- Ammonium NH ₄ ⁺	0.5 mg/L
- NTK (Kjeldahl)	2 mg/L
- Matières organiques M.O	5 mg/L
- Hydrogène Sulfuré H ₂ S	0.02 µg/L (absence d'odeur)
- Hydrocarbures	10 µg/L
- Phénols	0.5 µg/L (absence)
- Fer Fe ²⁺	0.2 mg/L
- Manganèse Mn ²⁺	0.5 mg/L
- Cuivre Cu ²⁺	1 mg/L
- Phosphate PO ₄ ³⁻	0.5 mg/L
- Zinc Zn ²⁺	0.05 mg/L
- Fluor F ⁻	2 mg/L
- Argent Ag ⁺	50 µg/L = 0.05 mg/L
<u>Paramètres concernant les substances toxiques</u>	/
- Arsenic As ³⁺	50 µg/L = 0.05mg/L
- Cadmium Cd ²⁺	5 µg/L = 0.005 mg/L
- Sélénium Se ²⁻	5 µg/L = 0.005 mg/L
- Cobalt Co ³⁺	50 µg/L = 0.05 mg/L
- Chrome hexavalent Cr ⁺⁶	1 µg/L
- Mercure Hg ²⁺	1 µg/L

- Nickel Ni ²⁺	50 µg/L
C. Paramètres Bactériologiques	/
- Escherichia Coli	- absence dans 50 ml (eau non traitée) - absence dans 100 ml (eau traitée)
- Streptocoques fécaux	
- Clostridium Sulfitoréducteurs	- absence dans 50 ml (eau traitée) - absence dans 20 ml (eau non traitée)

II.4.3. Normes d'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation varie en fonction de la nature et de la quantité des sels dissous. L'augmentation de la teneur en sels est à l'origine de plusieurs problèmes pour le sol et les plantes. Les problèmes les plus rencontrés sont associés à la salinité, sodicité, toxicité spécifiques de certains ions et d'autres problèmes liés à l'excès d'azote et aux bicarbonates [19].

Tableau II.3 : Normes Algériennes des eaux d'irrigation (Journal officiel N° 41 – 15 juillet 2012)

Paramètre	Valeur limite
- pH	6.5 - 8.5
- Conductivité	3000 µS/cm à 25 °C
- Chlorures Cl ⁻	350 mg /L
- Sulfates SO ₄ ²⁻	300 mg/L
- Calcium Ca ²⁺	/ (200 mg/L - Normes européenne)
- Sodium Na ⁺	/ (200 mg/L - Normes européenne)
- Potassium K ⁺	/ (20 mg/L - Normes européenne)
- Nitrates NO ₃ ⁻	30 mg/L
- Bicarbonates HCO ₃ ⁻	500 mg/L
- Fer Fe ²⁺	5 mg/L
- Manganèse Mn ²⁺	10 mg/L
- SAR	< 10

SAR = Sodium Absorption Ratio (coefficient d'absorption du sodium).

II.4.4. Caractéristiques des points d'eau étudiés

La nature chimique et la concentration des eaux souterraines dépendent en partie des propriétés des eaux de la recharge des nappes, mais surtout des processus physicochimiques qui existent dans l'aquifère. Ces processus augmentent ou diminuent la concentration des substances dissoutes dans l'eau le long de son écoulement souterrain. Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs.

Les données physicochimiques utilisées pour évaluer la variation spatiale de la qualité des eaux souterraines de la wilaya de Ghardaïa, sont les moyennes des résultats des analyses effectuées durant 2018 sur l'eau de soixante-et-onze (71) forages (Fig. II.5).

Les données exploitées ont été recueillies de la littérature [20] et de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de Ouargla. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes.

Tableau II.4: Inventaire et caractéristiques des points d'eau

Forage	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	TH (°F)	Remarque
Norme	200	150	200	20	500	200	200	50	Potable
1	142,68	74,840	182	12,50	126	439,600	487,6800	66	Mauvaise
2	120,24	98,172	240	11,25	126	330,421	646,9566	70	Mauvaise
3	158,71	86,500	181,81	12,00	213,17	0,000	462,7500	75	Mauvaise
4	165,12	69,980	225	13,75	178,12	458,050	617,3250	70	Mauvaise
5	157,11	62,208	287,5	11,25	148	401,320	479,6700	65	Mauvaise
6	181,16	68,040	281,25	10,00	197,64	458,052	382,3290	73	Mauvaise
7	139,47	90,390	195,45	13,75	192,76	397,070	601,6860	72	Mauvaise
8	144,28	80,670	190,9	13,75	207,4	404,160	418,5460	69	Mauvaise
9	173,14	94,250	177,27	13,75	201,96	341,220	617,3200	82	Mauvaise
10	147,49	85,530	190,9	13,75	185,14	375,801	493,8600	72	Mauvaise
11	160,32	66,090	376,32	11,25	207,4	409,830	518,5500	67	Mauvaise
12	110,62	48,600	195,45	10,00	178,12	276,530	452,7050	48	Moyenne
13	112,22	41,790	380,77	13,75	207,4	241,080	658,4800	45	Moyenne
14	157,11	43,740	235	11,25	163,48	351,690	535,0150	57	Mauvaise
15	100,32	62,400	373,08	10,00	163,48	409,830	617,3250	51	Mauvaise
16	189,17	71,600	384,62	12,50	168,36	482,160	617,3250	77	Mauvaise
17	144,28	42,760	300	12,50	207,4	374,380	395,0800	54	Mauvaise
18	150,70	87,480	158,461	15,00	187,88	241,080	535,0150	74	Mauvaise
19	80,06	45,680	128,57	12,50	207,4	212,710	288,0850	39	Moyenne
20	147,49	46,650	240	11,25	163,48	340,340	411,5500	56	Mauvaise
21	160,32	68,040	150	21,00	268,64	282,200	568,4700	68	Mauvaise
22	74,55	73,870	220	10,00	178,12	110,613	536,2500	49	Moyenne
23	115,43	52,480	351,62	8,75	185,44	277,950	740,7900	50	Mauvaise
24	131,58	53,260	190,91	16,66	176,31	0,000	493,8600	55	Mauvaise
25	134,66	58,320	220	17,50	181,63	248,171	411,5500	58	Mauvaise
26	125,85	56,376	190,909	12,50	153	356,180	490,1500	55	Mauvaise
27	134,66	58,320	275	17,50	176,31	414,090	493,8600	58	Mauvaise
28	125,04	45,680	186,36	16,67	153	306,310	321,0090	50	Mauvaise
29	121,84	59,290	240	18,33	184,63	351,690	407,1340	55	Mauvaise
30	128,26	38,880	209,6	16,67	184,63	351,690	370,3950	48	Mauvaise
31	129,85	62,208	209,6	16,67	176,31	356,180	464,2300	58	Mauvaise
32	131,46	57,340	250	18,33	184,63	416,920	415,6600	56	Mauvaise
33	128,25	51,030	210	15,00	184,63	356,180	416,4880	53	Mauvaise
34	125,05	59,292	209,6	16,67	176,31	300,641	464,2300	56	Mauvaise
35	147,49	47,490	240	17,50	184,63	422,590	403,3190	56	Mauvaise
36	134,66	58,320	275	17,50	153	414,090	493,8600	58	Mauvaise
37	136,27	48,600	222,222	17,50	190,32	418,340	478,6300	54	Mauvaise
38	125,04	42,760	205	12,50	184,63	347,430	386,8570	49	Mauvaise
39	136,27	48,600	260	17,50	190,32	439,610	369,1600	54	Mauvaise
40	120,24	65,124	168,182	18,33	153	241,080	370,4000	57	Mauvaise
41	160,32	35,960	238,889	16,67	173,24	446,700	444,4700	55	Mauvaise
42	115,43	30,132	110	5,00	149,5	134,721	300,0190	41	Moyenne
43	144,29	48,600	180	11,25	140,8	164,501	467,5208	56	Mauvaise

44	112,22	29,160	135,12	8,52	149,5	173,010	411,1384	40	Mauvaise
45	104,21	69,012	166,667	13,75	180,6	161,665	480,2788	54	Mauvaise
46	125,04	51,510	142,85	7,50	136,99	265,750	433,5800	52	Mauvaise
47	158,72	56,376	191,428	6,25	142,69	249,589	594,2780	63	Mauvaise
48	117,03	53,460	168,18	7,50	138,27	265,990	433,5800	51	Mauvaise
49	128,65	52,640	205	6,25	140,06	253,350	511,5200	54	Mauvaise
50	125,05	60,264	197,428	8,75	137,25	205,627	725,1510	56	Mauvaise
51	128,26	82,620	158,461	6,25	132,95	143,230	609,9170	66	Mauvaise
52	121,84	67,060	177,272	11,25	141,22	268,370	617,3200	58	Mauvaise
53	163,52	64,150	225	11,25	142,29	241,080	740,7900	67	Mauvaise
54	105,81	50,540	153,85	5,00	129,5	268,020	450,2360	47	Mauvaise
55	141,28	66,090	190,9	11,25	106,14	375,800	534,1920	62	Mauvaise
56	152,30	59,292	245	10,00	140,88	307,210	549,4190	62	Mauvaise
57	126,65	65,120	197,14	5,00	27,6	285,040	751,0790	58	Mauvaise
58	128,25	61,230	250	10,00	131,04	248,171	609,5000	57	Mauvaise
59	144,28	58,320	190,9	11,25	200,08	221,226	581,1090	60	Mauvaise
60	110,62	55,400	177,27	8,75	138,54	221,226	515,2600	50	Mauvaise
61	91,38	35,960	152,3	10,00	187,88	233,990	338,2900	38	Moyenne
62	110,62	45,680	135,75	16,67	231,8	245,330	329,2400	46	Moyenne
63	96,19	54,430	168,181	12,50	187,88	258,100	205,7750	46	Moyenne
64	88,17	52,480	107,14	16,67	231,8	241,080	154,3300	44	Potable
65	91,38	38,880	107,14	13,75	224,48	232,570	172,8510	39	Potable
66	161,92	70,950	380,77	12,50	195,2	445,280	535,0150	70	Mauvaise
67	163,52	69,980	250	13,75	217,16	432,520	452,6975	70	Mauvaise
68	109,01	52,480	240	12,50	219,6	319,070	275,7300	49	Mauvaise
69	168,33	49,570	281,25	22,00	244	482,160	535,0000	62	Mauvaise
70	166,73	75,810	55,56	12,50	268,4	163,080	535,0000	73	Mauvaise
71	163,52	68,040	357,69	12,50	219,6	513,350	370,3950	69	Mauvaise

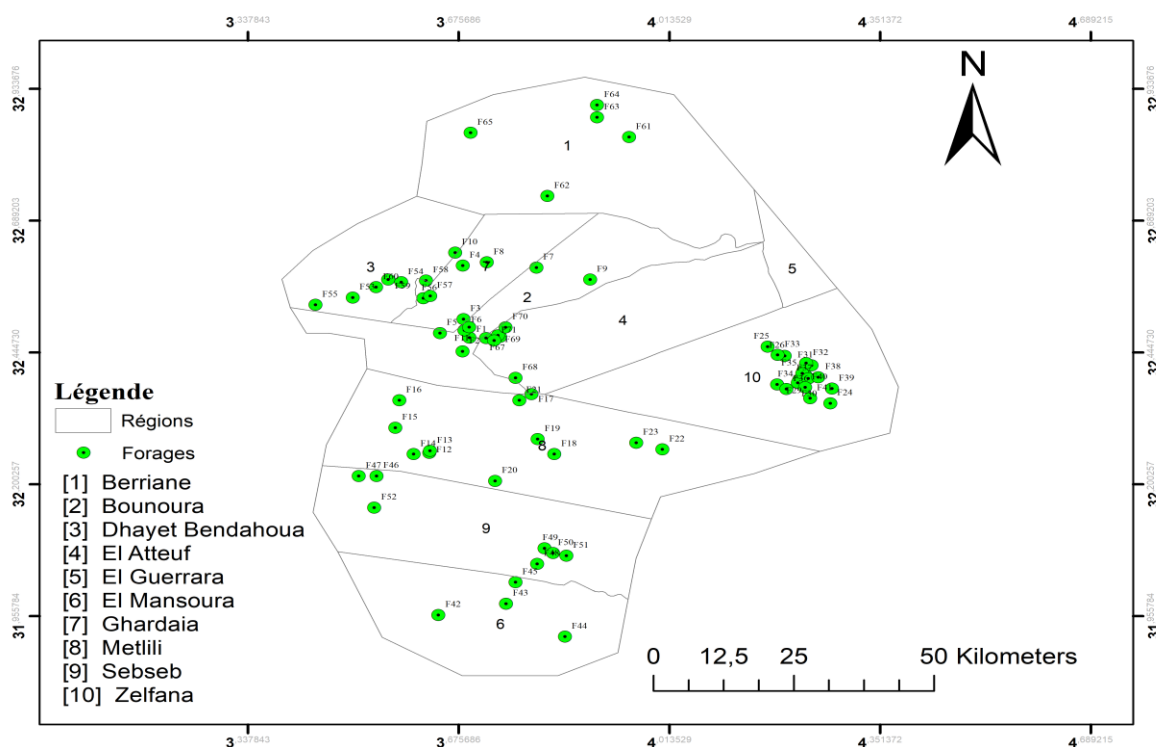


Figure II.5 : Carte de positionnement des forages étudiés

II.5. Calcul de la balance ionique

Avant de traiter et d'interpréter les analyses des eaux prélevées au niveau des différents forages, il faut analyser leur fiabilité. La méthode utilisée est la balance ionique (BI).

$$BI = \frac{|\sum(\text{Cation}) - \sum(\text{Anion})|}{\sum(\text{Cation}) + \sum(\text{Anion})} \cdot 100$$

Les concentrations des cations et des anions sont exprimées en méq/L (milliéquivalent/litre).

Cette relation permet de définir trois classes [7,21].

- **BI < 5 %** : la fiabilité des analyses est excellente.
- **5 ≤ BI < 10** : la fiabilité des analyses est acceptable
- **10 ≤ BI** : la fiabilité des analyses est douteuse (mauvaise).

Le calcul de cet indice nous a donné les résultats suivants.

Tableau II.5: Balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude

Forage	Somme des cations (méq/L)	Somme des anions (méq/L)	Balance ionique BI (%)	Fiabilité des analyses
1	22	25	7	Acceptable
2	25	25,119	1	Excellente
3	23	25,452	5	Acceptable
4	24	28,964	9	Acceptable
5	26	23,817	4	Excellente
6	27	24,409	5	Acceptable
7	23	27,09	8	Acceptable
8	22	23,684	3	Excellente
9	24	26,104	3	Excellente
10	23	24,231	2	Excellente
11	30	25,989	7	Acceptable
12	18	20,376	5	Acceptable
13	26	24,15	4	Excellente
14	22	23,897	4	Excellente
15	27	27,333	1	Excellente
16	32	29,461	5	Acceptable
17	24	22,44	4	Excellente
18	22	21,233	2	Excellente
19	14	15,604	7	Acceptable
20	22	20,998	2	Excellente
21	21	24,057	8	Acceptable
22	20	17,244	6	Acceptable
23	27	26,542	1	Excellente
24	20	23,74	9	Acceptable
25	22	18,755	7	Acceptable
26	20	22,884	7	Acceptable

27	24	24,585	2	Excellente
28	19	17,964	2	Excellente
29	22	21,562	1	Excellente
30	19	20,791	4	Excellente
31	21	22,735	4	Excellente
32	23	23,573	2	Excellente
33	20	21,906	4	Excellente
34	21	21,196	1	Excellente
35	22	23,476	3	Excellente
36	24	24,603	1	Excellente
37	21	24,923	9	Acceptable
38	19	21,04	5	Acceptable
39	23	23,265	2	Excellente
40	19	17,185	5	Acceptable
41	22	24,799	6	Acceptable
42	13	12,739	2	Excellente
43	19	16,936	7	Acceptable
44	14	15,891	6	Acceptable
45	18	17,783	2	Excellente
46	17	18,993	6	Acceptable
47	21	22,055	2	Excellente
48	18	19,031	3	Excellente
49	20	20,317	1	Excellente
50	20	23,483	9	Acceptable
51	20	19,177	3	Excellente
52	20	22,97	8	Acceptable
53	24	24,556	2	Excellente
54	16	19,341	9	Acceptable
55	21	23,728	6	Acceptable
56	23	22,725	1	Excellente
57	20	24,456	9	Acceptable
58	23	21,838	2	Excellente
59	21	21,899	3	Excellente
60	18	19,239	3	Excellente
61	14	17,001	8	Acceptable
62	16	17,876	7	Acceptable
63	17	14,778	7	Acceptable
64	14	13,972	1	Excellente
65	13	14,041	5	Acceptable
66	31	27,164	6	Acceptable
67	25	25,408	1	Excellente
68	21	18,603	5	Acceptable
69	25	28,97	7	Acceptable
70	17	20,162	8	Acceptable
71	30	26,066	6	Acceptable

II.6. Analyse spatiale des cartes hydrochimiques

II.6.1. Aperçu général sur la méthode d'interpolation spatiale dans le SIG

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points inconnus, en raison du coût élevé et des ressources limitées, la collecte de données est généralement menée que dans un nombre limité d'emplacement de points sélectionnés. Dans les SIG (Systèmes d'information géographique), l'interpolation spatiale de ces points peut être appliquée pour générer une carte continue, une méthode d'interpolation adaptée doit être utilisée pour estimer de manière optimale les valeurs à ces endroits où aucun des échantillons ou mesures ont été pris. Les résultats de l'analyse d'interpolation peuvent ensuite être utilisés pour les analyses qui couvrent la zone entière et pour la modélisation [8,21].

Un logiciel SIG met généralement à disposition des outils d'analyse spatiale permettant le calcul de statistiques sur les entités géographiques ainsi que l'exécution d'opérations de géo traitement, telles que l'interpolation des données. Parmi les différentes méthodes d'interpolation existantes, nous avons opté pour la méthode de krigeage. Ce choix est motivé par le fait que le Krigeage est une méthode puissante permettant non seulement d'estimer des valeurs inconnues, mais aussi de quantifier l'incertitude associée à ces estimations. Son efficacité dépend fortement de la qualité du modèle de variogramme choisi. C'est un outil incontournable en géostatistique, notamment dans les domaines de la géologie, de l'hydrogéologie et de l'environnement.

II.6.2. Le krigeage

Le krigeage, concept fondamental développé par *Georges Matheron* à partir des travaux de *D.G. Krige*, constitue une méthode d'estimation géostatistique linéaire. Elle vise à estimer la valeur d'une variable régionalisée en un point non échantillonné, en minimisant la variance de l'erreur d'estimation tout en garantissant l'absence de biais. Cette méthode repose sur une modélisation spatiale des données via le variogramme ou la fonction de covariance [8,21]. Un variogramme est une représentation de la variance entre deux points en fonction de la distance. Il nous informe sur la portée du phénomène et sa continuité, ainsi que la corrélation spatiale [8].

II.6.3. Formule de krigeage

Le krigeage est comparable à l>IDW (Inverse Distance Weighting) dans la mesure où il déduit, par pondération des relevés existants, les valeurs probables d'emplacements non métrés. La formule générale utilisée par les deux méthodes d'interpolation consiste en une somme pondérée des données:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Où :

$Z(s_i)$: valeur mesurée à l'emplacement i

λ_i : pondération inconnue de la valeur relevée à l'emplacement i

S_0 : emplacement de prévision

N : nombre de valeurs relevées.

II.7. Les cartes de la répartition spatiale hydrochimique

II.7.1. Titre hydrotimétrique (TH)

L'analyse de la carte des teneurs de la dureté totale montre des valeurs élevées à très élevées, enregistrées au centre et au centre-sud de la zone d'étude (F4-F9, F16,F18,F55,F71 ...). Une dureté élevée est généralement associée aux eaux souterraines contenant des minéraux dissous, et l'influences géologique (dolomie, calcaire, ...).

Le reste de la zone d'étude présente des valeurs variant du très faible à moyen (Fig. II.6).

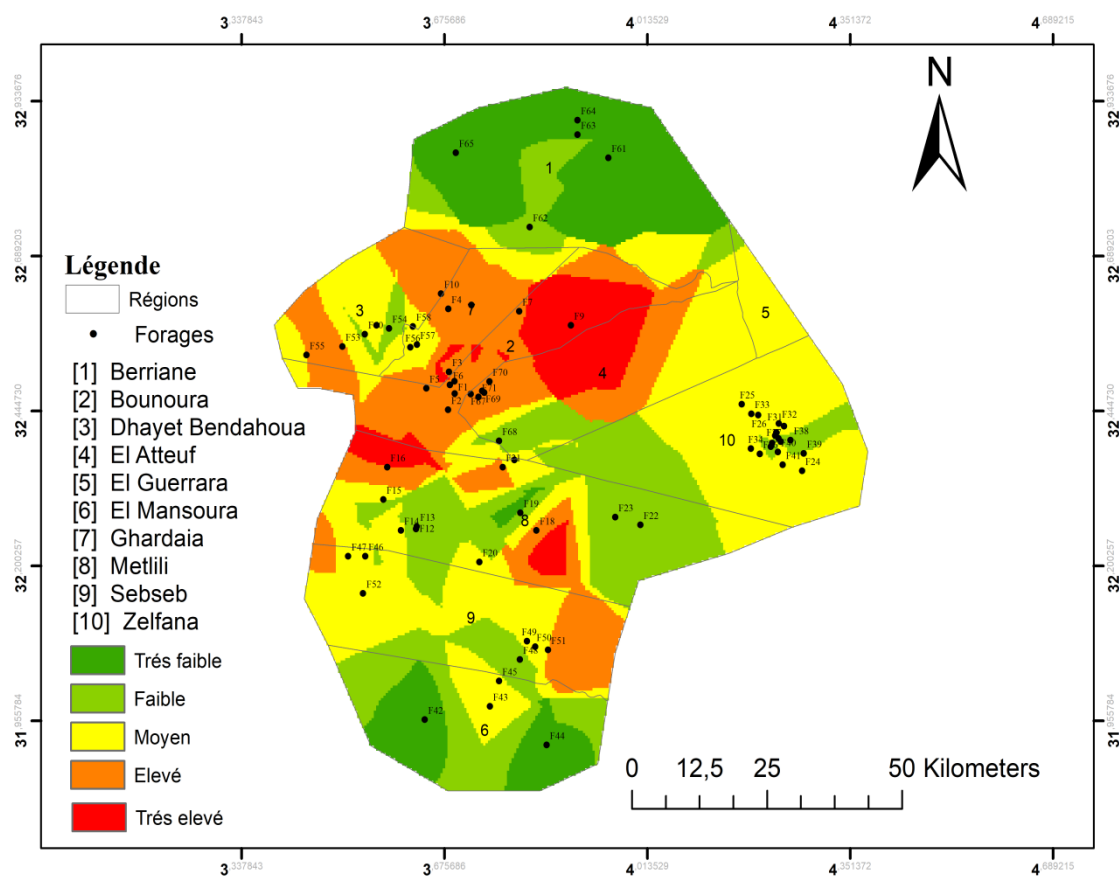


Figure II.6: Carte de variation du Titre hydrotimétrique

II.7.2. Bicarbonates (HCO_3^-)

D'après la Figure II.7, la plupart des forages (F4,F7-F10,F24-F26,F61-F65 ...) présentent des concentrations élevées à très élevées de bicarbonates; ce qui indique la présence de bicarbonate de calcium, dont l'origine principale réside de la dissolution des formations carbonatées et gypseuses, notamment celles datant du Trias.

La concentration de ce système dans l'eau dépend étroitement de plusieurs facteurs physicochimiques, tels que la teneur en CO_2 dissous, la température de l'eau, ainsi que son pH.

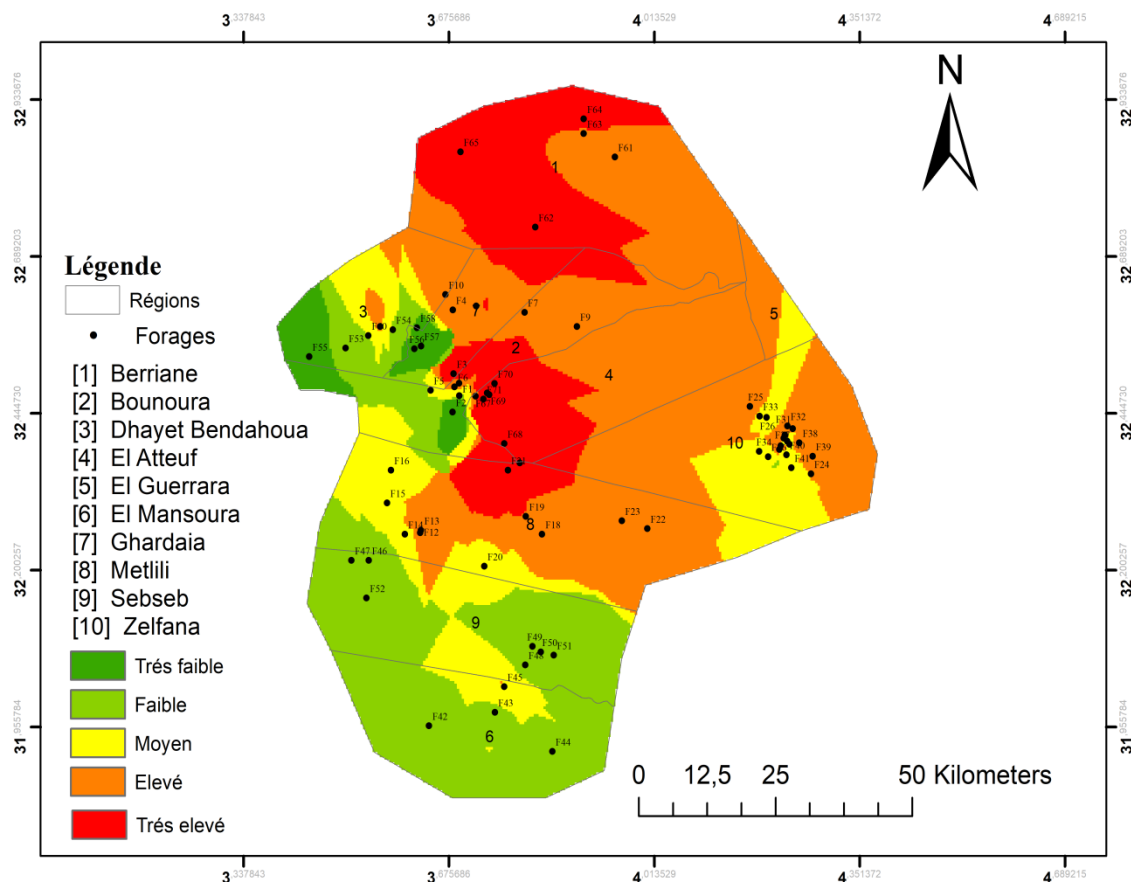


Figure II.7 : Carte de variation des bicarbonates

II.7.3. Sodium (Na^+)

Le sodium est un élément essentiel dont le corps a besoin pour bien fonctionner. Le sodium est un élément dit conservatif car une fois en solution, aucune réaction ne permet de l'extraire de l'eau souterraine. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine. Les teneurs, anormalement élevées, peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres.

Le sodium est le plus abondant des éléments alcalins. Ses composés largement répandus dans la nature, et ils représentent 26 g/kg de la croûte terrestre [7,21].

L'analyse de la carte de teneur en sodium (Na^+) montre que les très fortes concentrations sont enregistrées au Sud-Est et au Sud-Ouest de la zone (F13-F16, F22, F23) à cause de la halite et les roches sédimentaires ; ce qui peut affecter les eaux souterraines. La présence du sodium en valeurs élevées peut accroître la salinité et nuire aux sols et aux cultures sensibles, telles que les haricots et les agrumes en réduisant l'absorption d'autres éléments.

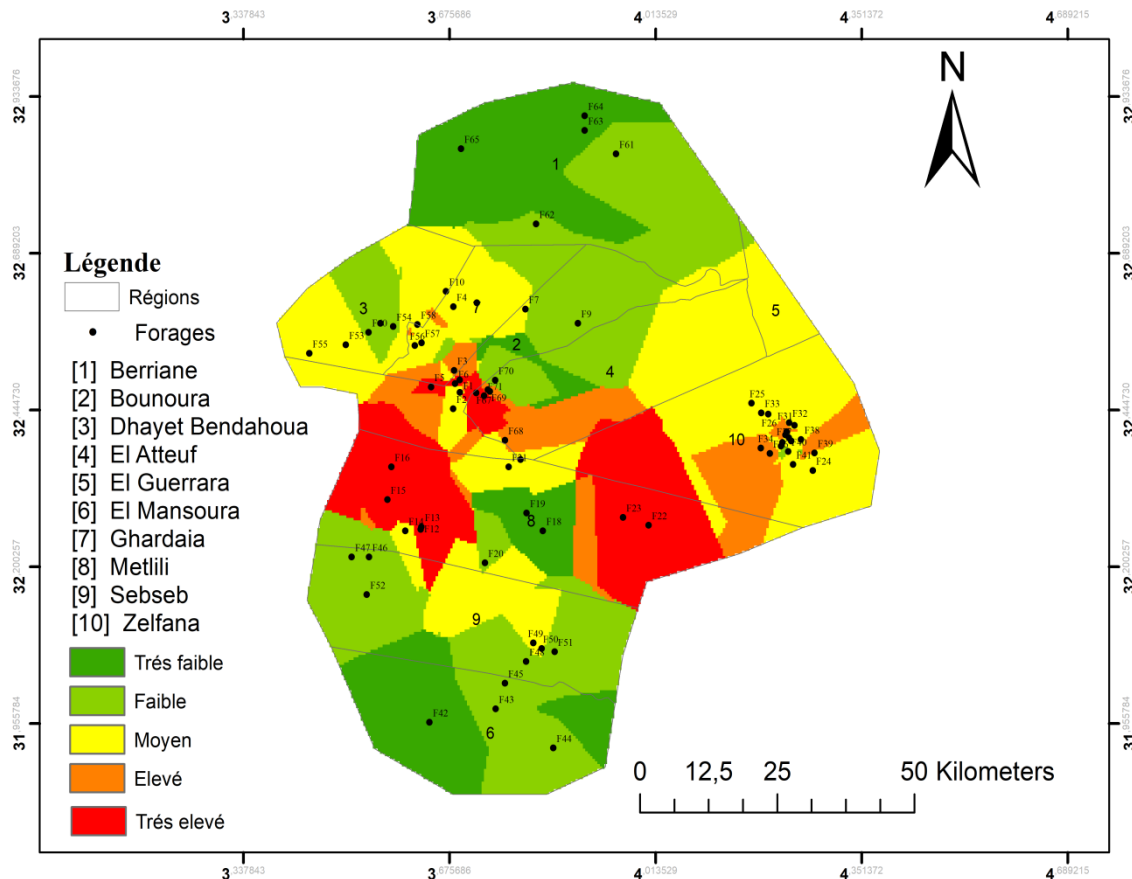


Figure II.8 : Carte de variation du Sodium

II.7.4. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Fréquent dans les roches sédimentaires sous forme aussi de carbonates ; calcite, dolomite et aragonite.

Le calcium est très fréquent dans les eaux naturelles avec des teneurs qui dépendent de la nature géologique des terrains traversés par les eaux souterraines. Cette teneur entre, pour une large part, dans la définition de la dureté de l'eau, ... etc.

Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées et également des formations gypsifères ($CaSO_4, 2H_2O$) suite à la présence du gaz carboniques. Il provoque l'entartage dans les canalisations, les bouilloires, chauffe-eau et peut avoir des effets négatifs sur l'absorption d'autres minéraux essentiels pour le corps de l'être humain en dépassant la norme [7].

L'analyse de la carte de teneur de calcium montre que la très élevée et l'élevée concentration est enregistrée au centre de la zone d'étude par exemple dans les forages (F9,F16,F69,F71) à cause de la présence de calcaire et de dolomite, affectant ainsi la dureté de l'eau. Les très faibles concentrations sont enregistrées au Nord et Sud-Est de la zone d'étude (F22,F23,F61,F63-F65) et on remarque que la plupart de la zone d'étude la concentration est moyen.

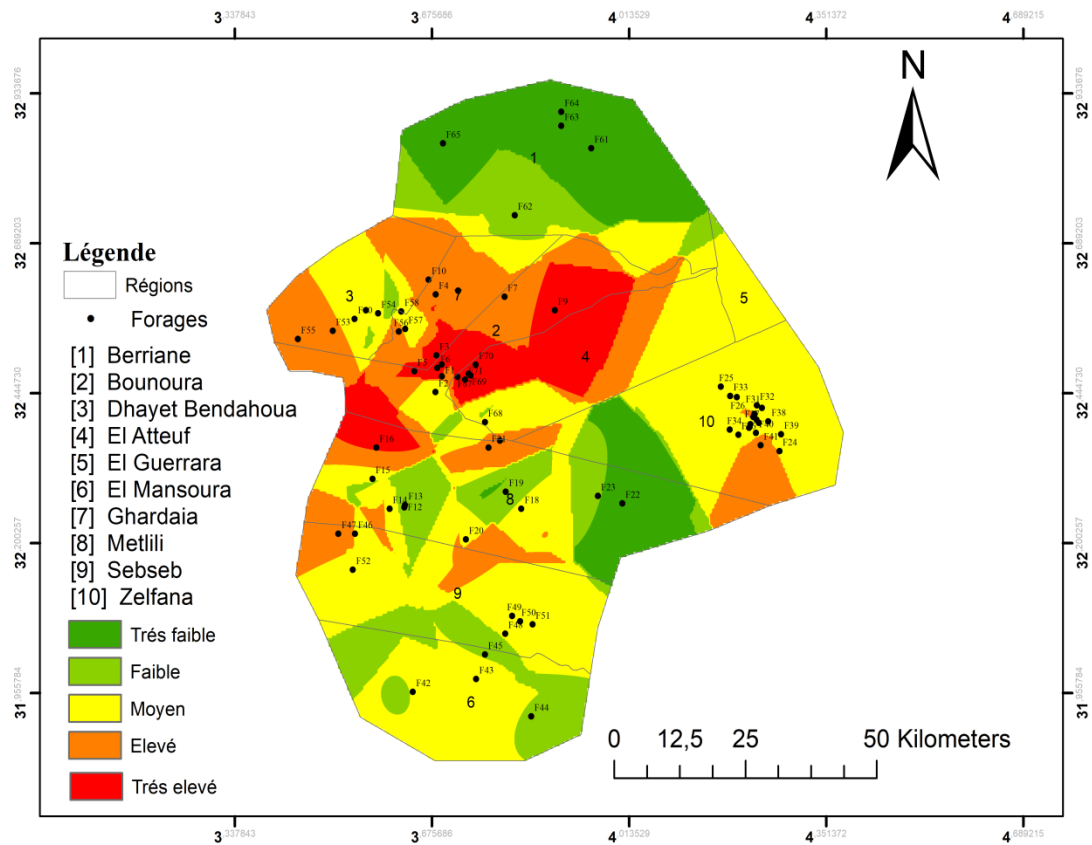


Figure II.9 : Carte de variation de Calcium

II.7.5. Magnésium (Mg^{2+})

La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Il provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates [7].

L'analyse de la carte des valeurs de Mg^{2+} montre de fortes concentrations dans quelques forages (F7,F9,F10), ce qui indique une abondance de cet élément, soit naturellement présent dans les roches mères, soit résultant d'activités humaines (comme les engrais).

Les zones de concentration intermédiaire représentent la majorité de la carte, indiquant une diversité géologique ou agricole.

Le magnésium se comporte de manière similaire au calcium dans l'aquifère. Il partage des origines comparables, provenant principalement de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium, telles que la magnésite et la dolomite.

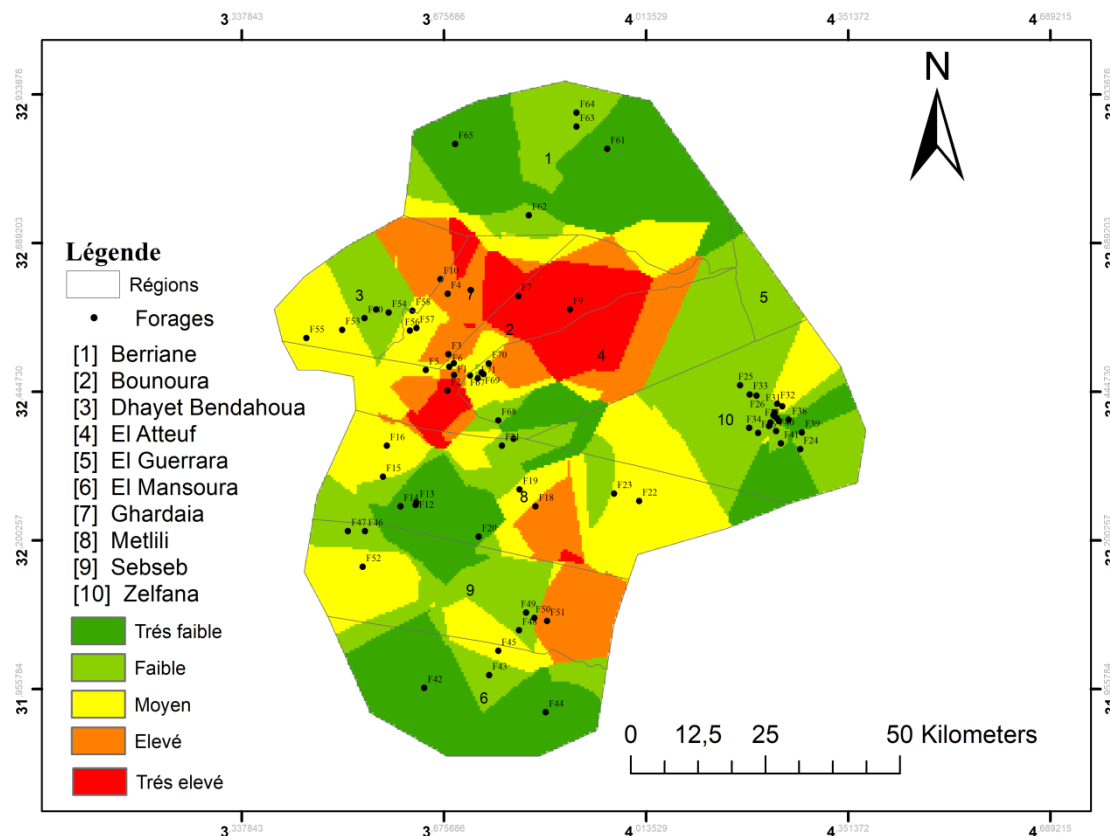


Figure II.10 : Carte de variation du Magnésium

II.7.6. Potassium (K^+)

La source de (K^+) pourrait être l'application des engrais chimiques et/ou l'altération de potassium-feldspath se trouvant dans les sédiments d'origine volcanique des feldspaths potassiques.

Selon la figure (II.1), presque la moitié de la zone vers le nord, contient une forte concentration de potassium, indiquant un sol riche en cet élément nécessaire à la croissance des plantes. Cette répartition reflète un bon potentiel agricole, notamment pour des cultures comme les pommes de terre, les tomates et le blé, qui nécessitent une teneur élevée en potassium.

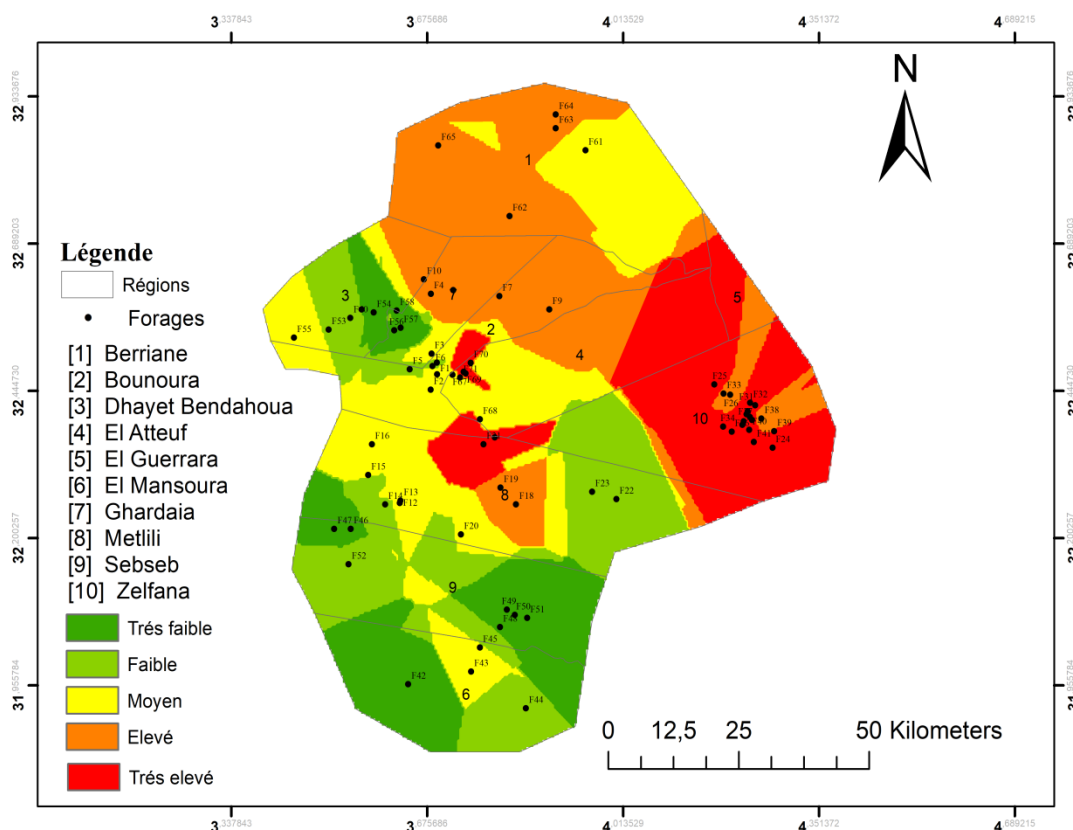


Figure II.11 : Carte de variation du Potassium

II.7.7. Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates contenus naturellement dans l'eau souterraine sont fournis par la dissolution des minéraux contenant du soufre, comme le gypse. Ce dernier peut être Triasique, comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles de Mio-Plio-Quaternaire. Ils peuvent provenir aussi de la dissolution des minéraux sulfatés d'une manière générale à l'exemple de la pyrite [7,8,11].

L'analyse de la carte des teneurs en sulfate (Fig. II.12) révèle des concentrations élevées et très élevées à l'Ouest et au Centre-Est de la zone d'étude (F9,F15,F16,F22,F23,F48-F51,F53,F55). Cela est dû à la présence formations géologiques comme le gypse, d'anhydrite et de pyrite oxydée, qui altèrent la qualité de l'eau en modifiant son goût et son odeur. De très faibles concentrations sont enregistrées au Nord de la zone d'étude, tandis que des concentrations moyennes et faibles sont enregistrées dans le reste de la zone.

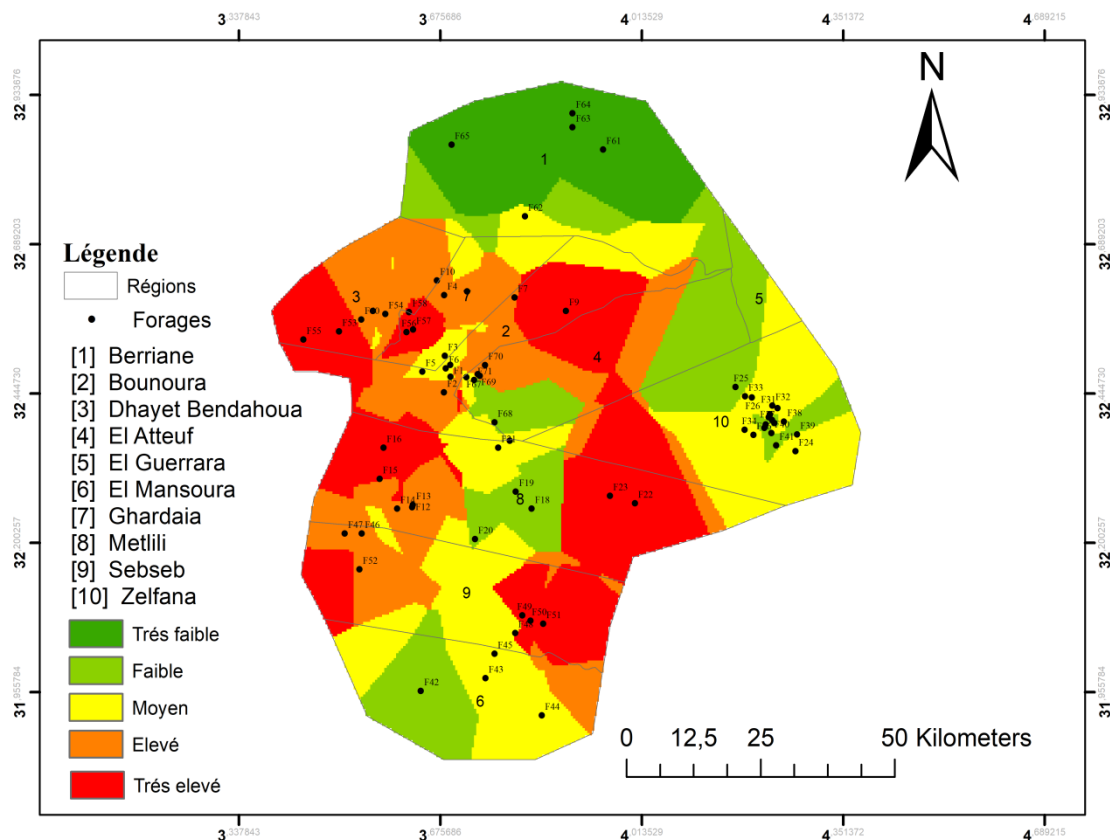


Figure II.12 : Carte de variation des Sulfates

II.7.8. Chlorures (Cl)

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux [7].

L'analyse de la carte de teneur en chlorure montre que des concentrations très élevées et élevées sont enregistrées au niveau des forages (F4, F7-F10, F15, F16, F38, F58) en raison de l'halite et des formations sédimentaires marines fossiles. Une concentration élevée peut indiquer une accumulation de sel ou une forte activité d'évaporation dans la zone, ce qui nuit à l'agriculture et à la consommation humaine.

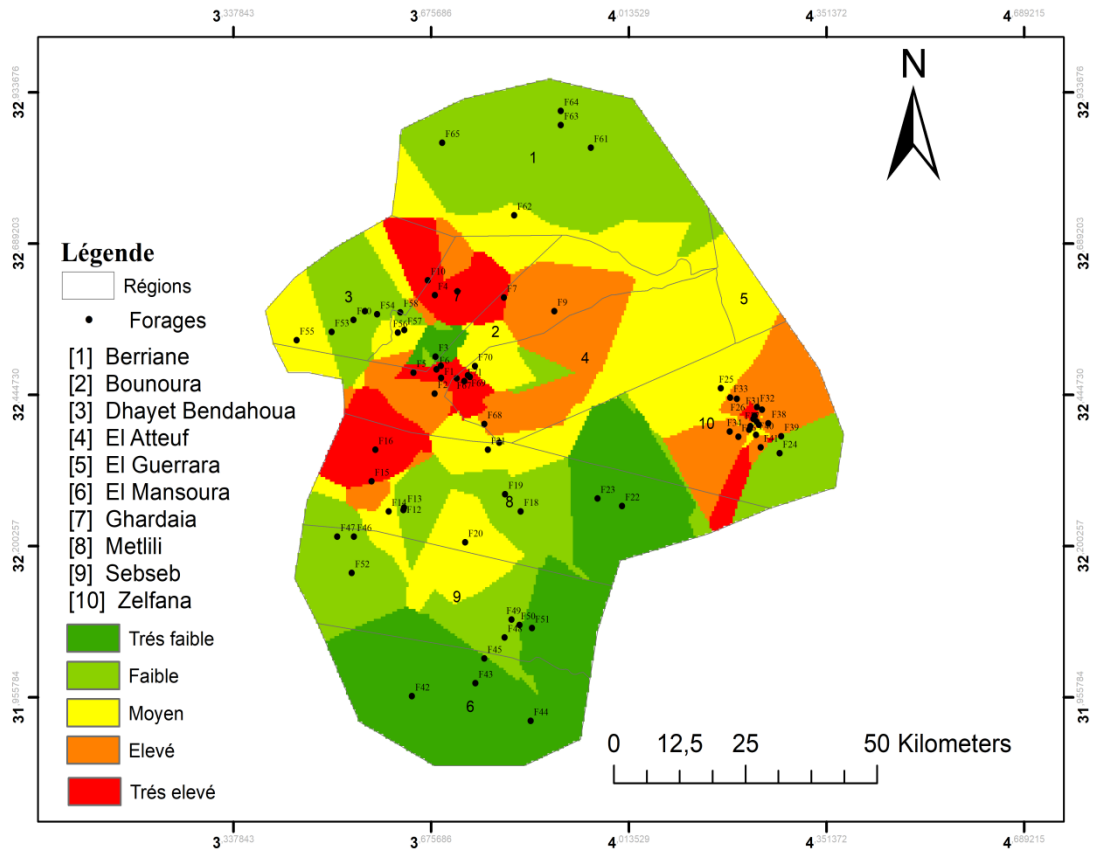


Figure II.13 : Carte de variation des Chlorures

II.7.9. Turbidité

La turbidité de l’eau souterraine provenant des puits profonds est généralement faible. Elle est surtout d’origine inorganique et ne pose habituellement pas de risque pour la santé.

L’analyse de la carte de teneur en turbidité montre que des concentrations élevées et très élevées sont enregistrées au milieu (F21,F71) et à l’Est de la zone d’étude (F38,F25,F26,F33, et cela est dû à plusieurs raisons possibles, notamment l’érosion des sols, la surexploitation, la croissance algale et microscopique, l’élimination des sédiments, les activités agricoles et de construction. La majeure partie contient des concentrations faibles à moyennes.

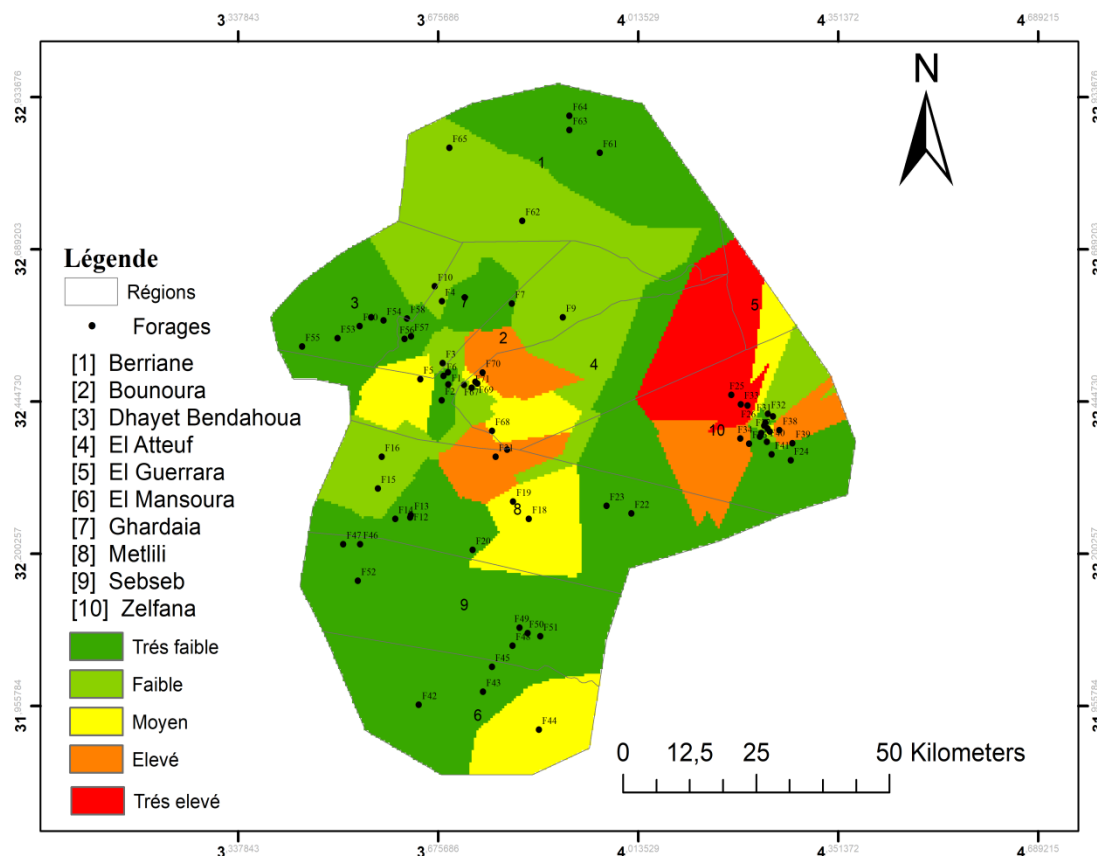


Figure II.14 : Carte de variation de la Turbidité

II.8. Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons défini la géologie et l'hydrogéologie de la wilaya de Ghardaïa, en explorant ses caractéristiques, son histoire et certaines époques qu'elle a traversées, ainsi que son impact sur les eaux souterraines en particulier. Cette partie nous a permis de situer la zone d'étude dans son contexte régional et local. Elle est placée sur les bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du bas-Sahara, dont les terrains affleurant sont en grande partie attribués au Crétacé supérieur, composés principalement par des dépôts calcaires turoniens dolomitiques. Le quaternaire correspond au dépôt de recouvrement alluvionnaire de la plupart des vallées des Oueds de la région de Ghardaïa.

L'étude hydrogéologique a montré que la région de Ghardaïa fait partie du grand système aquifère du Sahara Septentrional (SASS), où le Continental Intercalaire (CI) est le principal aquifère utilisé.

Chapitre III

Hydrogéochimie des eaux souterraines

Chapitre III : Hydrogéochimie des eaux souterraines

III.1. Introduction

L'étude hydrogéochimique des eaux souterraines nous offre beaucoup d'informations utiles pour comprendre les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères. Cela signifie des échanges potentiels entre l'eau et les roches, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition d'éléments chimiques par dissolution et altération des minéraux dans le réservoir. Cette étude permet également de suivre le développement spatial de divers éléments dissous, d'estimer leur source, d'estimer la profondeur de circulation de l'eau et d'évaluer la qualité de l'eau en relation avec l'eau potable et l'irrigation [7,8]. Pour pouvoir analyser ces données et en ressortir le plus d'information en peu de temps, nous avons utilisé des outils et méthodes efficaces et rapides. Le principal outil utilisé est le logiciel "DIAGRAMMES". L'analyse multivariée pour déterminer la qualité des eaux a été menée par des méthodes d'analyse statistique, telles que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

Dans ce travail, nous avons procédé à l'étude des résultats d'analyses physicochimiques enregistrés durant 2018, de 71 forages situés au niveau des communes de la wilaya de Ghardaïa.

III.2. Faciès hydrochimiques

III.2.1. Outil de traitement

La classification hydrogéochimique des eaux a été réalisée par le logiciel "DIAGRAMMES" en utilisant les diagrammes de Piper et de Schöeller-Berkaloff. Ces derniers sont fréquemment utilisés pour la typologie des eaux. Ce logiciel est créé par *Roland Simler* du Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon.

Les éléments chimiques considérés pour ce traitement concernent les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et les anions (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}) après conversion en milliéquivalents par litre (méq/L).

Ainsi, les faciès géochimiques des eaux sont obtenus en fonction de la prédominance des cations et des anions dans la solution [22].

III.2.2. Classification de Piper

Le diagramme de Piper est un outil graphique utilisé en hydrochimie pour classer les eaux souterraines ou de surface en fonction de leur composition chimique, notamment des ions majeurs (cations et anions).

Le diagramme de Piper se compose de 3 parties : le triangle des cations (en bas à gauche), le triangle des anions (en bas à droite) et le losange central (en haut) [23].

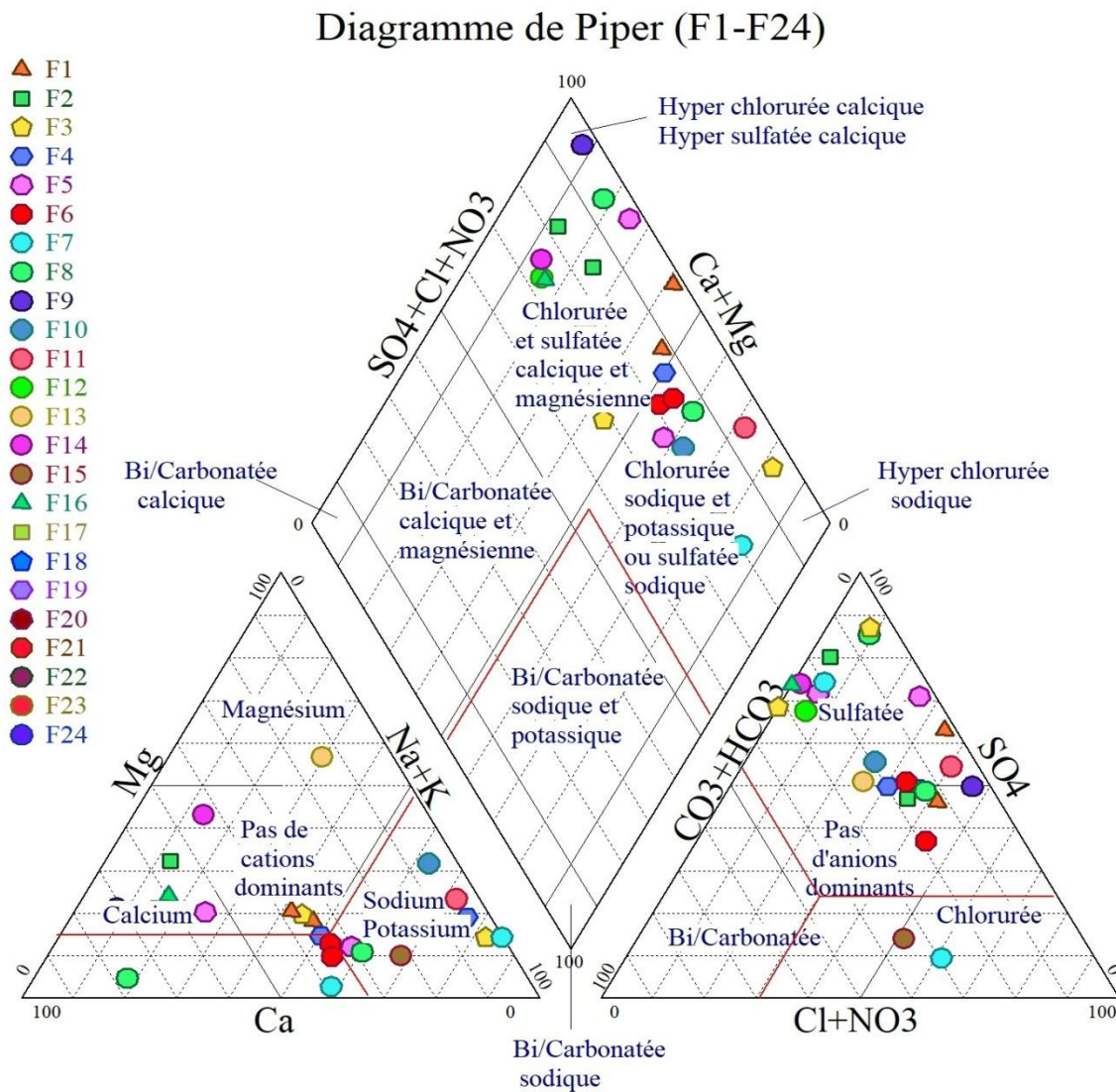


Figure III.1 : Diagramme de Piper de la zone d'étude (F1-F24)

Diagramme de Piper (F25-F48)

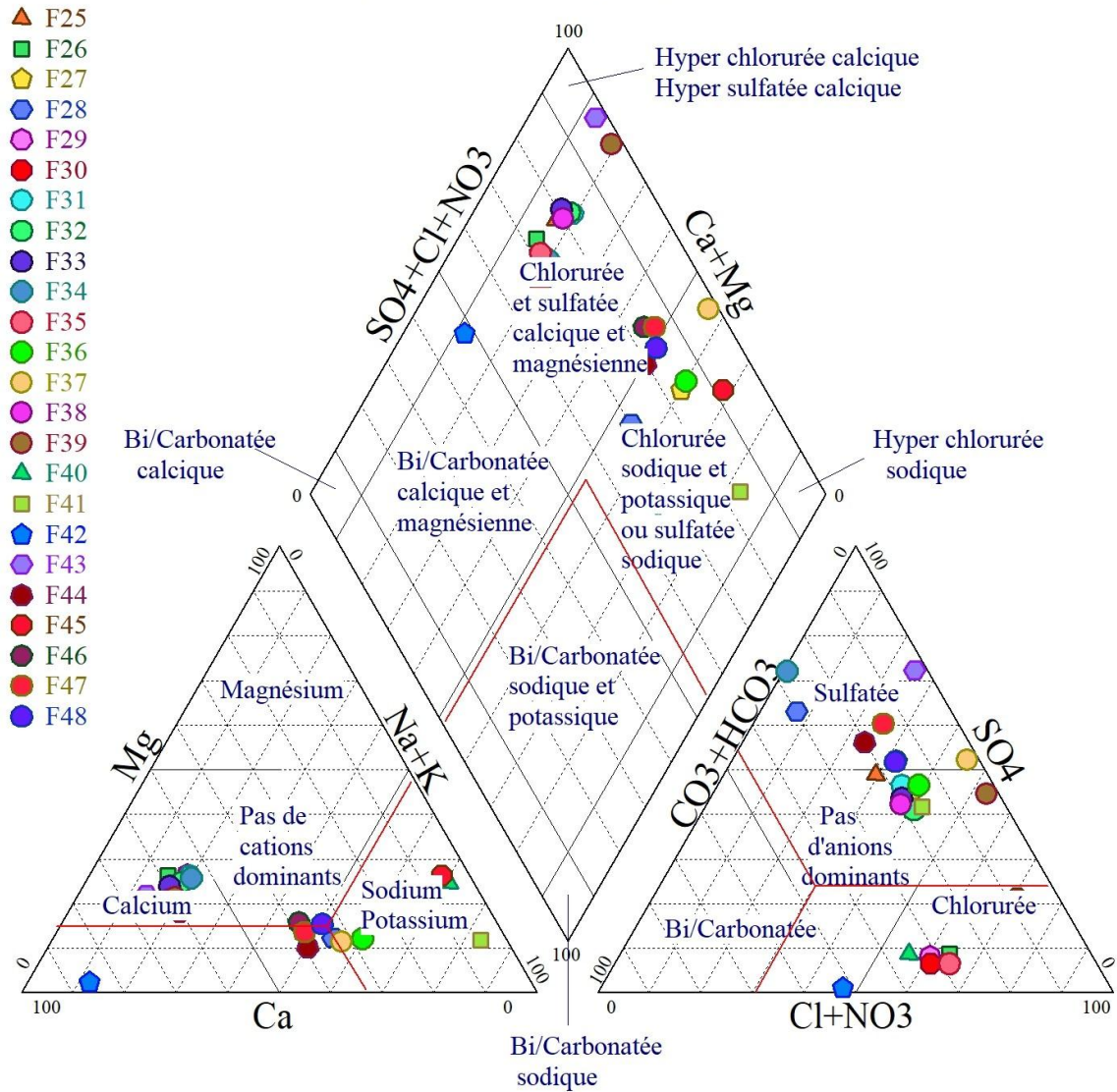


Figure III.2 : Diagramme de Piper de la zone d'étude (F25-F48)

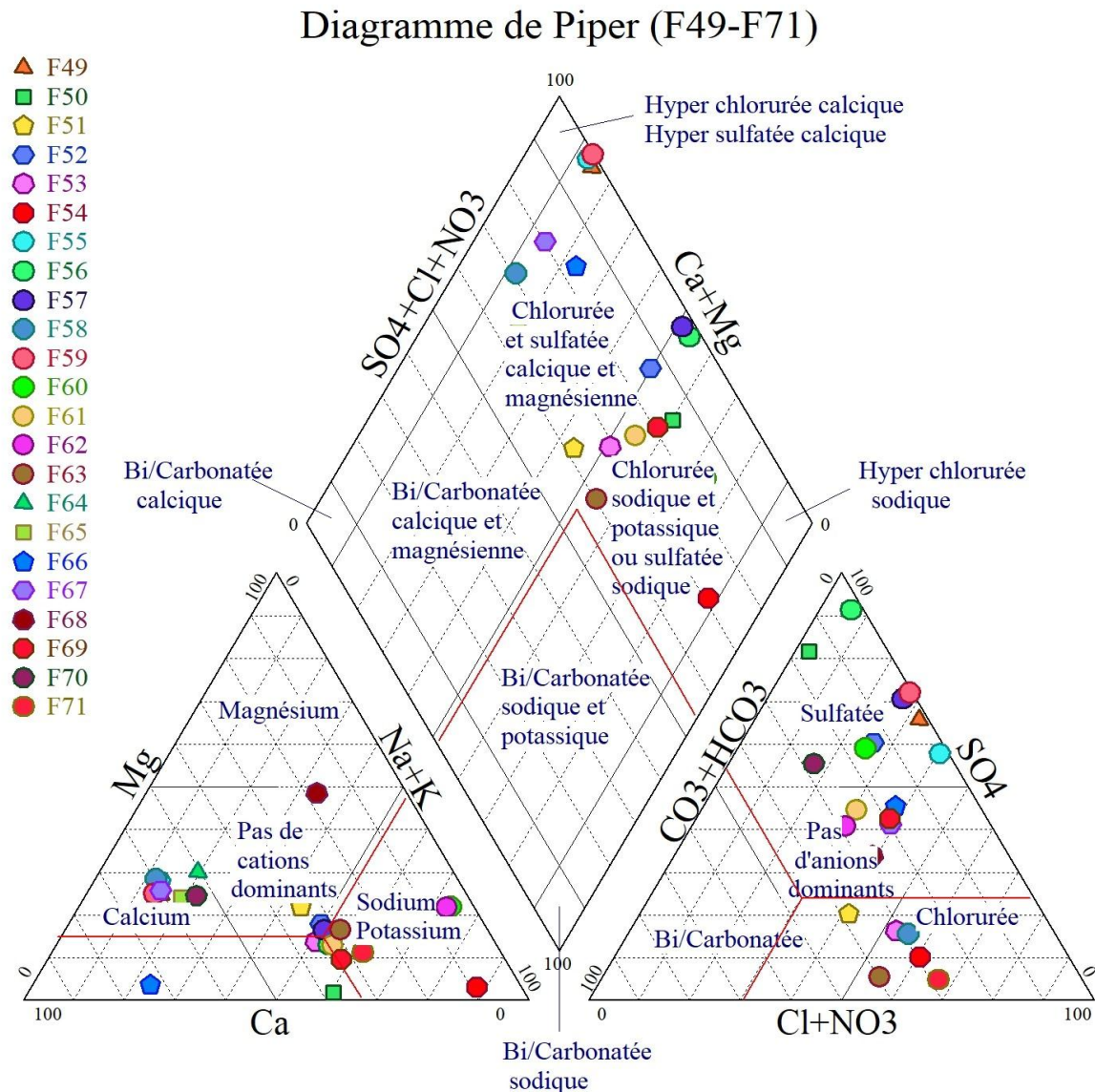


Figure III.3 : Diagramme de Piper de la zone d'étude (F49-F71)

a) Analyse et discussion des résultats

1. Triangle cationique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)

- La plupart des échantillons se regroupent dans la partie inférieure gauche du triangle, indiquant la dominance du calcium (Ca^{2+}) au détriment du magnésium et du sodium/potassium.
- Il y a quelques points au milieu, indiquant que l'eau sans cations dominants évidents.
- Quelques échantillons tendent vers une dominance de sodium et de potassium.

2. Triangle anionique (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-})

- La plupart des échantillons sont concentrés dans la partie supérieure droite du triangle, indiquant la dominance des chlorures (Cl^-) et des sulfates (SO_4^{2-}).

- Cela indique une eau chlorée ou sulfatée, probablement causée par la pollution ou la salinité naturelle.

3. Losange central (mélange de cations et d'anions)

La plupart des forages (Figs. III.1 – III.3) montre que le chimisme des eaux analysées est caractérisé par deux principaux faciès chimiques :

- **Faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien** : La signature géochimique de ce type de faciès est caractéristique des eaux de la zone des intrusions granitiques. Ce faciès assez peu important se retrouve dispersé dans toute la zone.
- **Faciès chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique** : Ce faciès est dû probablement au lessivage des semelles du Trias situées à la base des flysch.

Le forage F9 se situe dans le faciès hyper chloruré et sulfaté calcique et le forage F42 se trouve dans le faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

b) Interprétation hydrogéologique possible

Contexte géologique : La dominance des eaux chlorurées sodiques peut résulter de l'évaporation ou de la dissolution de formations salines (halite).

Évolution chimique : Les eaux bicarbonatées calciques signalent souvent une eau jeune ou une faible résidence souterraine, tandis que les eaux sodiques très minéralisées sont plus évoluées.

III.2.3. Classification de Schöeller-Berkaloff

Ce diagramme permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence [21,22,24].

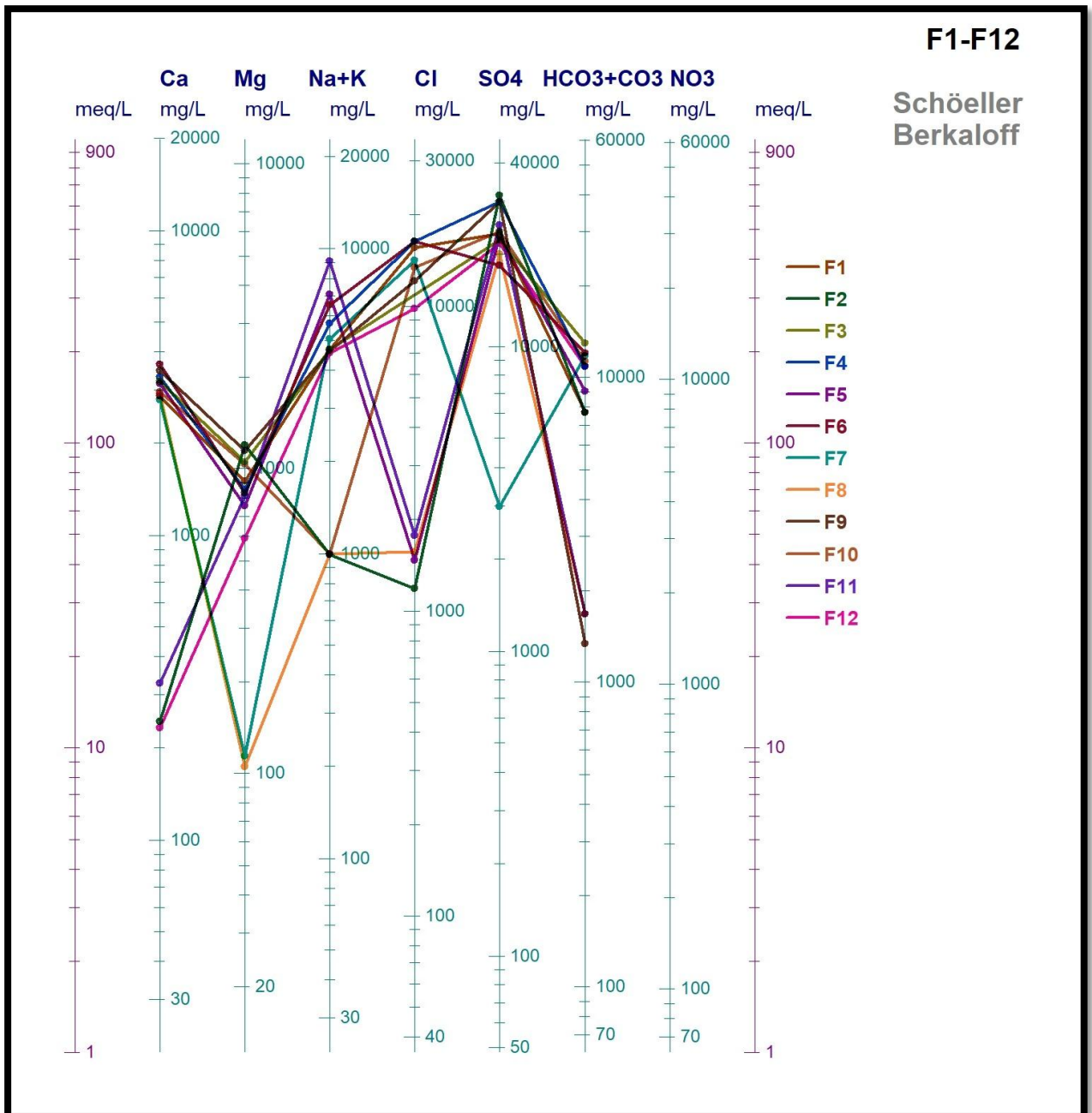


Figure III.4 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F1-F12)

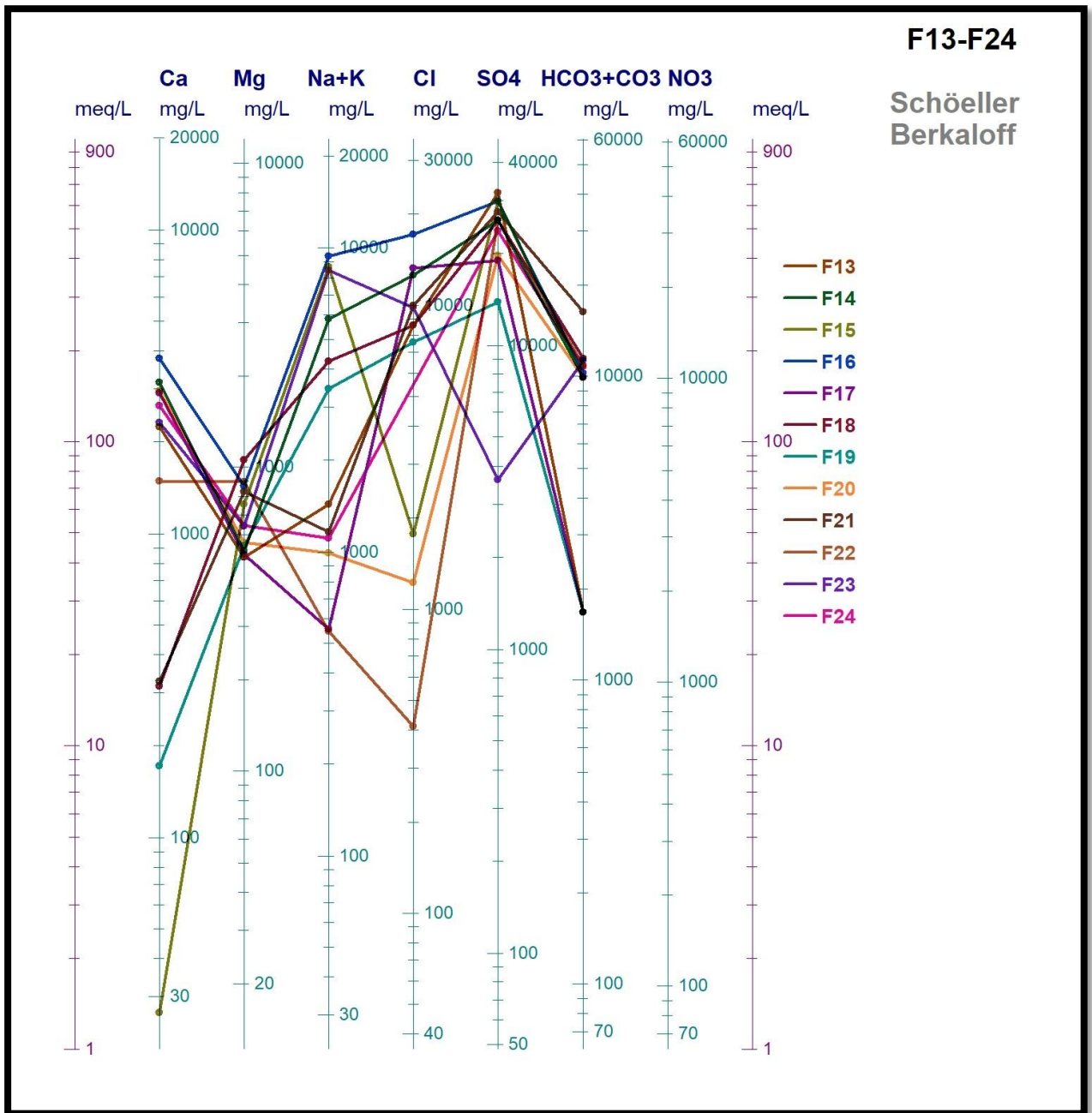


Figure III.5 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F13-F24)

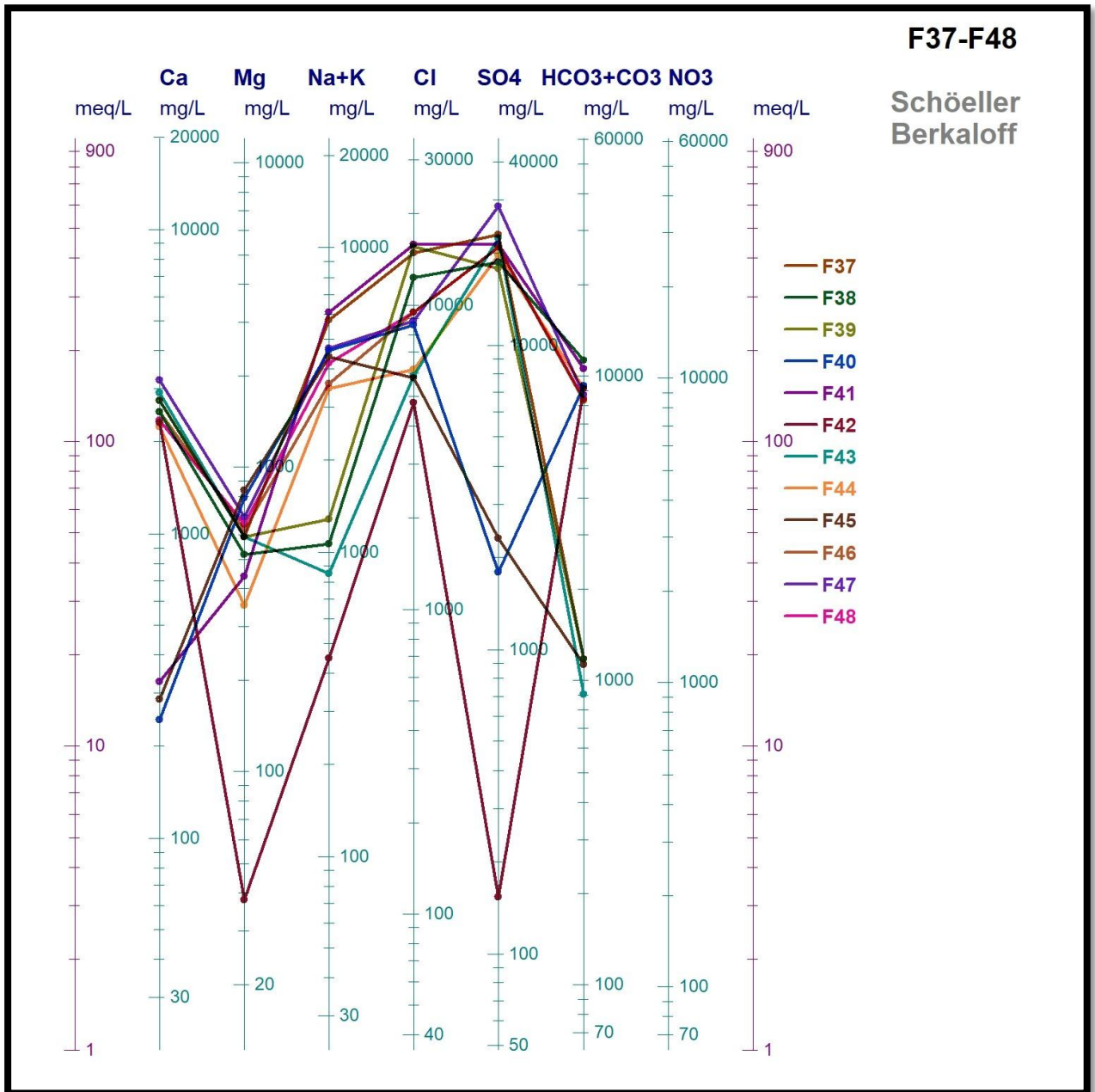


Figure III.7 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F37-F48)

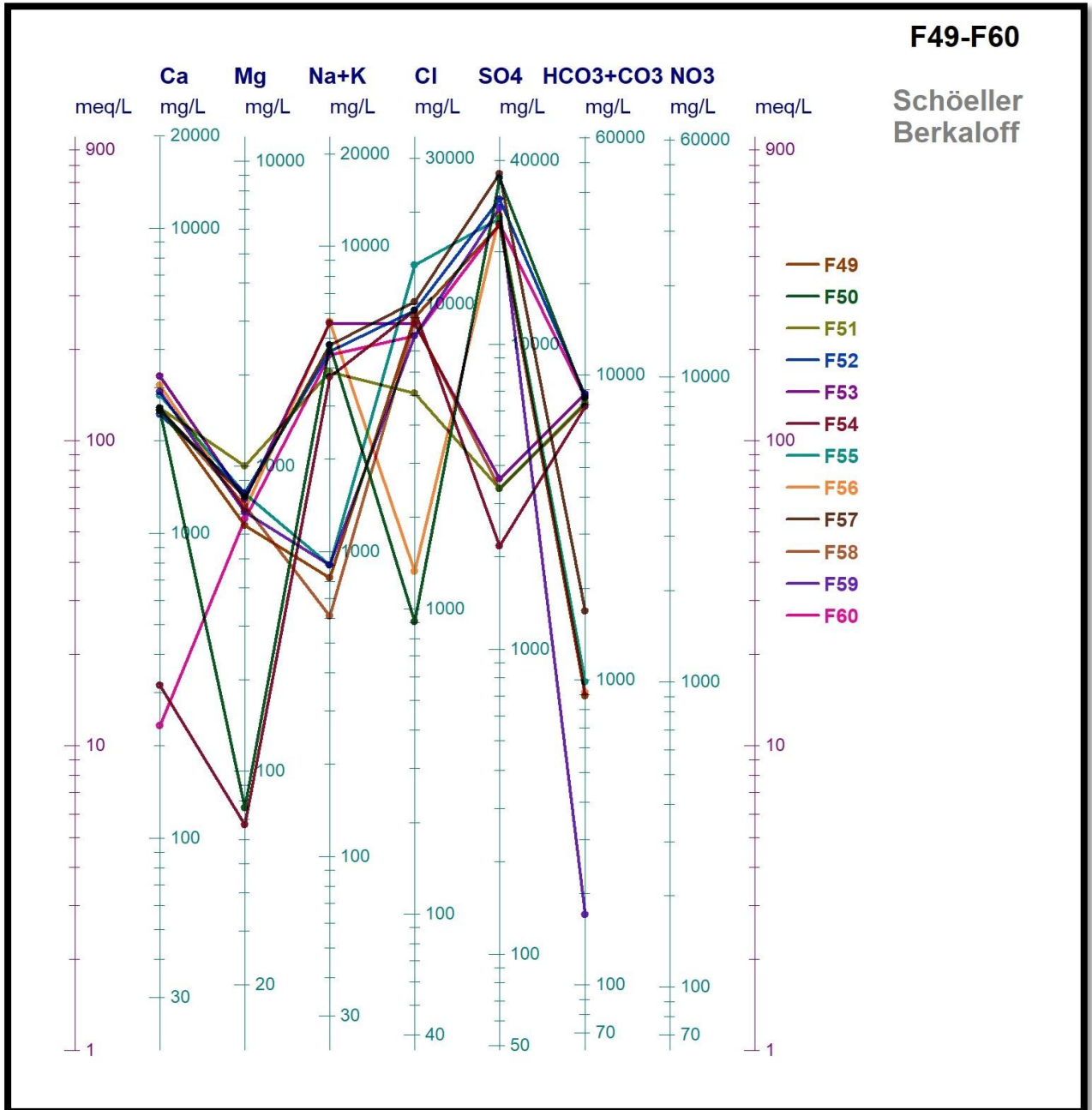


Figure III.8 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F49-F60)

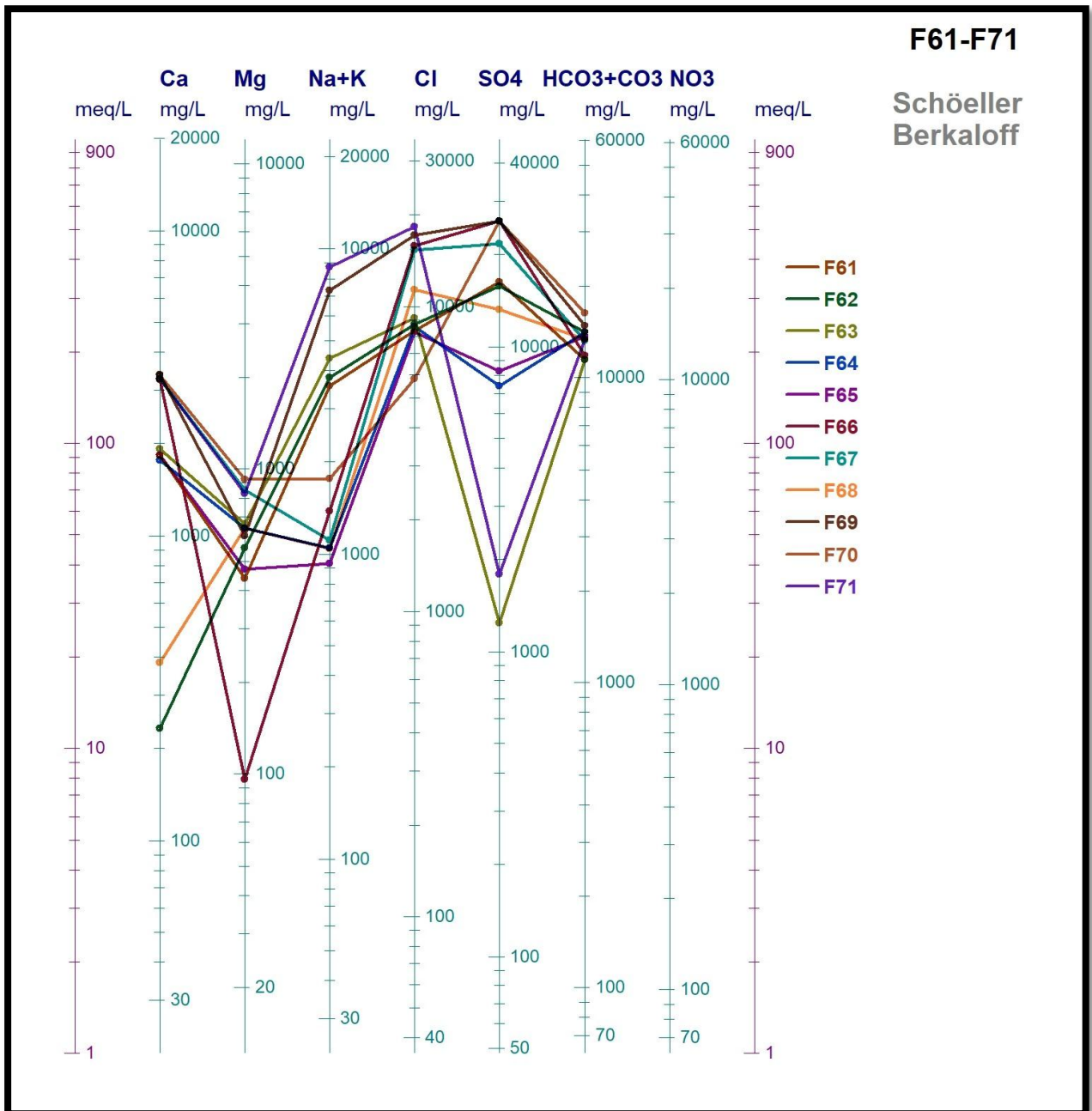


Figure III.9 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff appliqué aux eaux souterraines de la région d'étude (F61-F71)

a) Analyse et discussion des résultats

- **F1-F12 (Fig. III.4)** : Ce groupe présente une tendance générale à la dominance de Na^+ , K^+ et Cl^- , mais avec des variations notables dans les proportions relatives des autres ions. Par exemple, certains points d'eau (F1, F7) présentent des concentrations relativement plus élevées de calcium et de bicarbonate.
- **F13-F24 (Fig. III.5)** : Comme pour le premier groupe, Na^+ , K^+ et Cl^- sont souvent dominants. Cependant, certains forages (comme F16 et F20) présentent une présence plus prononcée des sulfates.

- **F25-F36 (Fig. III.6)** : Ce groupe présente des variations parmi les plus significatives. Le puits F30 se distingue par des concentrations exceptionnellement élevées de chlorures et de sodium - potassium, indiquant une eau très saline. D'autres puits de ce groupe présentent des compositions ioniques plus équilibrées.
- **F37-F48 (Fig. III.7)** : Là encore, Na^+ , K^+ et Cl^- sont généralement élevés. Le forage F37 présente une concentration en magnésium relativement plus élevée que les autres points de ce groupe.
- **F49-F60 (Fig. III.8)** : Ce groupe poursuit la tendance à la dominance de Na^+ , K^+ et Cl^- , avec des niveaux variables d'autres ions. Le forage F59 présente un pic significatif de concentration en chlorures.
- **F61-F71 (Fig. III.9)** : Ce dernier groupe suit également la tendance générale, mais avec des signatures ioniques uniques pour chaque forage.

b) Conclusion

Dans la plupart des forages étudiés, le sodium, le potassium et les chlorures (Na^+ , K^+ , Cl^-) semblent être respectivement le cation et l'anion dominant. Cela suggère que les eaux souterraines de nombreuses régions présentent une teneur en chlorure sodique, fréquente dans les régions arides et semi-arides en raison de facteurs tels que, l'évaporation et la dissolution des minéraux évaporitiques.

III.2.4. Classification de Wilcox log

Le diagramme de Wilcox log, dressé lui aussi par logiciel "DIAGRAMMES", permet de mieux gérer la qualité des eaux en fonction de classes du SAR (Sodium Adsorption Ratio) et de la conductivité. L'indice de qualité des eaux souterraines, utilisé est le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative de sodium par rapport au calcium et au magnésium. Il est donné par la relation ci-après.

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

Avec Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} : Les concentrations en méq/L de chaque élément.

Une concentration élevée en Na^+ , réduit la perméabilité du sol, particulièrement en surface, même si le lessivage a lieu. Ce phénomène est lié à la dispersion et au gonflement des argiles lorsque la concentration en Na^+ échangeable augmente. Une forte concentration en Na^+ peut provoquer aussi un pH élevé, des maladies, des herbes, et de manque d'oxygène.

Toutefois, pour une certaine valeur du SAR, la vitesse d'infiltration augmente ou diminue avec le niveau de salinité [20].

Tableau III.1: Classes du SAR et de la conductivité selon Richards (1954)

SAR	Conductivité (µs/cm)	Observations
< 10 (S1)	100 – 250 (C1)	Excellent
10 – 18 (S2)	250 – 750 (C2)	Bien
18 – 26 (S3)	750 – 2250 (C3)	Permis
> 26 (S4)	2250 – 5000 (C4)	Inadapté

L'évaluation de la qualité chimique des eaux souterraines de la wilaya de Ghardaïa pour l'usage agricole basée sur les normes de Wilcox log est représentée sur les figures suivantes.

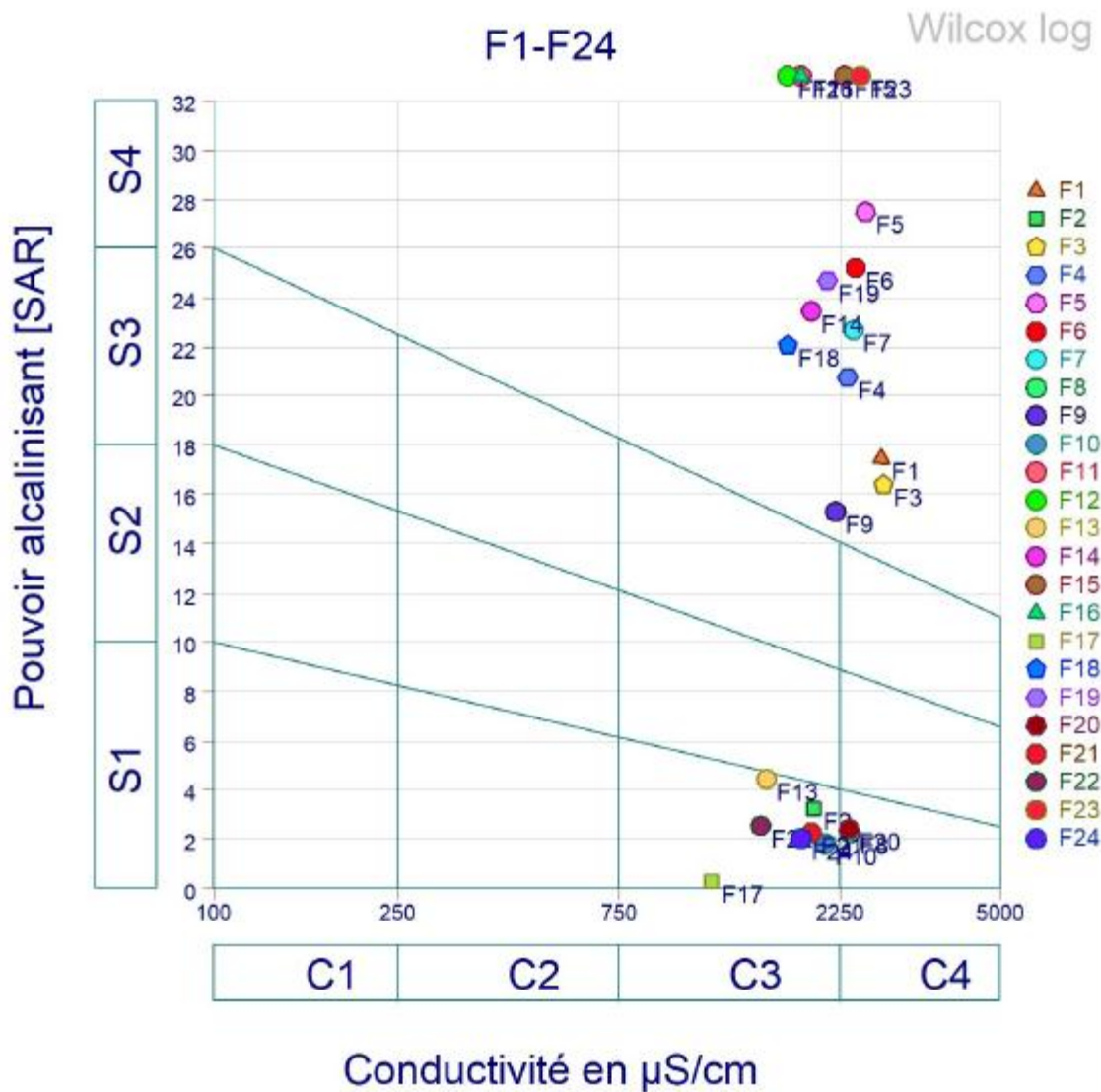


Figure III.10: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox log (F1-F24)

a) Analyse et discussion des résultats

- **F1-F24 (Fig. III.10)** : La majorité des forages sont dans les classes (C3-S4) et (C4-S4) → Eau très salée avec risque alcalin élevé.
- Quelques forages (F2, F10, F13, F17, F21, F22, F24) appartiennent à (C3-S1), donc relativement meilleurs.

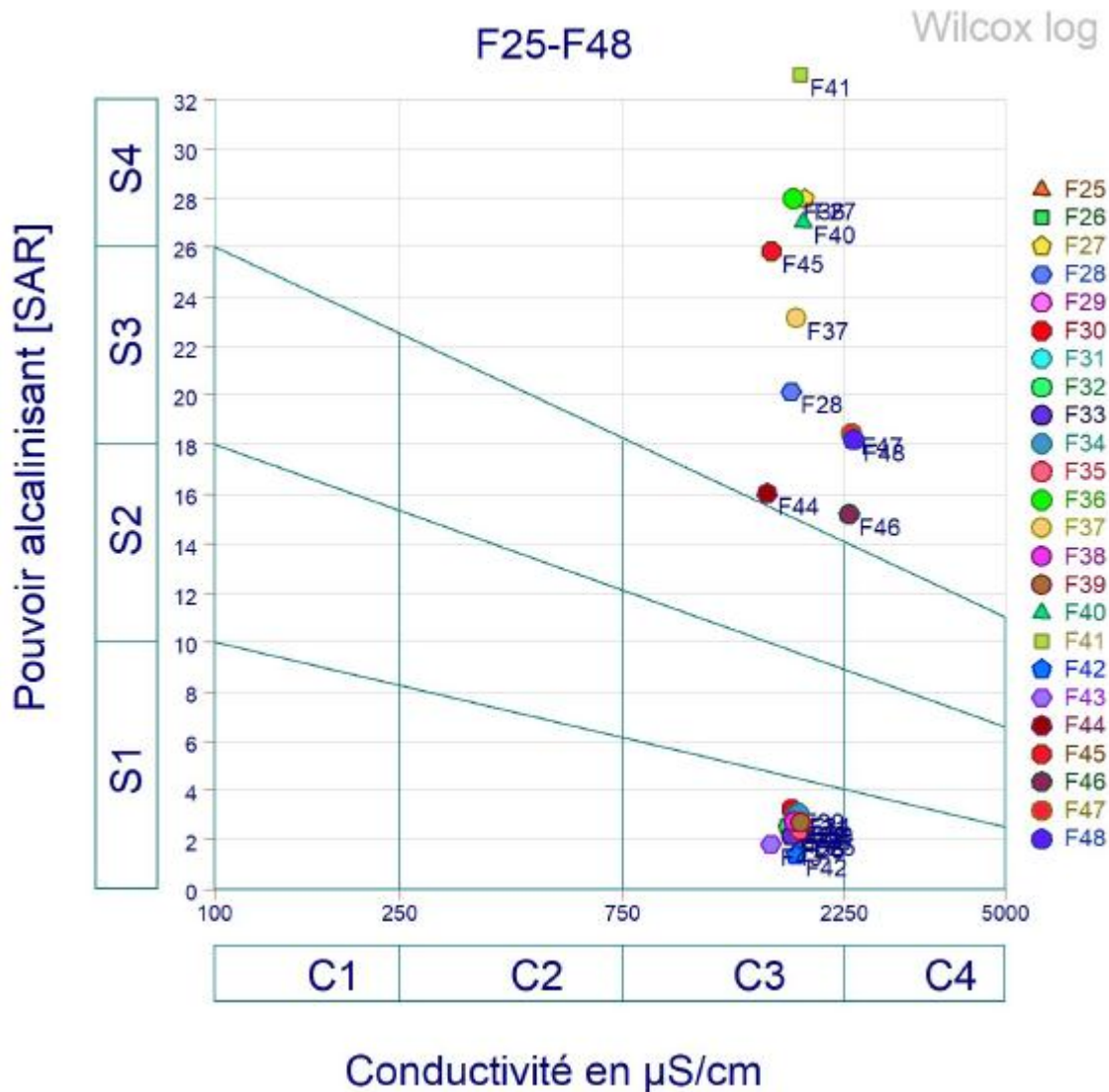


Figure III.11: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox log (F25-F48)

- **F25-F48 (Fig. III.11)** : La plupart des eaux sont dans la classe (C3-S4). Quelques forages sont dans (C3-S1).

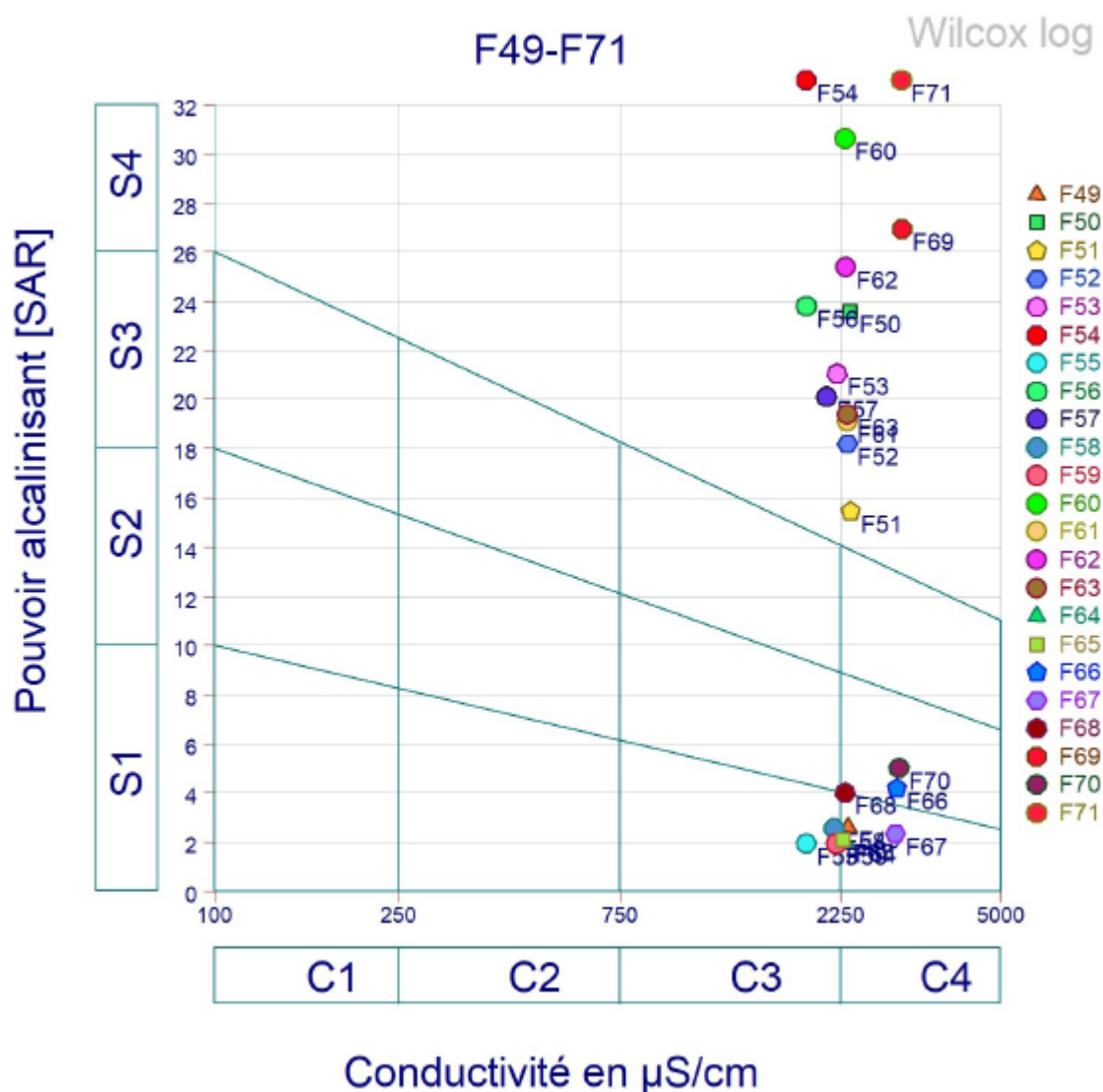


Figure III.12: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de Wilcox log (F49-F71)

- **F49-F71 (Fig. III.12) :**
- La situation est semblable aux précédents : forte salinité et alcalinité pour la majorité.
- Les forages (F55, F58, F59...) apparaissent en **C3-S1** et les forages (F49, F50, F67...) apparaissent en **C4-S1**, donc utilisables avec précaution.

b) Conclusion

Quelques forages (F2, F17, F13, F55, F58, F59 ...) appartiennent aux catégories (**C2-S1**) et (**C3-S1**), c'est-à-dire, eaux modérément salées et faiblement alcalines, adaptées à l'irrigation sans grand risque. La majorité des forages (F1, F3-F7, F9, F10, F18, F23, F28, F37, F40, F41, F44-F46, F50-F54, F60, F62, F69, F71 ...) se trouvent dans les deux zones (**C4-S3**) et (**C4-S4**). Les eaux de ces deux classes sont mauvaises en raison de leur salinité élevée (**C4**) et de leur fort risque de sodisation (**S3** et **S4**), donc elles ne conviennent pas à l'irrigation.

Les eaux de la classe (C4-S3) peuvent être utilisées dans l'irrigation sous certaines conditions : drainage intensif, sols très perméables, bon lessivage, cultures très tolérantes au sel (orge, dattiers, betterave ...).

Pour la classe (C4-S3), presque inutilisable sans un traitement spécifique et coûteux à cause du risque de la destruction de la structure du sol. Pour utiliser ces eaux, il faut les mélanger avec une eau de très bonne qualité, lessivage avec un excès de l'eau et éviter les sols argileux.

III.2.5. Origine des minéraux évaporitiques et carbonatés

Pour comprendre l'origine des minéraux évaporitiques, nous avons étudié les cations dominants dans les minéraux sulfurés et chlorés en combinant des sulfates avec les éléments : Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ , ainsi que Cl^- avec Na^+ . Nous avons examiné l'évolution des bicarbonates avec le calcium et le magnésium pour confirmer la présence ou l'absence des minéraux caractéristiques des roches carbonatées : la calcite (CaCO_3) et la dolomite [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] [22].

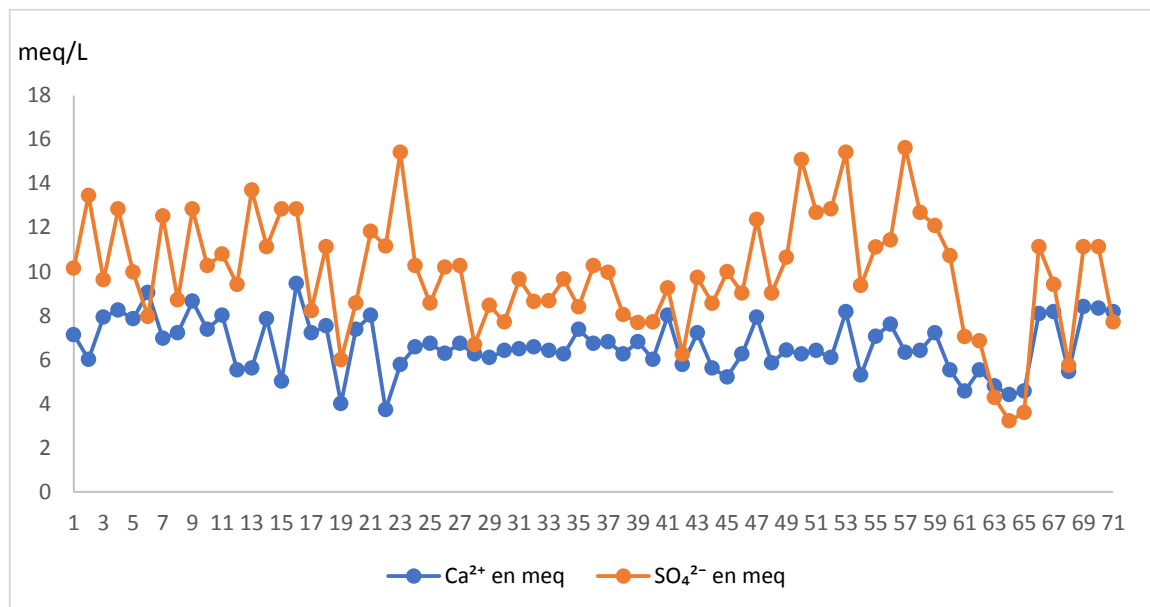


Figure III.13: $(\text{Ca}^{2+}) = f(\text{SO}_4^{2-})$

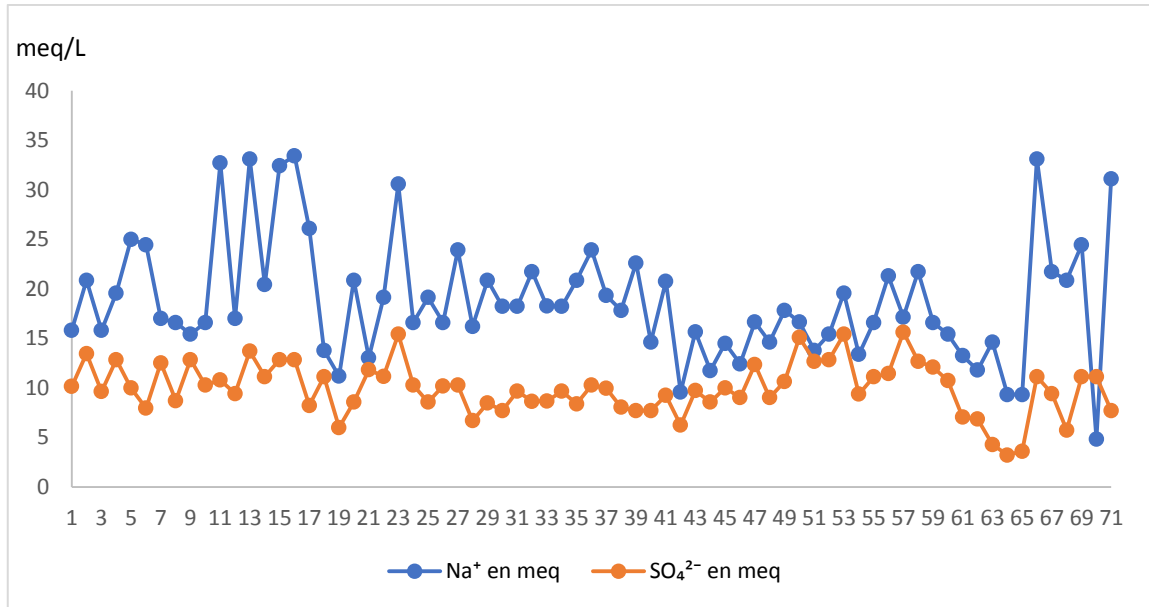


Figure III.14: (Na⁺) = f (SO₄²⁻)

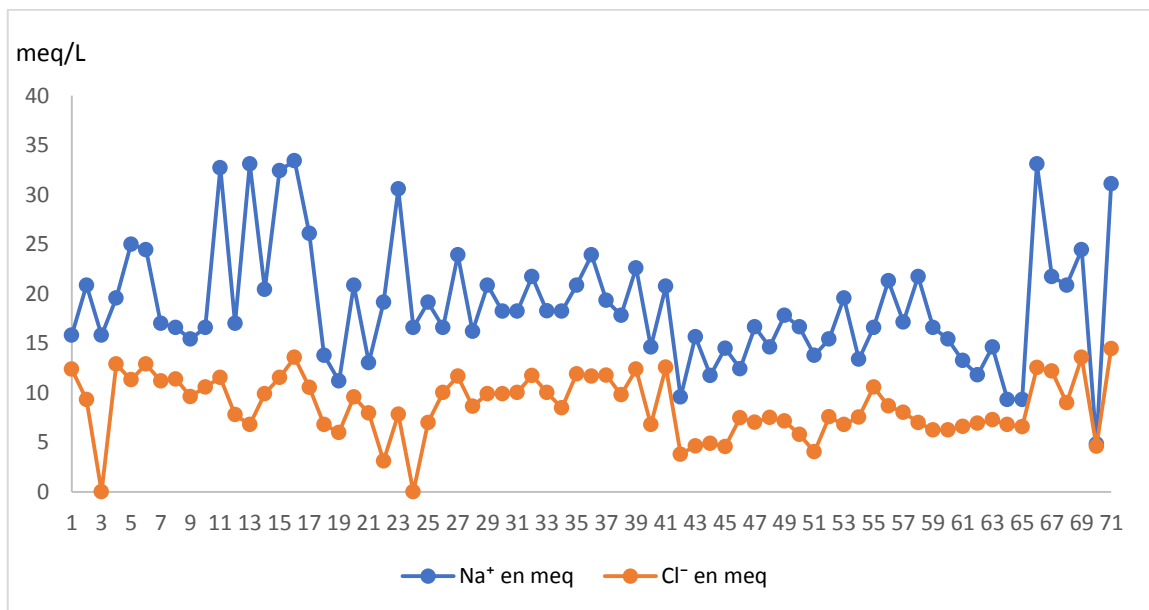


Figure III.15: (Na⁺) = f (Cl⁻)

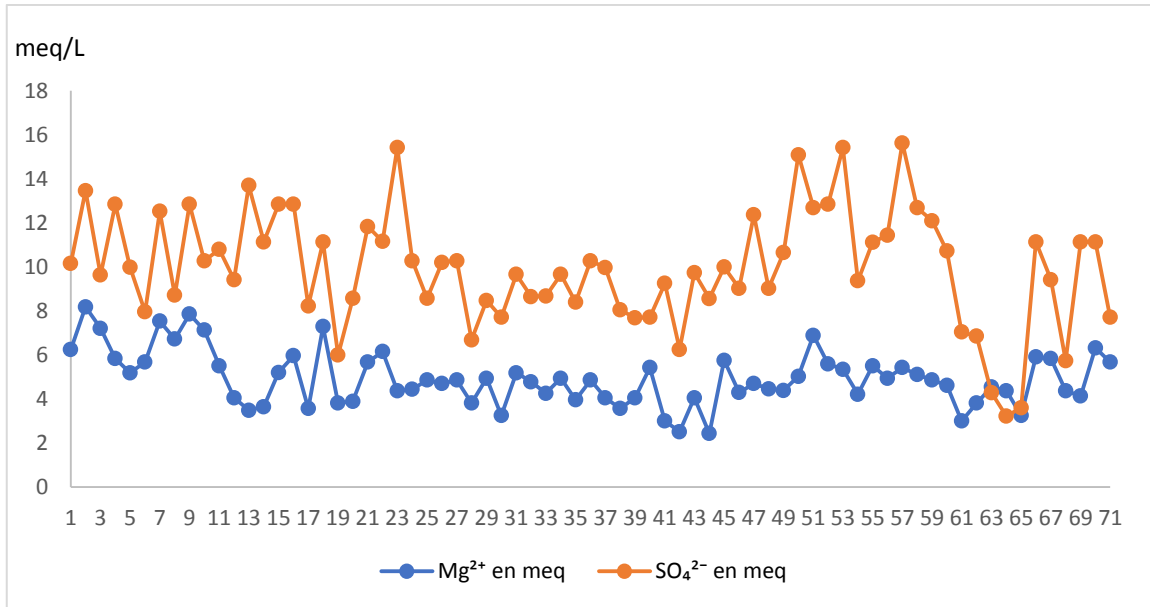


Figure III.16: $(Mg^{2+}) = f(SO_4^{2-})$

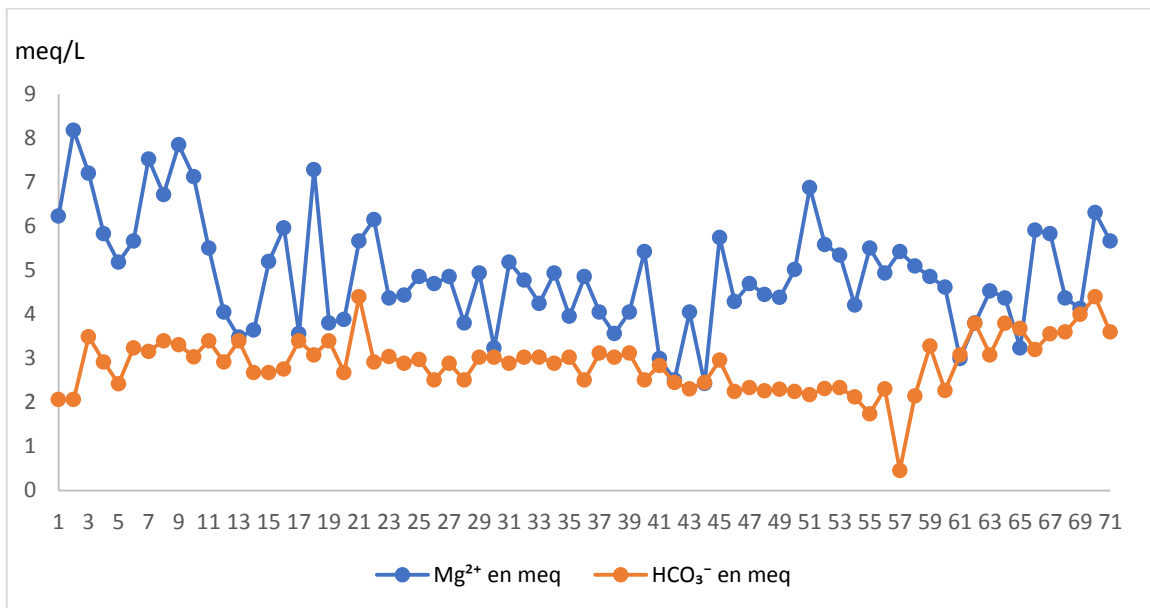


Figure III.17: $(Mg^{2+}) = f(HCO_3^-)$

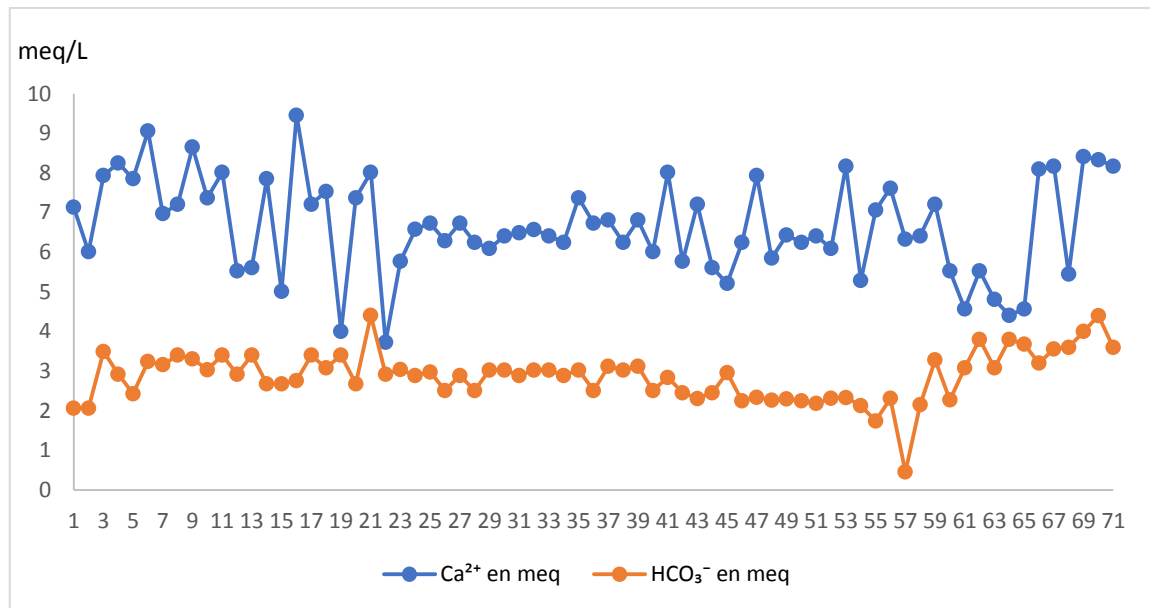


Figure III.18: (Ca^{2+}) = f(HCO_3^-)

Analyse et discussion des résultats

1. Calcium Ca^{2+} vs SO_4^{2-} et HCO_3^-

- À partir des figures (III.13) et (III.18) :
 - Le Ca^{2+} apparaît à des concentrations modérées à élevées (entre 5 et 9 méq/L) dans la majorité des forages.
 - Le HCO_3^- est relativement stable entre 2.5 et 3.5 méq/L, avec une baisse notable dans certains forages (F57).
 - Les SO_4^{2-} présentent une variabilité importante entre les forages, parfois supérieure à celle du calcium.

L'eau contient souvent des niveaux élevés de calcium et de sulfates, indiquant une influence des roches gypseuses ou dolomitiques. Les bicarbonates sont relativement faibles, ce qui suggère une interaction limitée avec des roches carbonatées.

2. Sodium Na^+ vs SO_4^{2-} et Cl^- (Figs. III.14 et III.15)

- Le Na^+ montre des concentrations élevées (entre 15 et 35 méq/L), avec de fortes fluctuations indiquant des sources hétérogènes.
- Les SO_4^{2-} présentent des valeurs moyennes (entre 8 et 14 méq/L), plus stables.
- Les Cl^- atteignent parfois plus de 15 méq/L, notamment dans certains forages (entre F1 et F20, et de F60 à F71).

L'élévation du sodium et du chlorure suggère une influence d'eaux salines, soit par des couches salifères profondes, soit par des activités anthropiques (comme l'irrigation excessive ou les eaux usées). Les grandes variations du Na^+ peuvent aussi indiquer une hétérogénéité géologique.

3. Magnésium Mg^{2+} vs SO_4^{2-} et HCO_3^- (Figs. III.16 et III.17)

- Le Mg^{2+} apparaît à des concentrations modérées à faibles, comparé au Ca^{2+} , souvent entre 3 et 6 méq/L.
- Les SO_4^{2-} dominant toujours, atteignant parfois plus de 15 méq/L.
- Le HCO_3^- reste le composant le plus faible dans la majorité des forages.

Il existe un équilibre chimique entre le magnésium et le sulfate, suggérant la présence possible de minéraux comme l'epsomite (MgSO_4) dans la géologie locale. La faible teneur en HCO_3^- confirme que l'eau n'est pas majoritairement issue de la dissolution de carbonates.

III.3. Analyses statistiques multivariées des variables physicochimiques

III.3.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

III.3.1.1. Principe de l'ACP

Le principe de cette technique est qu'elle permet de résumer à quelques axes factoriels le maximum d'informations contenues dans la masse de données. La projection des individus sur un plan factoriel offre l'avantage d'appréhender la similitude ou l'opposition entre les caractéristiques des individus et les sources de leur variabilité. Le nuage des points formés par le regroupement de certains ions impose une étude bi-variable afin d'apprécier l'apport de chaque ion dans la minéralisation des eaux [22].

III.3.1.2. Méthodologie

L'analyse statistique en composantes principales des résultats de mesures et analyses physicochimiques pour la campagne 201 a été réalisée avec 11 paramètres (conductivité électrique (CE), la minéralisation totale (TDS), le pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) à l'aide du logiciel XLSTAT (2016) [22].

III.3.1.3. Les résultats d'application de l'ACP sur des données chimiques

a) Matrice de corrélation

Le premier résultat de l'ACP qui apparaît, est le coefficient de corrélation qui est couramment utilisé pour estimer la relation entre deux variables. La corrélation des éléments est distinguée par une matrice carrée caractérisée selon un coefficient de corrélation entre les variables deux à deux (degré d'association entre deux variables). Les différentes corrélations entre les variables peuvent être déterminées sur la base du coefficient de corrélation significatif (critique), dans les

Tableaux (III.2) et (III.3), les valeurs en gras sont différentes de 0, et ont un niveau de signification $> 5\%$ [21,22].

Tableau III.2: Matrice de corrélation

Variables	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
pH	1								
CE	0.793	1							
Ca²⁺	0.133	0.152	1						
Mg²⁺	0.053	0.121	0.104	1					
Na⁺	0.095	0.119	0.143	0.063	1				
K⁺	-0.179	-0.184	-0.035	0.004	0.095	1			
HCO₃⁻	-0.077	-0.094	-0.021	-0.002	0.030	0.559	1		
Cl⁻	-0.045	-0.047	0.078	0.076	0.576	0.326	0.091	1	
SO₄²⁻	0.156	0.228	0.046	0.457	0.334	-0.269	-0.372	0.012	1

Tableau III.3: Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux étudiées

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	71	0.000	8.340	1.830	3.418
CE	71	0.000	3.060	0.647	1.005
Ca²⁺	71	74.550	14428.000	502.260	2191.226
Mg²⁺	71	29.160	98.172	59.209	14.867
Na⁺	71	55.560	384.620	216.049	69.683
K⁺	71	5.000	22.000	12.755	3.834
HCO₃⁻	71	27.600	268.640	175.451	38.144
Cl⁻	71	0.000	513.350	307.381	109.421
SO₄²⁻	71	154.330	751.079	478.848	125.831

Le tableau (III.2) relatif à la matrice de corrélation montre que :

- Le calcium Ca²⁺ possède une bonne corrélation avec Na⁺ (R = 0.143) et Mg²⁺ (R = 0.104). La présence des ions Ca²⁺ dans l'eau est liée principalement à une origine naturelle : la dissolution des roches évaporitiques.
- Les sulfate SO₄²⁻ possèdent une bonne corrélation avec Mg²⁺ (R = 0.457), ce qui indique l'origine d'existence d'epsomite (MgSO₄) d'une roche évaporite.
- Les Cl⁻ corrélient avec la plupart des paramètres : SO₄²⁻ (R = 0.012), Ca²⁺ (R = 0.078), Mg²⁺ (R = 0.076), Na⁺ (R = 0.576) et K⁺ (R = 0.326).
- Le sodium Na⁺ possède une bonne corrélation avec le potassium K⁺ (R = 0.095).

b) Etude des valeurs propres

La valeur propre représente la variance des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, nous mettons en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel.

Ces valeurs sont exprimées en pourcentage de la variance totale ainsi que leur valeur cumulée. Le premier axe majeur a une valeur propre de 2.314, ce qui explique 25.709 % de la variance totale. La deuxième composante, qui est de 1.852, représente 20.575 % de la variance totale. Le troisième axe, qui est 1.444, représente 16.041 % de la variance totale.

Le quatrième axe, qui est 1.071, représente 11.902 % de la variance totale. Le cinquième axe, qui est de 0.938, représente 10.419 % de la variance totale. Ces cinq axes contiennent toutes les informations, représentant 84.647 % de la variance totale. Les cinq facteurs (axes) traduisent les informations de base requises et permettent une représentation significative du nuage de points, puisque la variance totale exprimée par ces facteurs est de 84.647 %. Cela suffit pour analyser les variables et les individus [7].

Tableau III.4 : Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	2.314	1.852	1.444	1.071	0.938
Variabilité (%)	25.709	20.575	16.041	11.902	10.419
% Cumulé	25.709	46.284	62.326	74.228	84.647

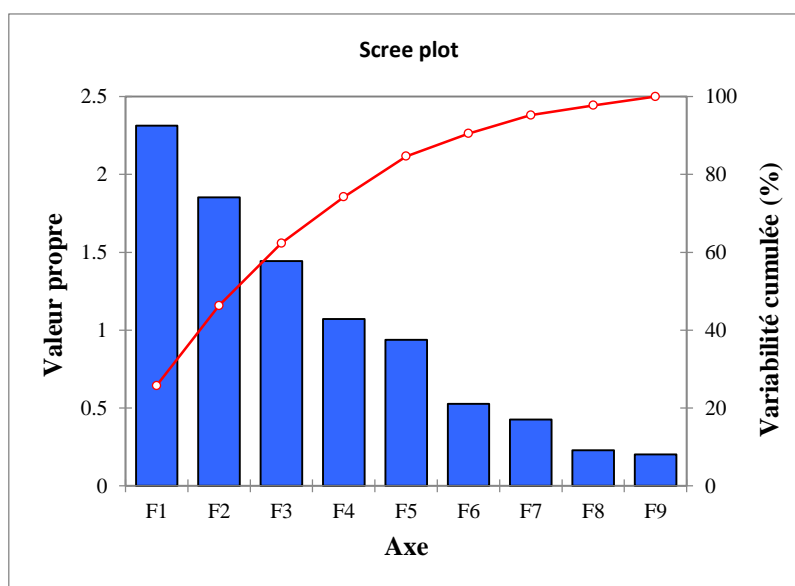


Figure III.19: Valeurs propres des axes et leurs contributions

c) Etude des variables

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant [7].

Tableau III.5 : Corrélations entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3	F4	F5
pH	0.691	0.065	0.627	-0.031	-0.146
CE	0.736	0.091	0.570	0.028	-0.133
Ca ²⁺	0.252	0.240	0.124	-0.028	0.925
Mg ²⁺	0.354	0.268	-0.317	0.764	0.042
Na ⁺	0.244	0.768	-0.200	-0.352	-0.093
K ⁺	-0.565	0.545	0.257	0.268	-0.079
HCO ₃ ⁻	-0.527	0.374	0.474	0.376	-0.030
Cl ⁻	-0.078	0.808	-0.143	-0.314	-0.077
SO ₄ ²⁻	0.667	0.170	-0.508	0.222	-0.139

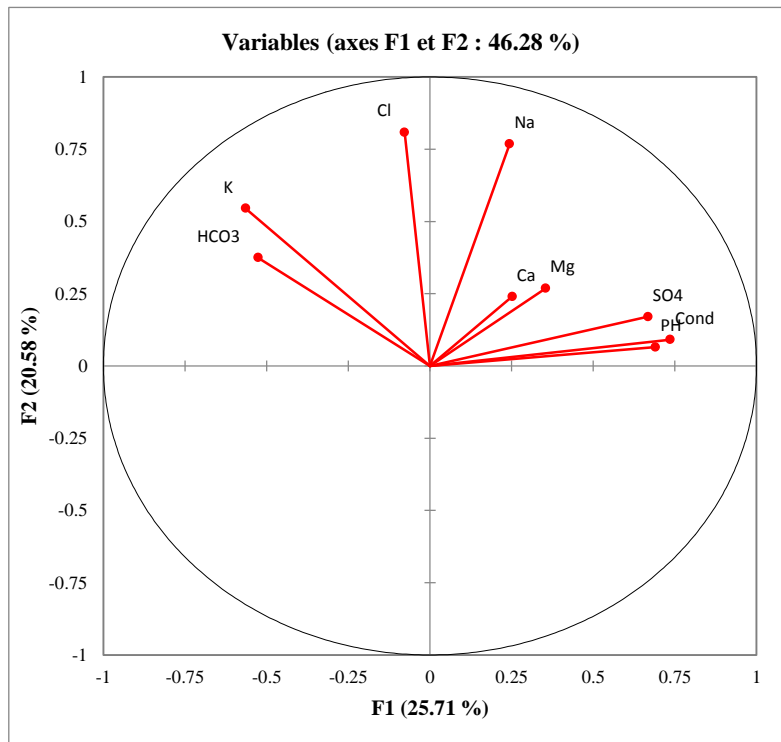


Figure III.20: Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (Axes F1 et F2)

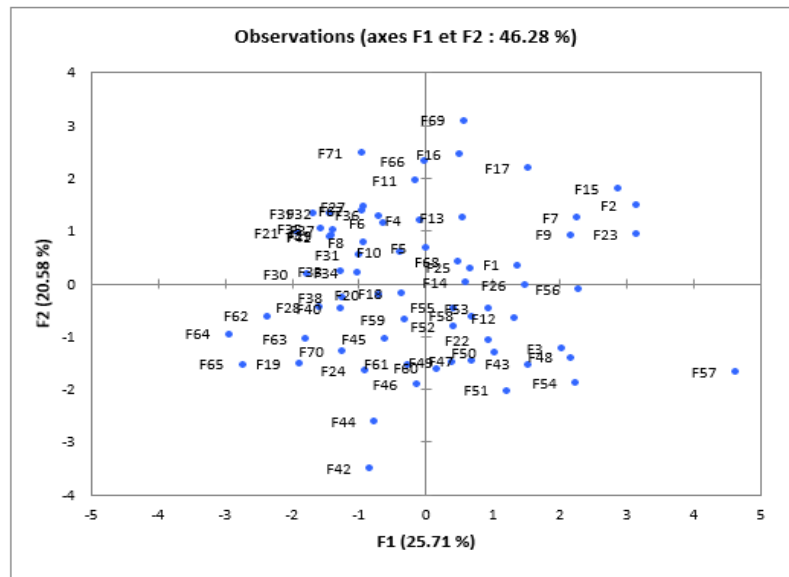


Figure III.21: Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)

c.1) Analyses du cercle de corrélation des variables

Ce graphique illustre les corrélations entre les variables physico-chimiques des eaux souterraines (Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , pH et conductivité électrique) selon les deux premiers axes factoriels (F1 et F2), qui expriment ensemble **46.28 %** de la variance totale.

Observations

- SO_4^{2-} , CE, Na^+ et Cl^- sont bien représentés et alignés sur les axes principaux, indiquant leur contribution significative à la variance.
- Na^+ et Cl^- sont fortement corrélés, comme en témoigne leur proximité et leur direction commune.
- HCO_3^- et K^+ ont une contribution plus faible et se situent dans une direction différente, indiquant un comportement distinct.
- Ca^{2+} et Mg^{2+} , proches du centre, montrent une faible contribution aux axes F1 et F2.
- **La conductivité électrique (CE)** est fortement liée à Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} ; ce qui suggère que leur concentration influence directement la salinité de l'eau.

c.2) Analyses de projection des individus (forages) sur le plan factoriel (F1-F2)

Ce graphique présente la distribution de 71 forages (représentés par des points bleus) sur les mêmes axes F1 et F2, ce qui permet de visualiser les similitudes ou les différences entre leurs caractéristiques chimiques.

Observations

- Les forages **F57, F54, F3, F43** situés à droite (valeurs positives de F1) sont probablement riches en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et ont une conductivité élevée.

- Les forages comme **F42, F44, F64, F62** à gauche ont probablement une faible salinité ou une composition chimique différente.
- Plusieurs puits sont regroupés au centre (comme **F30 à F39**), ce qui traduit une composition chimique similaire.
- Les forages en haut du graphique (exemple : **F69, F66**) sont influencés par les variables verticales du cercle de corrélation, notamment Cl^- .

c.3) Analyse générale et interprétation

- **Les forages ne présentent pas tous les mêmes caractéristiques chimiques** : certains sont marqués par une forte minéralisation (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}).
- **Des regroupements (clusters)** sont visibles, indiquant qu'une classification des forages selon leur composition est possible.
- **Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} sont les variables discriminantes les plus importantes**, utiles pour évaluer la salinité ou typologie hydrogéochimique.
- **Les points d'eau situés aux extrémités du plan factoriel** peuvent représenter des cas particuliers (influences géologiques ou anthropiques).

d) Etude des individus (Observations)

Après avoir réparti les individus au niveau global (F1, F2), nous avons obtenu la figure ci-après.

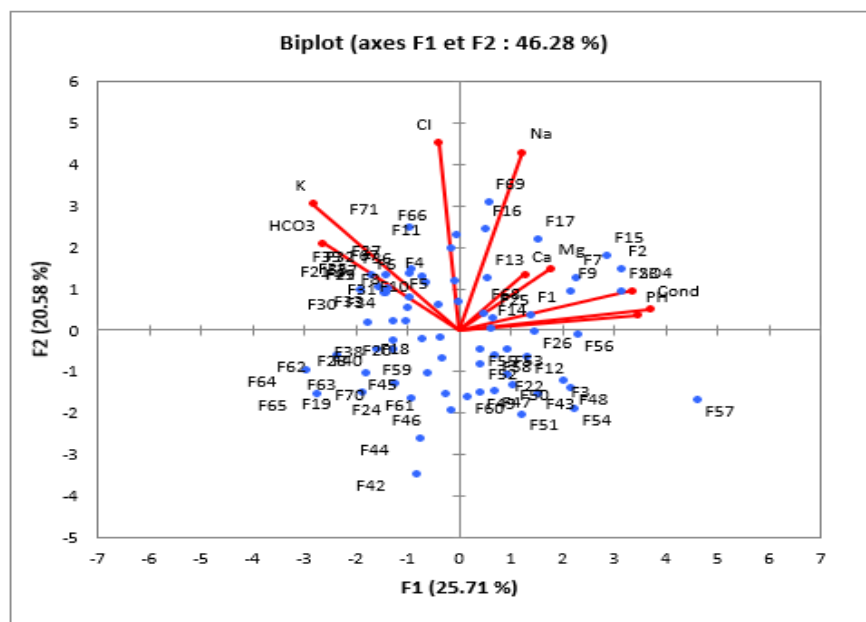


Figure III.22 : Répartition des individus sur le plan (F1 et F2)

Groupe 1 : Les points d'eau en haut à droite (par exemple F17, F59, F13, F9) sont situés dans le quadrant supérieur droit ($F1 > 0$, $F2 > 0$).

➤ Caractéristiques

- Forte influence des variables Na^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CE → eaux fortement minéralisées.
- Potentiellement salinité élevée, probablement en lien avec une origine évaporitique ou influence anthropique (surexploitation, contact avec une eau saline ...).
- Moins recommandées pour la consommation humaine sans traitement.

Groupe 2 : Forages situés en bas à droite (par exemple F56, F54, F6, F5) dans le quadrant inférieur droit ($F1 > 0$, $F2 < 0$).

➤ Caractéristiques

- Toujours influencés par Na^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , mais avec des contributions différentes (plus axées sur F1 que F2).
- Minéralisation probablement modérée à élevée, mais avec un profil chimique différent du Groupe 1.
- Ces eaux peuvent être moins agressives, mais à confirmer par d'autres paramètres (pH, dureté...).

Groupe 3 : Forages situés en haut à gauche (par exemple F71, F66, F30, F31) dans le quadrant supérieur gauche ($F1 < 0$, $F2 > 0$).

➤ Caractéristiques

- Plus influencés par des ions comme K^+ et HCO_3^- .
- Eaux probablement moins salines, peut-être issues de zones peu impactées par les activités humaines.
- Possibilité de bonne qualité pour l'irrigation ou la consommation, selon d'autres critères.

Groupe 4 : Forages situés en bas à gauche (ex. F42, F44, F64, F65, F48) dans le quadrant inférieur gauche ($F1 < 0$, $F2 < 0$).

➤ Caractéristiques

- Faible influence de toutes les variables → eaux pauvres en minéraux, donc faible minéralisation globale.
- Peut indiquer des zones de recharge, ou des puits récents avec moindre contact avec les roches.
- Eaux a priori de bonne qualité, mais à confirmer avec les paramètres microbiologiques.

III.3.2. Analyse par la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

III.3.2.1. Principe de la CAH

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple, on commence par le calcul de la dis-similarité des (N) objets, puis on regroupe les deux objets dont le groupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.

On calcule ensuite la dis-similarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classe d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.

On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés, ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie des partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant d'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur, soit des critères de plus objectifs [22,24].

III.3.2.2. Avantages de la technique

La méthode de classification hiérarchique (CAH) porte les avantages suivants :

- On travaille à partir des dis-similarités entre les objets que l'on veut regrouper, donc on peut choisir un type de dis-similarité adapté au sujet étudié et à la nature des données.
- L'un des résultats est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données, on peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classe dans lesquelles les données peuvent être regroupées [21,22,24].

III.3.2.3. Les résultats d'application de la CAH sur des données chimiques

Un schéma (dendrogramme) de classification est élaboré en mesurant la distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace C-dimensions défini par des variables C) pour la mesure de similarité, produit les groupes les plus distinctifs où chaque membre dans le groupe est plus similaire à ses membres que tout membre en dehors du groupe.

L'analyse de faisceau du dendrogramme a été employée pour déterminer si les échantillons peuvent être groupés dans les groupes hydrochimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique.

Les comparaisons basées sur des paramètres multiples de différents échantillons ont été faites et les échantillons ont été groupés en fonction de leur "similitude" entre eux, et le résultat est présenté comme des dendrogrammes [22].

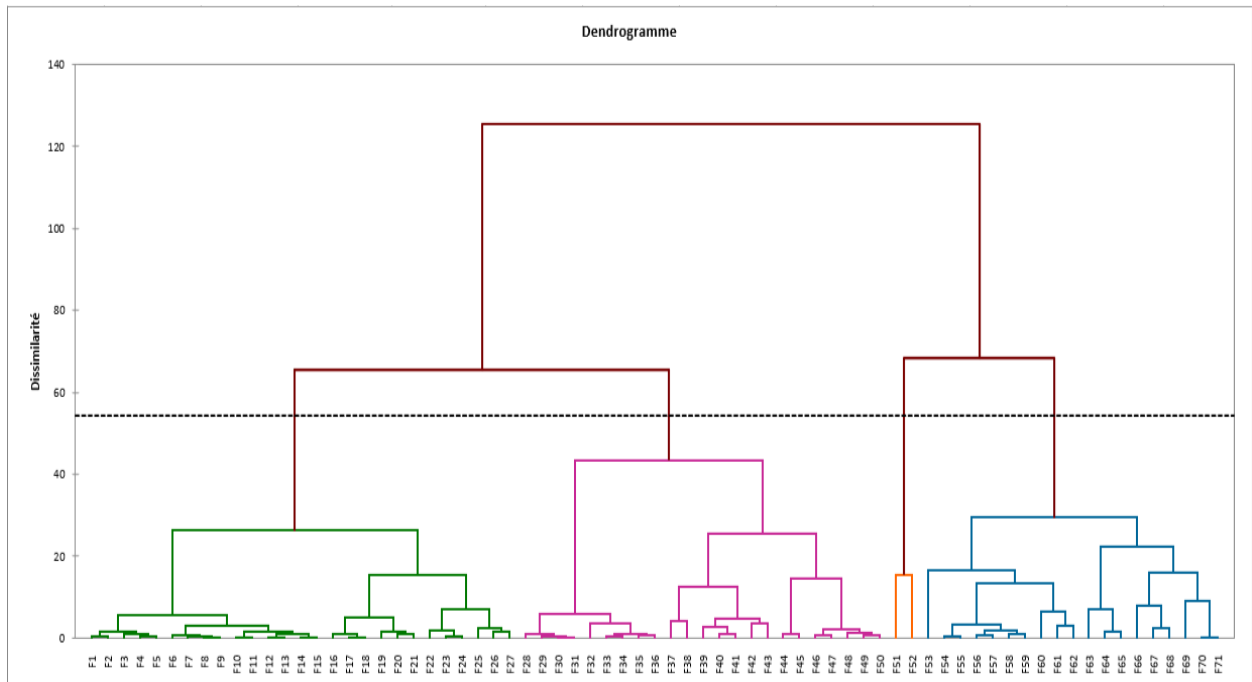


Figure III.23 : Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)

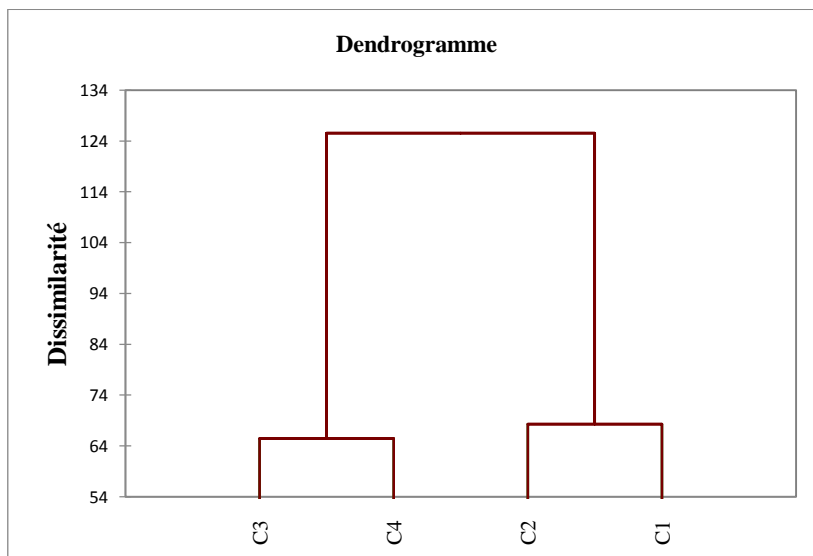


Figure III.24 : Hiérarchie des partitions (intra-classes et interclasses) obtenues par CAH

Analyse de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

Cette analyse de groupement met en évidence quatre groupes distincts de forages dans la wilaya de Ghardaïa, comme l'indique le dendrogramme (Fig. III.23).

- Le **groupe G1**, regroupant des forages tels que F1 à F27 (approximativement), présente une forte similarité interne. Ce groupe pourrait correspondre à une zone homogène sur le plan géographique ou structurel, possédant des caractéristiques communes, telles que, le débit ou le type de captage.

- Le **groupe G2**, constitué des forages F28 à F50, se distingue par une légère différence de dissimilarité avec G1. Il est probable que ce groupe soit influencé par des conditions locales différentes, comme un changement de géologie ou de profondeur d'exploitation.
- Le **groupe G3**, constitué des forages F51 et F52, montre un regroupement plus compact, ce qui pourrait indiquer une gestion centralisée ou une source commune. Ce groupe pourrait être lié à une nappe particulière ou à un secteur urbain structuré.
- Enfin, le **groupe G4**, englobant les forages F56 à F71, forme un ensemble nettement séparé des autres. Il pourrait s'agir de forages atypiques, soit par leur éloignement géographique, soit par leur fonctionnement spécifique (par exemple, alimentation intermittente, qualité physico-chimique différente, etc.).

III.4. Conclusion partielle

L'analyse hydrogéochimique des eaux souterraines de la wilaya de Ghardaïa révèle une grande variabilité dans les caractéristiques chimiques des puits étudiés. Cette hétérogénéité suggère une diversité des conditions géologiques et hydrodynamiques influençant la qualité des eaux.

Les analyses statistiques ont permis d'identifier des regroupements potentiels d'échantillons (Clusters), indiquant la possibilité de classer les puits en groupes homogènes selon la composition ionique de leurs eaux.

Les ions dominants tels que Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} ainsi que la conductivité électrique (CE) jouent un rôle déterminant dans la différenciation des types d'eau. Ces éléments sont directement liés à la salinité élevée observée dans plusieurs échantillons.

Du point de vue hydrochimique, les eaux sont principalement de type chloruré-sulfaté calcique et magnésien, et chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique.

Certaines anomalies, comme les forages 55 à 60 montrant une baisse marquée des concentrations ioniques, peuvent signaler des apports récents en eau ou une traversée de formations géologiques différentes.

Enfin, la distribution spatiale des caractéristiques chimiques met en évidence la pluralité des sources d'alimentation de la nappe et les influences géologiques locales, ce qui est crucial pour toute démarche de gestion durable des ressources en eau dans la région.

Chapitre IV

Indice de qualité des eaux souterraines

Chapitre IV : Indice de qualité des eaux souterraines

IV.1. Introduction

L'indice de qualité de l'eau est un outil parmi les plus efficaces pour évaluer la qualité des eaux souterraines. Son utilisation s'est généralisée ces dernières années grâce à sa capacité à intégrer des données complexes et à produire un score synthétique représentant la qualité de l'eau [22,25].

IV.2. Définition de l'indice de qualité des eaux souterraines

L'Indice de Qualité des Eaux Souterraines (IQES) est une méthode d'évaluation permettant de mesurer l'impact de chaque paramètre sur la qualité globale de l'eau. Il permet d'attribuer une valeur unique facilitant la comparaison entre plusieurs échantillons.

Avec l'indice de qualité de l'eau, nous pouvons obtenir un nombre qui exprime la qualité globale de l'eau, en fonction de plusieurs paramètres de qualité.

Pour déterminer la potabilité des eaux souterraines, l'indice de qualité de l'eau a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$IQES = \frac{\sum_{i=1}^n q_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Où,

q_i : Indice d'évaluation de la qualité de chaque paramètre utilisé i .

n : Nombre total des paramètres de qualité de l'eau.

W_i : Facteur de pondération calculé en utilisant l'équation :

$$W_i = \frac{K}{S_i}$$

Où,

S_i : Valeur normale du paramètre de qualité de l'eau i (Pour notre étude s'est les normes de qualité citées dans le chapitre II).

K : Constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}}$$

L'indice d'évaluation de la qualité de chaque paramètre utilisé (q_i) est calculé par la formule :

$$q_i = [(V_a - V_i) / (S_i - V_i)].100$$

V_a : Valeur réelle du paramètre de qualité de l'eau $i^{ème}$ obtenue à partir de l'analyse en laboratoire.

V_i : Valeur idéale du paramètre de qualité de l'eau $i^{ème}$ obtenue à partir des tableaux standards (V_i pour pH = 7 et pour les autres paramètres est équivalent à zéro).

Les valeurs de S_i , V_i et W_i sont données par le [Tableau \(IV.2\)](#).

IV.3. Méthode de calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines (IQES)

Onze paramètres issus de 71 forages répartis sur toute la zone ont été analysés pour calculer l'IQES. Ces paramètres sont : pH, CE, turbidité, dureté totale (TH), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} . Chaque paramètre est pondéré (W_i), et son indice d'évaluation (q_i) est calculé à partir des résultats d'analyses de laboratoire. L'IQES est ensuite déterminé selon une formule standard, avec une classification suivant le [Tableau \(IV.1\)](#) [22,25-27].

Tableau IV.1 : Statut de la qualité de l'eau basée sur IQES

Classes	Indice de qualité	Définition de la classe de qualité
01	0-25	Excellente qualité
02	26-50	Bonne qualité
03	51-75	Qualité pauvre
04	76-100	Très pauvre qualité
05	>100	Impropre à la consommation

Tableau IV.2 : Paramètres de qualité d'eau, valeurs standard, les valeurs idéales et facteurs de poids de l'eau (Irrigation)

Paramètre	Valeurs standards (S_i)	Valeurs idéales (V_i)	Poids relatif (W_i)
pH	8.5	7	0.111111111
CE ($\mu S/cm$)	2800	0	0.111111111
Cl^- (mg/L)	500	0	0.027777778
SO_4^{2-} (mg/L)	400	0	0.083333333
Ca^{2+} (mg/L)	200	0	0.083333333
Na^+ (mg/L)	200	0	0.083333333
K^+ (mg/L)	12	0	0.083333333
Mg^{2+} (mg/L)	50	0	0.083333333
HCO_3^- (mg/L)	400	0	0.083333333
Turbidité (NTU)	5	0	0.138888889
TH (mg/L)	150	0	0.111111111
		Total	1

La [Figure \(IV.1\)](#) illustre la classification des eaux souterraines selon l'indice de qualité (IQES). L'analyse des données révèle que 13.89 % des points (5/36) présentent une eau de bonne qualité. 83.33 % (30/36) ont une qualité pauvre, et 2.78 % (1/36) offrent une qualité très pauvre. Ces résultats sont détaillés dans le [Tableau \(IV.3\)](#).

Tableau IV.3 : L'indice de qualité pour les forages - Irrigation

Nome forage	IQES	Qualité
F19	48.63	Bonne qualité
F42	39.81	Bonne qualité
F44	49.6	Bonne qualité
F61	48.6	Bonne qualité
F65	47.14	Bonne qualité
F7	73.77	Qualité pauvre
F10	70.21	Qualité pauvre
F18	71.75	Qualité pauvre
F20	60.8	Qualité pauvre
F24	60.49	Qualité pauvre
F25	62.65	Qualité pauvre
F26	64.05	Qualité pauvre
F31	64.81	Qualité pauvre
F32	65.35	Qualité pauvre
F34	75.87	Qualité pauvre
F38	67.26	Qualité pauvre
F39	63.78	Qualité pauvre
F40	60.12	Qualité pauvre
F41	62.53	Qualité pauvre
F46	52.38	Qualité pauvre
F47	59.97	Qualité pauvre
F48	53.97	Qualité pauvre
F49	56.03	Qualité pauvre
F50	63.06	Qualité pauvre
F51	61.75	Qualité pauvre
F52	63.59	Qualité pauvre
F53	69.47	Qualité pauvre
F55	62.12	Qualité pauvre
F56	62.82	Qualité pauvre
F57	59.36	Qualité pauvre
F58	63.58	Qualité pauvre
F60	56.12	Qualité pauvre
F62	57.55	Qualité pauvre
F63	52.27	Qualité pauvre
F64	51.93	Qualité pauvre
F33	86.1	Très pauvre qualité

Le tableau ci-après récapitule la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.

Tableau IV.4: Etat récapitulatif de la qualité des eaux souterraines des forages - Irrigation

Classes (IQES)	Qualité attribuée	Nombre de points	%
0-25	Excellente qualité	0	0 %
26-50	Bonne qualité	5	13.89 %
51-75	Qualité pauvre	30	83.33 %
76-100	Très pauvre qualité	1	2.78 %
>100	Impropre à la consommation	0	0 %

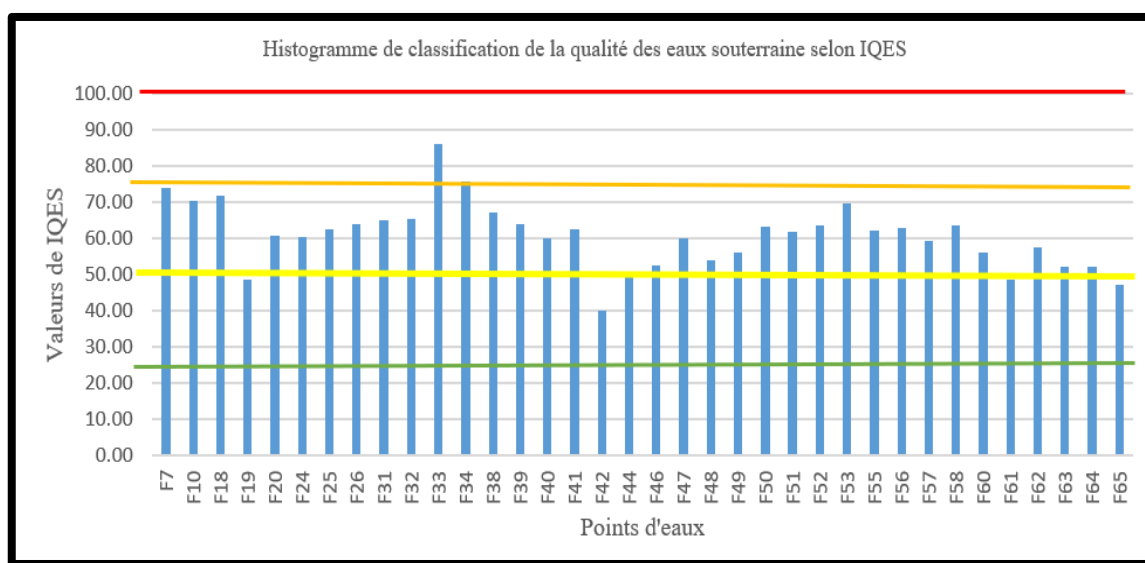


Figure IV.1 : Histogramme de classification de la qualité des eaux des forages d'irrigation

IV.4. Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine IQES de l'irrigation

L'indice de la qualité des eaux souterraines (IQES) a été formulé à partir d'une formule basée sur 07 éléments chimiques cationiques et anioniques, ainsi que les pH, CE, Turbidité et TH. Une classification cartographique par le biais de l'outil géostatistique (*interpolation par Krigeage ordinaire*) comme indiqué sur la [Figure \(IV.2\)](#).

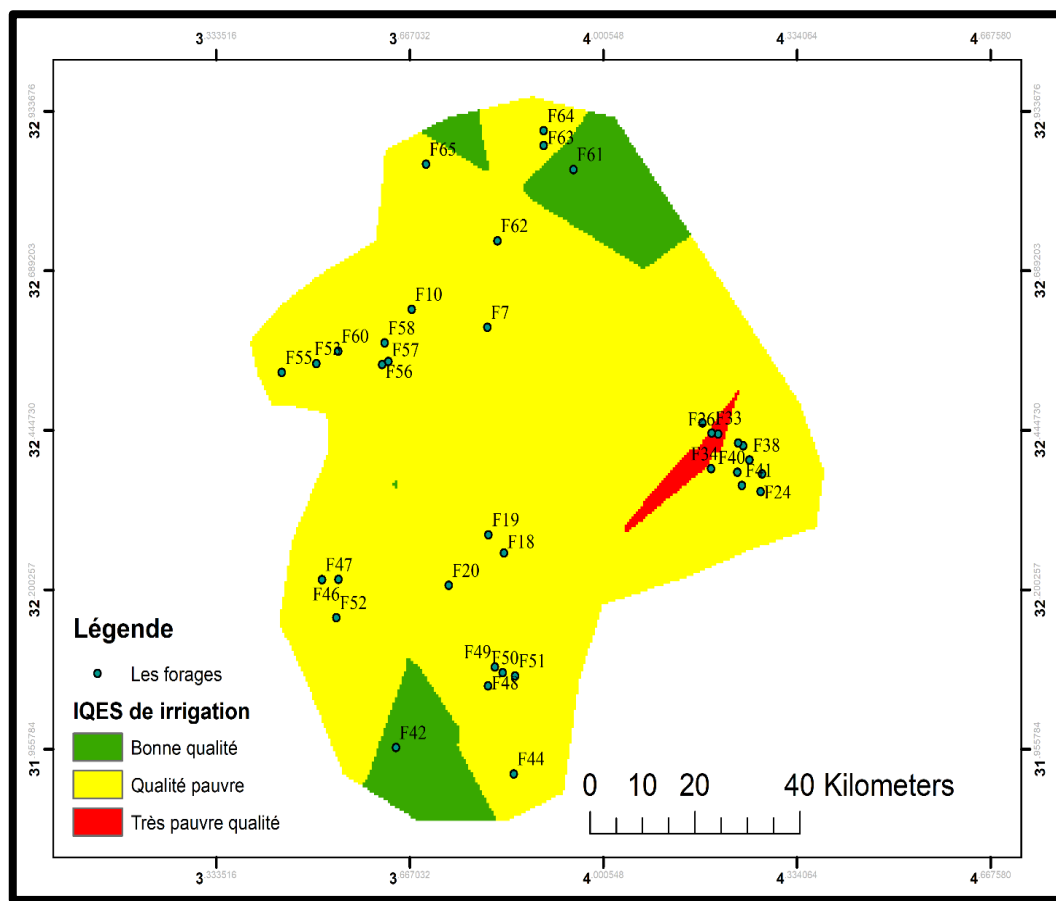


Figure IV.2 : Répartition spatiale de l’IQES de l’irrigation

Nous remarquons que la "qualité pauvre" est prédominante dans toute la zone d'étude, ce qui indique une mauvaise qualité de l'eau, représentant 83 % des échantillons étudiés (36 forages). Dans ce cas, il est nécessaire de traiter l'eau avant son utilisation en irrigation afin d'éviter tout risque pour la santé des plantes. Le forage (F33) est d'une très pauvre qualité et tous les forages se trouvant à son voisinage doivent être surveillés et contrôlés pour ne pas détériorer leurs qualités.

Tableau IV.5 : Paramètres de qualité d'eau, valeurs standard, les valeurs idéales et facteurs de poids de l'eau - AEP

Paramètre	Valeurs standards (Si)	Valeurs Idéal (Vi)	Poids relatif (Wi)
pH	8.5	7	0.111111111
CE (µS/cm)	2800	0	0.111111111
Cl ⁻ (mg/L)	250	0	0.027777778
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	400	0	0.083333333
Ca ²⁺ (mg/L)	200	0	0.083333333
Na ⁺ (mg/L)	200	0	0.083333333
K ⁺ (mg/L)	12	0	0.083333333
Mg ²⁺ (mg/L)	150	0	0.083333333
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	400	0	0.083333333
Turbidité (NTU)	2	0	0.138888889
TH (mg/L)	500	0	0.111111111
		Total	1

La Figure (IV.3) illustre la classification des eaux souterraines selon l'indice de qualité (IQES).

L'analyse des données révèle que 17.14 % des points (6/35) présentent une eau de bonne qualité. 74.29 % (26/35) ont une qualité pauvre, et 8.57 % (3/35) offrent une qualité très pauvre. Ces résultats sont détaillés dans le tableau (IV.6).

Tableau IV.6 : L'indice de qualité pour les forages - AEP

Nome forage	IQES	Qualité
F54	41.47	Bonne qualité
F43	47.75	Bonne qualité
F12	48.03	Bonne qualité
F45	49.40	Bonne qualité
F28	49.91	Bonne qualité
F22	50.59	Qualité pauvre
F30	51.59	Qualité pauvre
F1	55.86	Qualité pauvre
F68	55.88	Qualité pauvre
F14	55.98	Qualité pauvre
F29	56.00	Qualité pauvre
F59	56.54	Qualité pauvre
F17	57.14	Qualité pauvre
F8	57.83	Qualité pauvre
F36	59.11	Qualité pauvre
F3	59.49	Qualité pauvre
F6	59.50	Qualité pauvre
F27	59.99	Qualité pauvre
F2	60.42	Qualité pauvre
F13	61.41	Qualité pauvre
F23	62.79	Qualité pauvre
F4	62.84	Qualité pauvre
F35	63.34	Qualité pauvre
F11	64.00	Qualité pauvre
F37	64.38	Qualité pauvre
F9	64.39	Qualité pauvre
F67	66.47	Qualité pauvre
F15	67.97	Qualité pauvre
F5	68.09	Qualité pauvre
F71	68.13	Qualité pauvre
F16	68.80	Qualité pauvre
F66	73.11	Qualité pauvre
F69	78.01	Très pauvre qualité
F70	84.30	Très pauvre qualité
F21	97.88	Très pauvre qualité

Le [Tableau \(IV.7\)](#) donne l'état récapitulatif sur la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.

Tableau IV.7: Etat récapitulatif de la qualité des eaux souterraines des forages - AEP

Classes (IQES)	Qualité Attribuée	Nombre de points	%
0-25	Excellente qualité	0	0 %
26-50	Bonne qualité	6	17.14 %
51-75	Qualité pauvre	26	74.29 %
76-100	Très pauvre qualité	3	8.57 %
>100	Impropre à la consommation	0	0 %

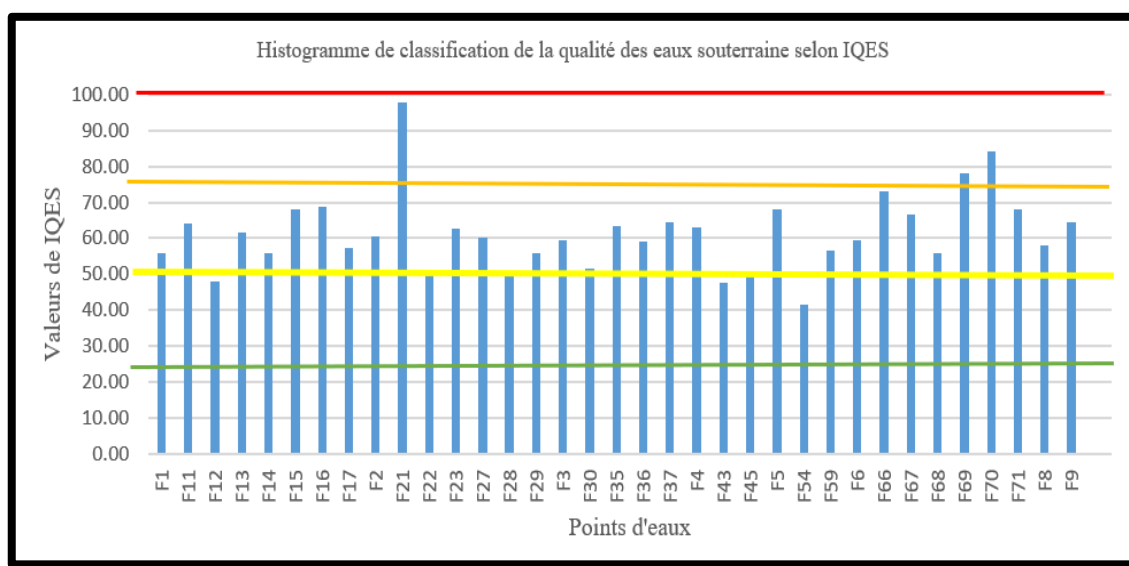


Figure IV.3 : Histogramme de classification de la qualité des eaux des forages d'AEP

IV.5. Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine IQES d'AEP

L'indice de la qualité des eaux souterraines (IQES) a été formulé à partir d'une formule basée sur 07 éléments chimiques cationiques et anioniques, ainsi que les pH, CE, Turbidité et TH. Une classification cartographique par le biais de l'outil géostatistique (*interpolation par Krigeage ordinaire*) comme indiqué sur la [Figure \(IV.4\)](#).

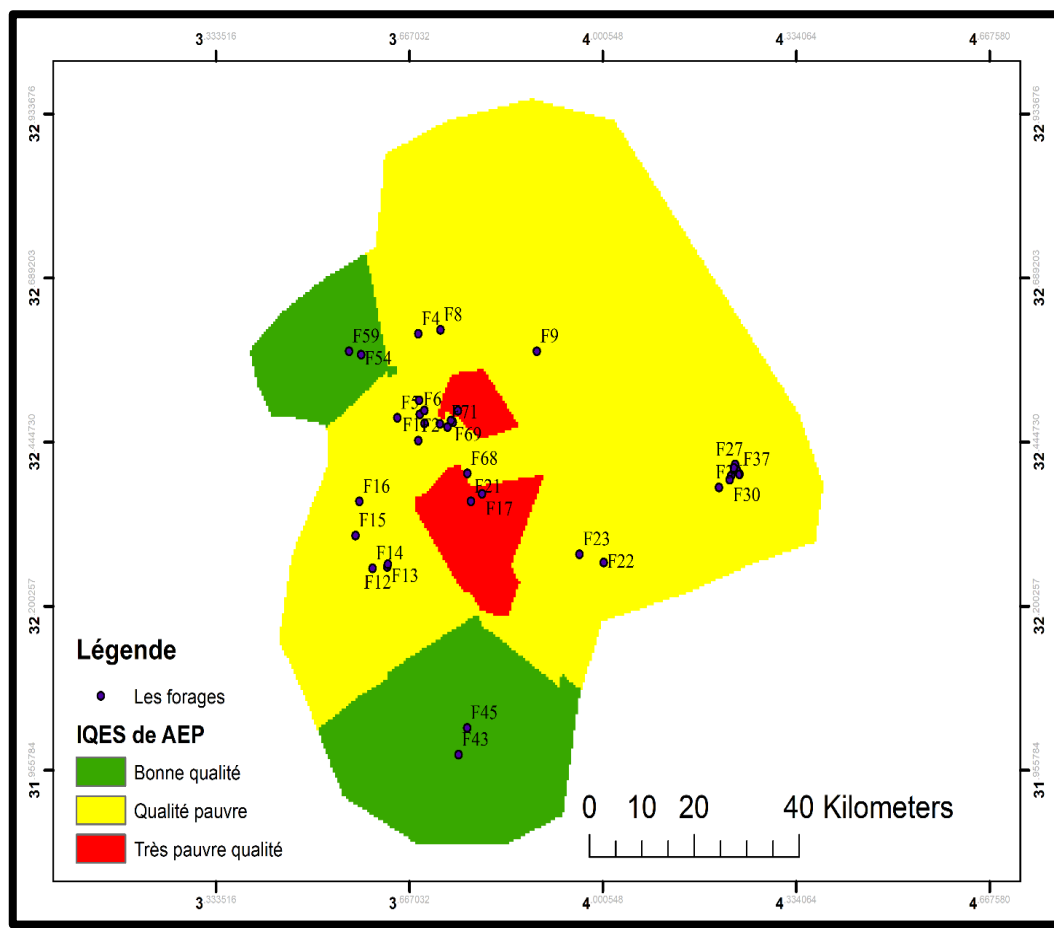


Figure IV.4 : Répartition spatiale de l'IQES d'AEP

Nous constatons que la "qualité pauvre" est prédominante dans les régions Nord et Est, indiquant une mauvaise qualité de l'eau, représentant 74.29 % des échantillons étudiés (35 forages). Dans ce cas, il est nécessaire de traiter l'eau avant utilisation en AEP pour éviter tout risque de santé des consommateurs. Il convient de noter que trois forages (F21,F69,F70) ne doivent pas être utilisés et que tous les forages voisins doivent être surveillés en raison de leur mauvaise qualité. Quant aux autres forages, ils sont en bon état, stables et consommables, et la majorité d'entre eux sont situés dans les parties Sud et Ouest, représentant 17.14 %.

IV.6. Conclusion partielle

Le calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation et sa représentation temporelle et spatiale montrent que la qualité de l'eau dans les parties Ouest, Sud et Nord de la zone d'étude est bonne, tandis que l'Est de la zone présente un forage d'une mauvaise qualité (F33). Ce dernier ne peut être utilisé dans l'irrigation.

Pour le cas des eaux de consommation humaine, la qualité de l'eau dans la majeure partie de la zone d'étude est relativement bonne, mais elle diminue progressivement vers le centre-sud. Dans cette zone, trois forages ont été identifiés comme impropres à la consommation, nécessitant un suivi particulier.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de déterminer l'état actuel des eaux souterraines de la wilaya de Ghardaïa en termes d'hydrochimie et de qualité. Les principaux résultats obtenus sont :

- L'étude morphométrique des sous-bassins indique une forme allongée et assez irrégulière, avec un relief relativement prononcé. La superficie totale est de 14 973 km², constituant un périmètre de 644.5 km. Le climat de la région est tropical désertique, avec une température moyenne hivernale de 11.4 °C et estivale de 34.4 °C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 60 mm/an.
- La wilaya de Ghardaïa est située dans la partie nord du désert du Sahara algérien. Son relief est principalement constitué de roches sédimentaires datant du Crétacé et du Tertiaire, notamment de calcaire, de grès et de marne. La région présente plusieurs failles et plis résultant d'anciens mouvements tectoniques, qui influencent la circulation des eaux souterraines. Malgré son caractère désertique, Ghardaïa dispose d'importantes ressources en eaux souterraines, notamment le grand aquifère du Sahara Septentrional (SASS), ou le Continental Intercalaire (CI) est le principal aquifère utilisé.
- Le calcul de la balance ionique des eaux souterraines dans la zone d'étude a montré que la fiabilité des analyses était acceptable ou excellente pour tous les forages.
- La qualité chimique de l'eau dans la zone d'étude montre que la plupart des eaux souterraines sont très dures (TH > 50 °F) et que les teneurs en sulfates sont élevées (SO₄²⁻ > 200 mg/L) dans la plupart des eaux souterraines par rapport aux normes de qualité de l'eau potable.
- Les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schöeller-Berkaloff ont montré que la qualité des eaux souterraines est dominée par les faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien et chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique. Une évolution hydrochimique a été observée, passant d'une eau riche en bicarbonates à une eau plus minéralisée, démontrant que la composition de l'eau est hétérogène et varie selon la localisation géographique des forages.
- L'évaluation de la qualité chimique des eaux souterraines de la wilaya de Ghardaïa pour l'usage agricole en utilisant le diagramme de Wilcox a montré l'existence de quelques forages appartenant aux catégories (C2-S1) et (C3-S1), c'est-à-dire, eaux modérément salées et faiblement alcalines, adaptées à l'irrigation sans grand risque. La plupart des forages se trouvent dans les deux zones (C4-S3) et (C4-S4), donc leurs eaux ne

conviennent pas à l'irrigation. Elles peuvent être utilisées dans l'irrigation sous certaines conditions : drainage intensif, sols très perméables, bon lessivage, cultures très tolérantes au sel.

- L'interprétation des données par les méthodes statistiques multivariées a montré que la variation des éléments chimiques est très significative, et les résultats obtenus indiquent que les paramètres responsables des variations de la qualité de ces eaux sont principalement liés à la présence et à la dissolution de certains minéraux carbonatés et évaporitiques gypso-salifères dans l'aquifère, ainsi que par les activités anthropiques tout au long des bassins étudiés.
- Le calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines et sa représentation spatio-temporelle montrent que les eaux de la zone d'étude, présentent 17.14 % de bonne qualité et 74.29 % d'une qualité pauvre pour l'AEP, et 13.89 % de bonne qualité, avec 86.11 % d'une qualité pauvre pour l'irrigation. Trois forages ont été classés comme impropres à la consommation humaine (F21,F69,F70) et un forage à ne pas utiliser pour l'irrigation (F33).

A titre de recommandations, nous proposons :

- Arrêter le déversement direct des rejets urbains et industriels au niveau des Oueds, en réalisant un traitement préalable de ces eaux usées avant qu'ils atteignent le milieu récepteur, et surveiller en permanence la qualité des eaux.
- Convaincre les responsables des services concernés d'instaurer dans la conception des forages d'eau la notion des périmètres de protection.
- Conseiller les agriculteurs à limiter l'utilisation intensive des engrais chimiques et des pesticides dans les sols à forte perméabilité, afin de limiter l'infiltration des éléments chimiques vers la nappe, et de modérer les pompages en utilisant des techniques d'irrigation économiques.
- Recharger la nappe par la réalisation de petites retenues d'eau de pluie.
- Rationaliser la consommation de l'eau et éviter sa surexploitation.
- Installer un réseau de piézomètres à hautes fréquences à travers les nappes pour contrôler la fluctuation du niveau piézométrique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Gharda%C3%AFa
- [2] Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (ANIREF), Monographie de la wilaya de Ghardaïa, 2022
- [3] Journal Officiel de la République Algérienne N° 78, 21 Rabie Ethani 1441 - 18 décembre 2019, Art. 51).
- [3] <https://fr.weatherspark.com/y/48886/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Gharda%C3%AFa-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- [4] H. Benabderrahmane. Etude de la variation spatio-temporelle des paramètres de qualité des eaux de la nappe phréatique de la région d'Oued M'Zab. Elimination des phosphates par les graines d'olive activé. *Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle LMD*, Université de Ghardaïa, 2022.
- [5] Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), Atlas Hydraulique de l'Algérie et Direction des Ressources en Eau (DRE) de la Wilaya de Ghardaïa, Rapports 2023.
- [6] H. Zouidja, M. Hemaza. Etude de qualité des eaux de consommation de la région de Ghardaïa. *Mémoire de fin d'études, Master en Génie Chimique*, Université de Ghardaïa, 2022.
- [7] Y. Hebil, M. Sahraoui. Etude de la qualité physicochimique des eaux souterraines de la zone Ouest de Béjaïa. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, 2024.
- [8] N. Ben Hamiche. Contribution à l'étude de l'influence climatique, lithologique et anthropique sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'un aquifère du Nord-est algérien : Cas de la basse Soummam, Bejaïa. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Béjaïa, 2015.
- [9] A. Bouhadda. Etude de la vallée du M'Zab Recalibrage d'un tançons d'El Atteuf (W. de Ghardaïa). *Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle LMD*, Université de Ghardaïa, 2014.
- [10] M. Achour, M.I. Hassani, H. Benhedid, A.H. Brahim. Using GIS and geostatistical techniques for mapping piezometry and groundwater quality of the Albian Aquifer of the M'zab Region, Algerian Sahara. *International Journal of Geosciences*, 12 (3) (2021) 253-279.
- [11] M. Achour, M. (2014). Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : Cas de la vallée du M'Zab (Ghardaïa – Algérie). *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université d'Oran 2, 2014.
- [12] A. Hadj Brahim. Contribution à l'étude piézométrique de la nappe albiennne dans la région du M'zab. *Mémoire de fin d'études, Master en Sciences de la terre*, Université de Ouargla, 2016.
- [13] H. Benhedid. Etude de l'impact des eaux usées sur la variabilité de la pollution des aquifères superficiels à Oued M'Zab. *Mémoire de Magister*. Université de Ouargla, 2015.
- [14] Système Aquifère du Sahara Septentrional (2003) OSS. Système Aquifère du Sahara Septentrional. Hydrogéologie. S.R. Interne. Vol. 2, Système Aquifère du Sahara Septentrional, Tunis, 275.
- [15] J.O. Petersen, P. Deschamps, B. Hamelin, E. Fourré, J. Gonçalves, K. Zouari et al. Groundwater flowpaths and residence times inferred by 14C, 36Cl and 4He isotopes in the Continental Intercalaire aquifer (North-Western Africa). *Journal of Hydrology*, 560 (2018) 11-23.
- [16] ANRH. Note de synthèse sur les premières mesures piézométriques en utilisant les nouveaux piézomètres captant la nappe du CI dans la wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, DRS, Ouargla, Algérie, (2010).
- [17] B. Merzouk. Cours de traitement et dessalement des eaux. *Master 1 Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, 2024.
- [18] Journal Officiel de la République Algérienne N° 34, 18 Rabie Ethani 1432 - 23 mars 2011, Annexe, Pages 07-09).
- [19] Journal Officiel de la République Algérienne N° 41, 25 Chaâbane 1433 - 15 juillet 2012, Annexe, Pages 19-20).

- [20] H. Moulay Omar, R. Benhamadi. Contribution de la géomatique à l'établissement des cartes des indices de qualité des eaux de la nappe albienne dans la région de Ghardaïa. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ressources hydriques, Université de Ghardaïa, 2020.
- [21] S. Aouina, N. Neguaz. Etude de données physicochimiques des eaux souterraines de Hammam Dalaa – M'sila. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ressources hydrauliques, Université de M'sila, 2023.
- [22] O. Mohamed Abdessamed, A. Hemdane. Variation spatio-temporelle et statistique de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Hodna. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ressources hydrauliques, Université M'sila, 2022.
- [23] A.M. Piper. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6) (1944) 914-928.
- [24] A. Azri, S. Dhailis. Evaluation de la qualité physicochimique des eaux : Cas de Béjaïa-Est. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ressources hydrauliques, Université de M'sila, 2021.
- [25] F. Khan, T. Husain, A. Lumb. Water quality evaluation and trend analysis in selected watersheds of the Atlantic Region of Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, 88 (1–3) (2003) 221-242.
- [26] M. Saeedi, S.M. Hosseinie, F. Khozaymeh. Assessment of groundwater quality using water quality index. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2(1) (2010) 39-43.
- [27] S. Tyagi, B. Sharma, P. Singh, R. Dobhal. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3) (2013) 34-38.