

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : RESSOURCES HYDRAULIQUES

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

Par: **AZRI Ahlem**

et

DHAILIS Samah

Intitulé

**Evaluation de la qualité physicochimique des eaux
*Cas de Béjaia-Est***

Soutenu devant le jury composé de:

Dougha Mostefa

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Tiaiba Mohammed

Université de M'sila

Co-Rapporteur

Guemache Abderezak

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

REMERCIEMENTS

*Nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage afin de réaliser ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Monsieur le Professeur **Belkacem MERZOUK**, et notre Co-encadreur Monsieur le Docteur **Mohammed TIAIBA** d'avoir accepté de diriger ce travail et pour leurs précieux conseils, leur générosité et leurs encouragements durant le déroulement de ce travail.*

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

*Nos vifs remerciements vont également à tous les **enseignants** du département de l'hydraulique, et en particulier Monsieur **Mezali**, Monsieur **Ferhati** et Monsieur **Djerbouai**.*

*Nous tenons à remercier l'ensemble du **personnel** de l'Algérienne Des Eaux (**ADE**) et de la Direction des Ressources en Eau (**DRE**) de la Wilaya de **Béjaia**.*

*En fin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier Monsieur **Loukriz Abdelouadoud** pour son aide précieuse.*

Azri Ahlem & Dhailis Samah



Nous dédions ce mémoire à nos très chers parents, qui peuvent être fiers et trouvent ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour leurs aides à avancer dans la vie.

Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer leurs justes valeurs, la gratitude et l'amour qu'ils nous portent. Chaque ligne de ce mémoire, chaque mot et chaque lettre leurs expriment la reconnaissance, le respect et l'estime.

Dieu merci, qu'ils soient nos parents.

A` nos Sœurs et Frères

A` ceux qui ont toujours été à nos côtés

A` nos chères amies, avec qui nous avons partagées les moments les plus agréables.

Ahlem & Samah

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la qualité des eaux souterraines de la région de Béjaia-Est (*Bassin versant Djemaa-Zitouna*). Les résultats ont montré que :

- La qualité chimique des eaux de la région est globalement bonne, toutefois il existe quelques forages qui présentent des duretés allant de 51.9 à 66 °F.
- L'analyse des caractéristiques lithologiques des principales unités structurales de la région nous a permis d'identifier quatre formations géologiques favorables aux constitutions d'aquifères non négligeables pour la mobilisation des ressources en eaux souterraines supplémentaires.
- L'utilisation des diagrammes chimiques (*Piper* et *Schöeller-Berkaloff*) et l'application des méthodes statistiques, telles que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) à l'aide du logiciel statistique XLSTAT 2016 ont montré que le faciès chimique est dominé par le bicarbonaté calcique.

Mots clés : *Eaux souterraines, Hydrochimie, Bassin versant, Méthodes statistiques.*

Abstract

The objective of this work is to study the quality of groundwater in the eastern region of Béjaia (*Djemaa-Zitouna watershed*). The results showed that:

- The chemical quality of the region is generally good; however there are some wells which have hardnesses ranging from 51.9 to 66 °F.
- The analysis of the lithological characteristics of the main structural units of the region enabled us to identify four geological formations favorable to the constitution of significant aquifers for the mobilization of additional groundwater resources.
- The use of chemical diagrams (*Piper and Schöeller-Berkaloff*) and the application of statistical methods such as Principal Component Analysis (PCA), Hierarchical Ascending Classification (HAC) and Factor Analysis of Components (FAC) using the statistical software XLSTAT 2016 showed that the calcium bicarbonate facies is the most dominant.

Keywords: *Groundwater, Hydrochemistry, Watershed, Statistical methods.*

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة نوعية المياه الجوفية في منطقة بجاية الشرقية (الحوض الهيدروغرافي واد جمعة - زيتونة). أظهرت النتائج أن:

- الجودة الكيميائية لمياه المنطقة جيدة بشكل عام ، ولكن هناك بعض الآبار التي تتراوح قساوتها من 51.9 إلى 66 °F.
- تحليل الخصائص الصخرية للوحدات الهيكلية الرئيسية للمنطقة مكنتنا من تحديد أربعة تكوينات جيولوجية مواتية لتكوين طبقات المياه الجوفية الهامة لتعبئة موارد المياه الجوفية الإضافية.
- أظهر استخدام الرسوم البيانية الكيميائية (باير وشولر- بيركالوف) وتطبيق الأساليب الإحصائية (ACP ، CAH ، AFC) باستخدام البرنامج الإحصائي (XLSTAT 2016) أن بيكربونات الكالسيوم يهيمن على الوجود الكيميائي.

الكلمات المفتاحية: *المياه الجوفية ، الكيمياء المائية ، الحوض الهيدروغرافي ، الطرق الإحصائية .*

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

N° du tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Evaluation de la population de la Wilaya de Béjaia	04
Tableau I.2	Moyennes mensuelles des précipitations en (mm) dans la région de Bejaia (2008-2018)	05
Tableau I.3	Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes dans la région	06
Tableau I.4	Paramètres géométriques du sous bassin versant	10
Tableau I.5	Répartition des différentes tranches d'altitude	10
Tableau I.6	Classification de l'ORSTOM	13
Tableau I.7	Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié	15
Tableau II.1	Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau	22
Tableau III.1	Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude	27
Tableau III.2	Résultats des mesures des paramètres physiques	28
Tableau III.3	Résultats d'analyse des eaux	33
Tableau III.4	Potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude	40
Tableau III.5	Dureté des eaux	41
Tableau III.6	Classification de conductivité	42
Tableau III.7	Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude	43
Tableau III.8	Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude	44
Tableau III.9	Valeurs propres des axes et leurs contributions	46
Tableau III.10	Corrélation entre les variables et les axes	47
Tableau III.11	Nœuds successifs du dendrogramme	51
Tableau III.12	Barycentres des classes	53

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Figure I.1	Carte de situation de la zone d'étude	02
Figure I.2	Répartition mensuelles des précipitations	06
Figure I.3	Répartition mensuelles des Températures moyennes	07
Figure I.4	Périmètre et surface du bassin versant Djemaa-Zitouna	08
Figure I.5	Courbe hypsométrique du bassin versant	10
Figure I.6	Carte des tranches d'altitudes du bassin	11
Figure I.7	Réseau hydrographique de la zone d'étude	15
Figure II.1	Carte hydrogéologique de Oued Djemaa et Oued Zitouna	21
Figure II.2	Carte de positionnement des forages étudiés	23
Figure II.3	La carte piézométrique de la zone d'étude	24
Figure III.1	Corrélation entre les cations et les anions	28
Figure III.2	Carte isovaleurs du TH	29
Figure III.3	Carte isovaleurs du pH	30
Figure III.4	Carte isovaleurs de la conductivité	31
Figure III.5	Carte isovaleurs des températures	31
Figure III.6	Carte isovaleurs des bicarbonates (HCO_3^-)	32
Figure III.7	Carte isovaleurs du TAC	33
Figure III.8	Carte isoteneurs du Ca^{2+}	34
Figure III.9	Carte isoteneurs du Mg^{2+}	35
Figure III.10	Carte isoteneurs du Cl^-	36
Figure III.11	Diagramme de Schöeller-Berkaloff	37
Figure III.12	Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR	38
Figure III.13	Diagramme de Piper	39
Figure III.14	Valeurs propres des axes et leurs contributions	46
Figure III.15	Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1 et F2)	48
Figure III.16	Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)	48

Figure III.17	Diagramme des niveaux	51
Figure III.18	Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)	52
Figure III.19	Hiérarchie des partitions (intra-classes et inter-classes) obtenues par CAH	53
Figure III.20	Graphique symétrique	54

Sommaire

SOMMAIRE

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

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction	02
I.2. Aperçu géographique	02
I.2.1. La présentation économique de la willaya de Bejaia	03
I.2.2. Les plans d'eau	03
I.2.3. La population	04
I.2.4. Le climat	05
I.3. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant d'étude	07
I.3.1 .La surface	07
I.3.2. Le périmètre	07
I.3.3. La forme	08
I.3.4. Les dimensions du rectangle équivalent.....	09
I.3.5. Altimétrie et courbe hypsométrique.....	09
I.3.6. Hypsométrie du bassin.....	09
I.4. Les caractéristiques du réseau hydrographique.....	13
I.4.1.Densité de drainage.....	13
I.4.2. Temps de concentration	13
I.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau	14
I.4.4. Densité hydrographique	14
I.4.5. Coefficient de torrentialité	14
I.4.6. Réseau hydrographique	14
I.6. Conclusion partielle	16

Chapitre II : Aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région

II.1. Introduction	17
II.2. Aperçu géologique du champ captant de l'Oued Djemaa-Oued Zitouna	17
II.3. La litho-stratigraphie	18
II.4. Inventaire des points d'eau	22
II.4.1. Introduction	22
II.4.2. Caractéristiques des points d'eau étudié	22
II.4.3. Les cartes piézométriques	24
II.4. Conclusion partielle	25

Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

III.1. Introduction	26
III.2. Calcul de la balance ionique	26
III.3. Corrélation entre les cations et les anions	27
III.4. Interprétation des données	28
III.4.1. Mesures au laboratoire	28
III.5. Etude des paramètres physicochimiques	29
III.5.1. Paramètres ayant fait l'objet de limite de qualité	29
III.5.2. Etude des paramètres physiques	29
III.5.3. Etude des paramètres chimiques	33
III.5.4. Représentation graphique des faciès chimiques	36
III.6. Qualité chimique des eaux	39
III.6.1. Potabilité des eaux	39
III.6.2. Aptitude à l'irrigation	41
III.7. Etude statistique des données hydrochimiques	42
III.7.1. Statistique descriptive	42
III.7.2. Analyse en composantes principales (ACP)	45
III.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	49
III.7.4. Analyse factorielle des correspondances (AFC)	53
III.7.5. Comparaison de différentes méthodes statistiques	55
III.8. Conclusion partielle	55
Conclusion générale	57

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

La nature chimique et la concentration des eaux souterraines dépendent en partie des propriétés des eaux de surface et des eaux des précipitations, mais surtout des processus physicochimiques qui existent dans l'aquifère. Ces processus physicochimiques augmentent ou diminuent la concentration des substances dissoutes dans l'eau le long de son cheminement souterrain. Les proportions de ces variations chimiques de la concentration des substances dissoutes varient avec la nature pétrographique et physique de l'aquifère, avec la température et les propriétés chimiques de l'eau, ainsi qu'avec le temps de séjour de l'eau et les influences anthropogènes.

Les activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physicochimique des eaux. Face à la rareté et à la pollution des eaux, l'étude de la qualité et de l'évolution des ressources en eau constitue un enjeu majeur pour les populations.

Cette étude a pour objectif principal l'étude de données physicochimiques acquises en 2019 des eaux souterraines de la région "Est" de Béjaia, avec pour intention une meilleure compréhension de la qualité de ces eaux selon leurs faciès chimiques, et les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères.

Cette étude est structurée en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre portera sur la présentation de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre donnera un aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude hydrochimique des eaux souterraines par l'utilisation des diagrammes (Piper et Schöeller-Berkaloff) et l'application des méthodes statistiques en utilisant le logiciel XLSTAT, telles que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) pour une visualisation plus complète des résultats d'analyses.

En fin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus et quelques recommandations utiles pour les travaux futurs.

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu géographique, démographique, climatique, administratif et morphométrique de la zone d'étude.

I.2. Aperçu géographique

La zone d'étude est située au Nord-Est de la ville de Bejaia, au lieu-dit Djemaa-Zitouna. L'aire prospectée s'inscrit dans la plaine côtière de Bejaia, dans la plaine de Djemaa- Zitouna. Elle est interrompue par le cap Tichy et limitée à l'Est et à l'Ouest par des massifs de bordures, au Sud par des monts relativement élevés (environ 600 m) à pentes raides et au Nord par la mer méditerranéenne [1].

Elle est limité par :

- La mer Méditerranée au Nord.
- La Wilaya de Jijel à l'Est.
- Les Wilaya de Tizi Ouzou et Bouira à l'Ouest.
- Wilaya de Bordj Bou Arreridj et Sétif au Sud.

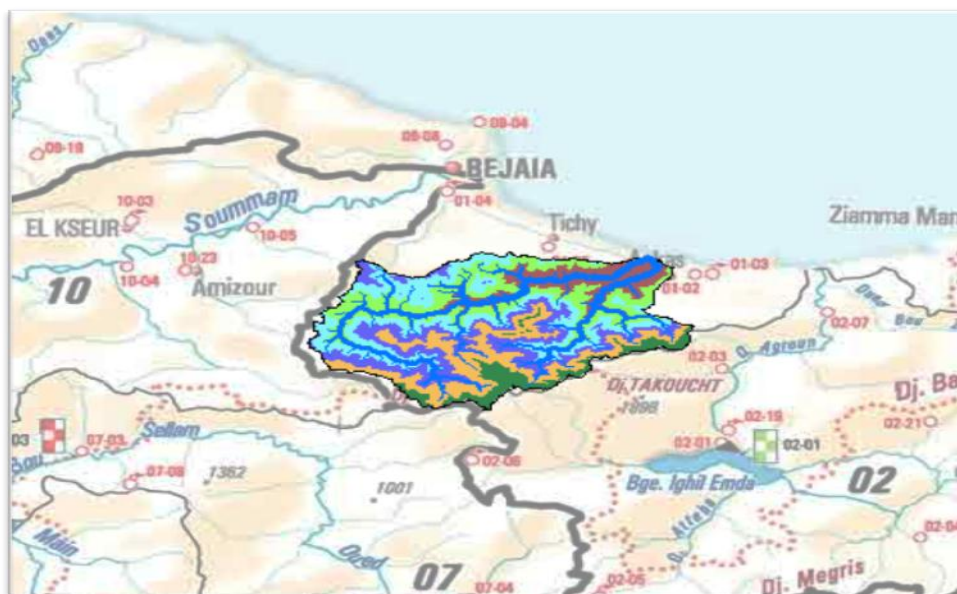


Figure I.1 : Carte de situation de la zone d'étude

1.2.1. La présentation économique de la willaya de Bejaia

Dans cette section, nous présentons les principales activités économiques de la willaya de Bejaia. Nous intéressons aux infrastructures des transports, la pêche et l'aquaculture, l'agriculture, la qualité du milieu et pollution des eaux. La willaya de Bejaia connaît un dynamisme économique, malgré son territoire contraignant et l'insuffisance des ressources. La situation géographique de Bejaia est stratégique par rapport à l'espace régional, national et international [1].

1.2.1.1. Le transport de réseau

La willaya de Bejaia possède un réseau de transport intermodal, routier, ferroviaire et maritime.

1.2.1.2. L'agriculture

Loin d'avoir une vocation agricole, la willaya de Bejaia n'arrive pas réaliser l'autosuffisance en produits agricoles, la willaya dispose d'une surface agricole utile de 130348 hectares, dont 5.06 sont irrigués. Les potentialités agricoles de la willaya peuvent être élargies grâce à un programme d'investissement et de mise en valeur des terres fertiles de la vallée de la Soummam et des plaines côtières. Bejaia comme toute la Kabylie est connue pour les cultures traditionnelles de montagne à savoir l'olivier et le figuier.

1.2.1.3. L'industrie

L'ouverture de l'Algérie sur l'économie de marché et la mise en place d'un dispositif législatif et institutionnel qui favorise l'investissement privé local, national et international, permet au secteur industriel dans la willaya de Bejaia de se prospère, en particulier l'agro-alimentaire. Bien que la willaya n'ait pas une vocation agricole, elle est représentée comme un pôle industriel agro-alimentaire de premier rang à l'échelle nationale. Nous notons que les entreprises de la willaya sont très compétitives et performante, et la production de Bejaia est écoulee sur tout le territoire national, même certains produits ont réussi d'imposée sur les marchés maghrébins, arabes et européens. La willaya de Bejaia abrite une intense activité industrielle, réparties sur 03 zones industrielles (Bejaia, El Kseur et Akbou) et 20 zones d'activité réparties sur 20 communes.

1.2.2. Les plans d'eau

1.2.2.1. Les lacs

La willaya compte une dizaine de lacs, dont certains sont exploités pour subvenir aux besoins en eau, pour les ménages, l'agriculture et l'industrie. Parmi eux on cite :

- Le lac d'Ighil-Emda (Kherrata) : d'une capacité de 110 millions de m³ est destiné à la production de l'énergie électrique.

- Le lac de Tichihaf : d'une capacité de 150 million de m³ est à l'irrigation, aux ménages et l'industrie.
- Le lac de Bejaia : situé au niveau du parc d'attraction de la ville de Bejaia.
- Lac Noir (Aguelmim Aberkan).
- Lac Aguelmim Idhoughran à M'cisna.

1.2.2.2. Les Oueds

Les plus importants Oueds sont :

- Oued Soummam d'une longueur de 90 km
- Oued Agrioune d'une longueur de 80 km
- Oued Djemaa d'une longueur de 46 km
- Oued Boussellam d'une longueur de 45 km
- Oued Zitoune d'une longueur de 30 km
- Oued Amassine d'une longueur de 20 km.

L'écoulement de ces Oueds est saisonnier pour certain, pendant l'hiver et le printemps et pour d'autre l'écoulement est annuel, donne la possibilité pour la pêche de caractère plaisancier. A la périphérie de ces agglomérations s'est développée des zones industrielles activant essentiellement dans l'agroalimentaire, le textile et l'extraction des granulats alluvionnaires (sable et graviers). Le couloir de la vallée est traversé par un réseau routier dense et une ligne ferroviaire Béjaia-Alger [1].

1.2.3. La population

Le recensement général de la population et de l'habitat effectuée en 2008 par le gouvernement fait ressortir une population totale de la wilaya de Bejaia estimée à 912577 habitants. En 2018, selon la Direction de la Santé et de la Population de la Wilaya de Béjaia (DSPB), la population totale de la wilaya est évaluée à 978050 habitants.

Tableau I.1 : Evaluation de la population de la Wilaya de Béjaia

Année	Population
1998	856844
2008	912577
2018	978 050

1.2.4. Le climat

Le climat est l'un des éléments les plus dynamiques et le plus complexes du cadre physique. Ses modifications, parfois brutales comparativement aux autres éléments du milieu provoquent des déséquilibres importants, influençant de ce fait tous les aspects du développement socio-économique d'un pays. L'Algérie se trouve dans la zone tropicale aride et semi- aride. Ses ressources naturelles (sol, eau, végétation) subissent les conséquences néfastes des sécheresses répétées, de la désertification et de la pression démographique. Le pays a connu ces dernières années un déficit pluviométrique qui se sont traduites par des périodes de sécheresses chroniques avec comme conséquence la réduction de la production agricole. Appartenant au domaine méditerranéen, le climat de la wilaya de Bejaia varie d'une zone à une autre. La ville de Bejaia fait partie du bassin versant de l'oued Soummam, il est généralement humide avec un changement de température saisonnier. Les températures moyennes sont globalement à 11.1 °C en hiver et à 24.5 °C en été [1].

1.2.4.1. Les précipitations

En Algérie le climat est semi-aride à aride, les pluies sont globalement insuffisantes, irrégulières et inégalement réparties dans le temps et dans l'espace. La wilaya de Bejaia est dans la bande côtière (littoral + sahel) bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par l'existence de deux saisons.

La répartition des précipitations moyennes mensuelles de la région de Bejaia durant la période entre 2008 –2017 est la suivante (Tableau I.2, Figure I.2).

Tableau I.2 : Moyennes mensuelles des précipitations en (mm) dans la région de Bejaia (2008-2018)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Précipitation (mm)	58	66.5	110	89	113.2	116	93.8	55.6	46.56	17.7	3.02	18.71	788.09

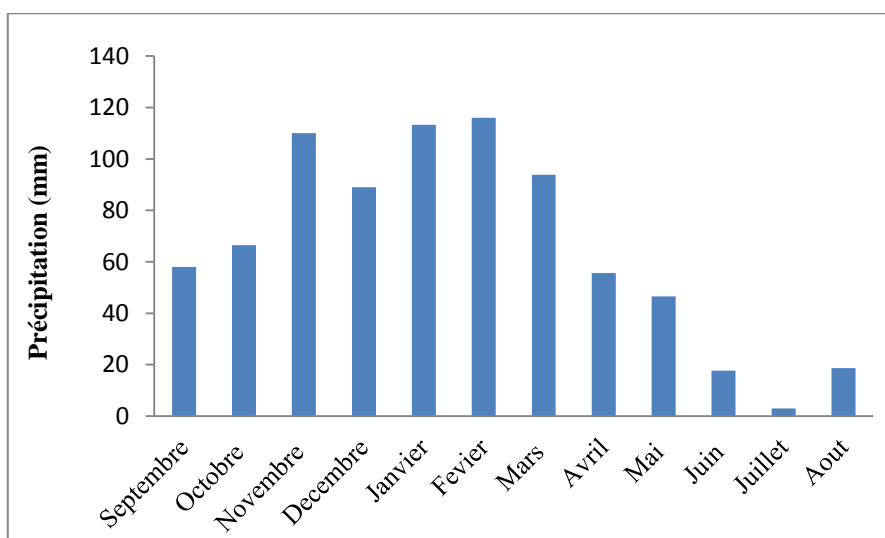


Figure I.2 : Répartition mensuelles des précipitations au niveau de la région de la zone d'étude

1.2.4.2. Température

La température est un facteur écologique limitant de première importance car elle intervient, d'une part, dans l'étude hydro-climatique d'une région et d'autre part, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne, de ce fait, la répartition des espèces animales et végétales (Ramade, 1984). Les températures mensuelles minimales, maximales et moyennes relevées sur dix ans (10ans) de 2008-2017 (Tableau I.1).

Tableau I.3 : Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes dans la région

T° \ Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
T°_{max}	28.6	26.3	21.7	18.3	17.2	17.2	19.1	21.3	23.6	27	30.2	30.9
T°_{m_{in}}	19.5	16.5	12.1	8.4	7.6	7.6	9.1	11.2	14.2	17.9	21.2	21.6
T°_{Moy}	24.05	21.4	16.9	13.35	11.5	11.5	14.1	16.25	18.9	22.45	25.7	26.25

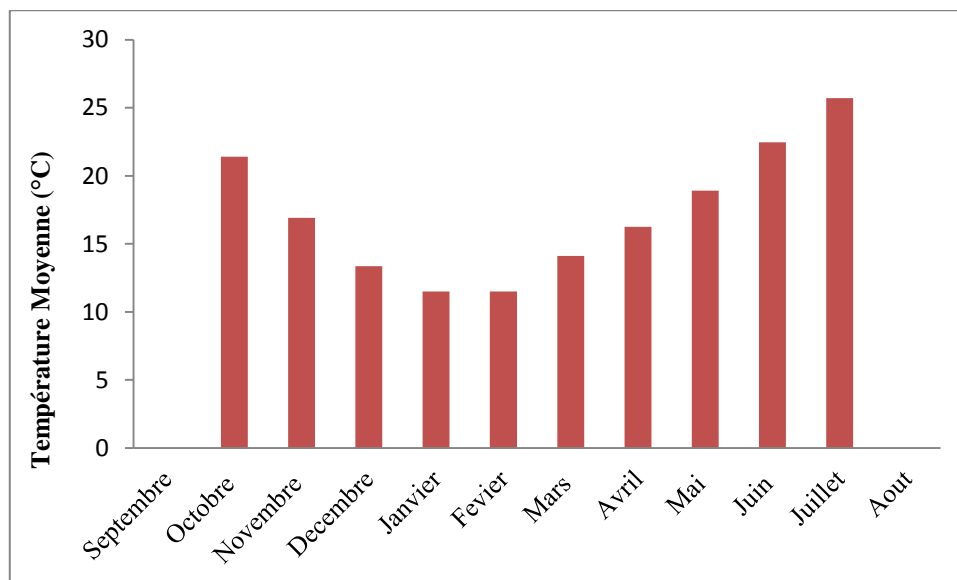


Figure I.3 : Répartition mensuelles des Températures moyennes au niveau de la région de la zone d'étude

Nous constatons que le mois d'Août est le mois le plus chaud avec une température maximale de l'ordre de 30.9 °C et que le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une température minimale de l'ordre de 7.6 °C (Tableau I.3).

I.3. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant d'étude

Notre zone d'étude est une partie du sous bassin (01) du grand bassin versant "Côtiers Constantinois" (03) qui est situé dans la partie Est de l'Algérie (Fig. I.1).

I.3.1. La surface

Le bassin versant (BV) est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits 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. Sa surface (A) exprimée en km², peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou par les techniques de digitalisation (Global Mapper – Map Info, Arc Gis...). La surface du bassin versant étudié a été mesurée grâce au logiciel ArcGis. Elle est de l'ordre 259.14 km².

I.3.2. Le périmètre

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 84.11 km.

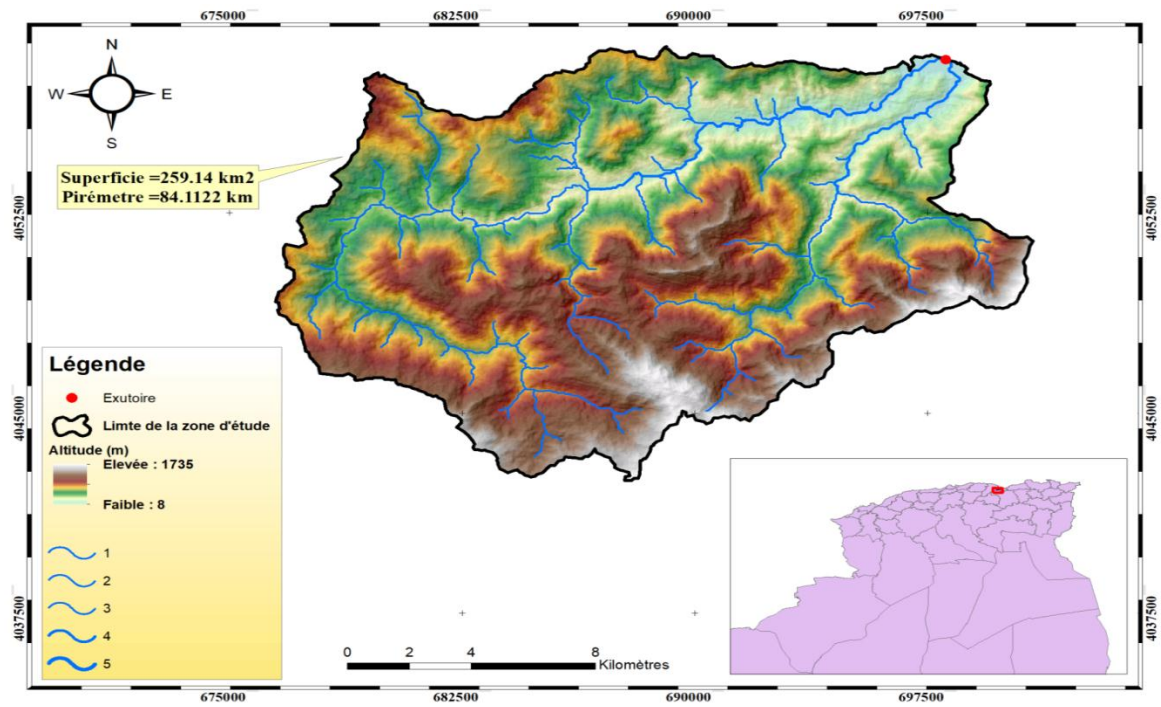


Figure I.4 : Périmètre et surface du bassin versant Djemaa-Zitouna

I.3.3. 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 donnée par la relation suivante (Roche, 1963) [1,2]:

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

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre du bassin versant en km

A : Superficie du bassin en km²

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

Pour notre cas, $K_G = 1.45 \Rightarrow$ le bassin versant est de forme allongée.

Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé [1,2].

$$\left(\begin{array}{ll} K_G = 1.12 & \text{forme d'un carré} \\ K_G > 1.12 & \text{forme d'un rectangle} \\ K_G = 1 & \text{forme d'un cercle} \end{array} \right)$$

1.3.4. Les dimensions du rectangle équivalent

C'est le rectangle de longueur L et de largeur l qui a la même surface et le même périmètre que le bassin versant. Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité), et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles au petit côté du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. En 1963, *Roche* a établi deux relations relatives aux dimensions du rectangle équivalent, dont les dimensions sont données par les relations suivantes.

$$L_r = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

$$l_r = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right]$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km.

K_G : Indice de compacité.

A : Superficie du bassin versant en km².

Pour notre cas, nous obtenons :

$$L_r = 34.96 \text{ km} \quad l_r = 7.41 \text{ km}$$

1.3.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

1.3.5.1. Hypsométrie du bassin

La topographie du bassin joue un rôle très important en hydrologie, elle conditionne le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation.

Les résultats d'une telle application sont donnés dans les tableaux suivants. Les fréquences altimétriques sont représentées dans le [Tableau \(I.4\)](#) et par la courbe hypsométrique ([Fig. I.5](#)).

Tableau I.4: Paramètres géométriques du sous bassin versant

Paramètre	Unité	Valeur
A	km ²	259.1
P	km	84.11
K_c	/	1,45
L_r	km	34.96
l_r	km	7.41

Tableau I.5 : Répartition des différentes tranches d'altitude

Tranche d'altitude	Surface (km ²)	Surface (%)	Surface cumulée (%)	(%) au- dessus de la limite inférieure	Altitude (m)
8 - 269	35.13648	13.55786282	13.55786282	100	8
270 - 490	54.24319	20.93043267	34.48829549	86.44213718	270
491 - 704	58.22923	22.46849748	56.95679297	65.51170451	491
705 - 927	49.56334	19.12465234	76.08144531	43.04320703	705
928- 1189	43.01812	16.599095	92.68054031	23.91855469	928
1190- 1735	18.96907	7.319459685	100	7.319459685	1190
Total	259.15943	100			1735

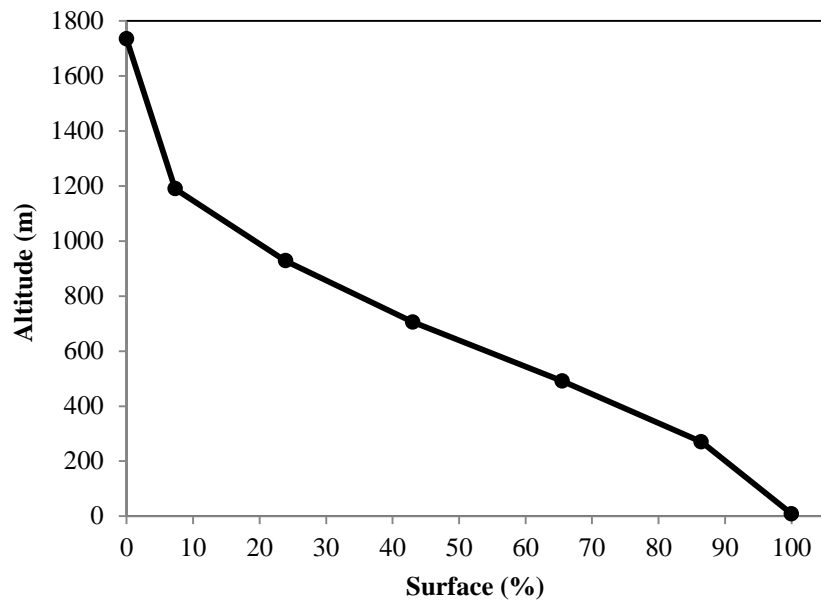


Figure I.5 : Courbe hypsométrique du bassin versant

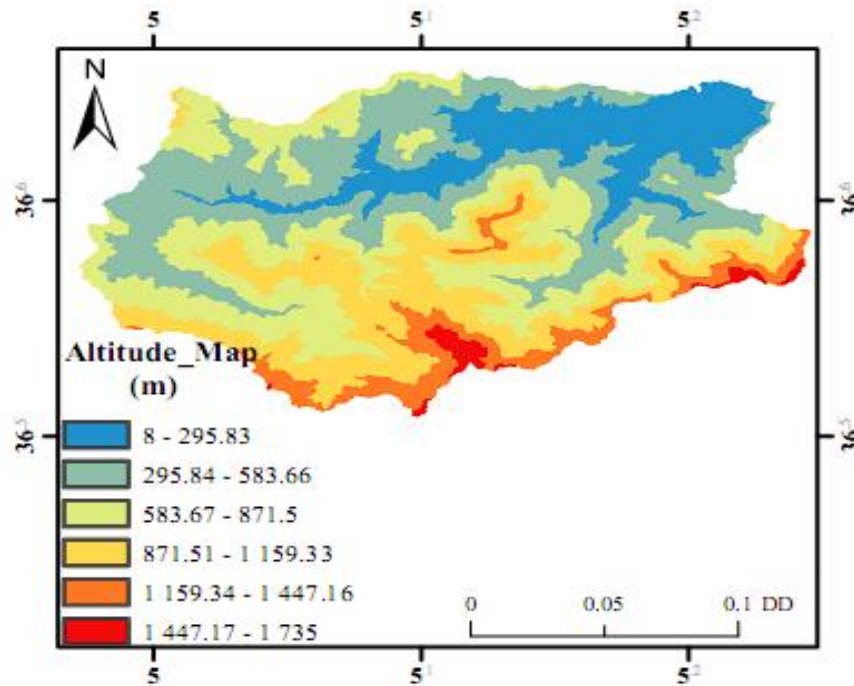


Figure I.6 : Carte des tranches d'altitudes du bassin

I.3.5.2. Caractéristiques des altitudes

1) Altitude moyenne (H_{moy})

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques. Elle se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

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

H_i : Altitude moyenne de chaque classe en mètre

A_i : Surface partielle des tranches d'altitude en Km^2

A_t : Surface totale sous bassin en km^2

Pour notre cas, $H_{moy} = 671.83$ m.

2) Altitude médiane (H_{50})

Elle Correspond au point d'abscisse 50 % sur la courbe hypsométrique, $H_{50} = 650$ m.

3) Altitudes extrêmes

Les principales altitudes extrêmes sont les suivantes :

- L'altitude minimale est : $H_{min} = 8$ m
- L'altitude maximale est : $H_{max} = 1735$ m
- La hauteur à 5 % de la surface totale est : $H_{5\%} = 1360$ m

- La hauteur à 95 % de la surface totale est : $H_{95\%} = 100 \text{ m}$.

4) Dénivelée simple (D)

Sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayant 5 % et 95 % de la surface totale du sous bassin versant.

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1260 \text{ m.}$$

1.3.5.3. Indices 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 :

a) 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 en m

L_r : Longueur du rectangle équivalent (km)

$$\Rightarrow I_g = 36,83 \text{ m/km} = 0.03683$$

$I_g < 0.002$	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

D'après la classification du relief par L'ORSTOM (*Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer*), I_g étant compris entre 20 et 50 m/km, le sous bassin versant présente un relief assez fort [3,4].

b) Dénivelée spécifique (D_s)

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification d'ORSTOM (Tableau I.6). 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).

$$D_s = I_g * [A]^{1/2} \Rightarrow D_s = 593 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du BV se trouve dans la classe R7, caractérisée par un relief très fort.

Tableau.I.6 : Classification de l'ORSTOM [1,4]

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

I.4. Les caractéristiques du réseau hydrographique

I.4.1. Densité de drainage

La densité de drainage peut donner un aperçu sur la lithologie du bassin versant et permet de comparer l'écoulement superficiel au niveau de plusieurs bassins. Elle est donnée par la relation suivante :

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

Où :

L_i : Longueur des talwegs en km.

$$\Rightarrow D_d = 0.717 \text{ (km/km}^2\text{)}$$

I.4.2. 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 ci-après.

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

L_p = Longueur du talweg principal (km)

$$\Rightarrow T_c = 5.98 \text{ h}$$

I.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (v_e)

Elle est donnée par l'expression suivante.

$$v_e = L_p / T_c$$

Avec :

L_p : Longueur du talweg principal = 33.5 km

T_c : Temps de concentration.

$$\Rightarrow v_e = 6.56 \text{ km/h} = 1.82 \text{ m/s}$$

I.4.4. Densité hydrographique (F)

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

Elle est donnée par la relation :

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

N_i : nombre de cours d'eau.

$$\Rightarrow F = 321/259.14 = 1.23 \text{ km}^{-2}$$

I.4.5. Coefficient de torrentialité (C_T)

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage.

$$C_T = \frac{N_1}{A} * D_d$$

N_1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1 ($N_1 = 164$) $\Rightarrow C_T = 0.43 \text{ 1/km}^3$

I.4.6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin étudié est marqué par deux Oueds principaux, Oued Zitouna et Oued Djemaa (Fig. I.7)

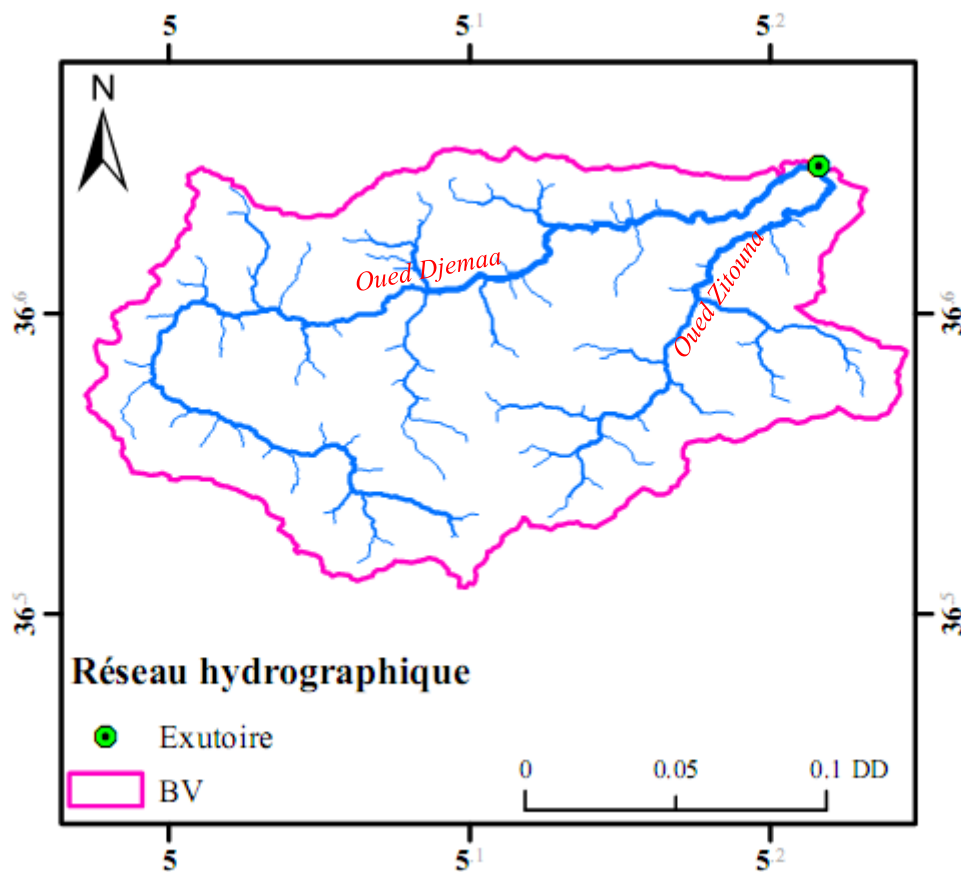


Figure I.7 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales du bassin versant Oued Djemaa-Oued Zitouna.

Tableau I.7: Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Aire	A	Km ²	259.14
Périmètre	P	km	84.11
Indice de compacité	K _G	/	1.45
Altitude maximale	H _{max}	m	1735
Altitude minimale	H _{min}	m	8
Altitude moyenne	H _{moy}	m	671.83
Indice de pente globale	I _g	%	0.03683

Largeur du rectangle équivalent	L_r	km	7.41
Longueur du rectangle équivalent	L_r	km	34.96
Dénivelée	D	m	1260
Dénivelée spécifique	D_s	m	593
Altitude à 5%	$H_{5\%}$	m	1360
Altitude à 95%	$H_{95\%}$	m	100
Densité de drainage totale	D_d	km/km ²	0.717
Temps de concentration	T_c	heures	5.98
Classification de Horton	Ordre	/	5
Densité hydrographique	F	1/km ²	1.23
Coefficient de torrentialité	C_T	km/km ⁴	0.43
Vitesse d'écoulement de l'eau	(v_e)	m/s	1.82

I.5. Conclusion partielle

Dans ce chapitre nous avons essayé de représenter le bassin versant d'Oued Djemaa-Oued Zitouna, connaître la topographie, les conditions climatiques et l'état actuel du réseau hydrographique de la région.

Ce bassin possède une superficie d'environ 259 km², un périmètre de 84 km, une altitude moyenne de 671.83 m, un relief très fort et une forme allongée.

Le bassin versant est caractérisé par un climat humide.

La connaissance de la région d'étude est très importante avant toute étude approfondie d'un bassin versant (Hydrologie, érosion, transport solide, inondations, qualité des eaux ...). Dans cette étude nous allons nous intéresser à la qualité des eaux souterraines.

Chapitre II

*Aperçu sur la géologie et
l'hydrogéologie de la région*

Chapitre II: Aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région

II.1. Introduction

L'étude géologique et hydrogéologique nous permet d'identifier les formations perméables détritiques et les formations résistantes fissurées ou karstiques susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméables qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces formations, leurs épaisseurs, et leurs étendues.

L'étude tectonique nous renseigne sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles entraînant la formation de fossés d'effondrement ou de soulèvement modifient ainsi la géométrie des couches qui va caractériser chaque type de nappe et permettent la communication probable entre les aquifères.

La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser la fonction du réservoir et son comportement hydrodynamique [1,2,4,14].

II.2. Aperçu géologique du champ captant de l'Oued Djemaa-Oued Zitouna

La géologie constitue la base fondamentale de toute étude notamment en hydrogéologie. Elle détermine les formations susceptibles ou non de constituer des aquifères à partir de leur lithologie; ainsi que la détermination des relations pouvant exister entre eux.

Les terrains que contient la plaine alluviale de la zone d'étude et ceux des zones environnantes correspondent aux formations géologiques d'âge allant du Trias inférieur jusqu'au Quaternaire récent. On peut subdiviser le champ captant en trois zones distinctes qui sont [1] :

a) La zone de la plaine et de la vallée

Elle est constituée essentiellement des formations d'âge Quaternaire récent qui sont représentées par des éboulis de plaines alluvionnaires actuelles. Ces dernières sont aussi la base des formations qui occupent le lit et les deux rives.

b) La zone intermédiaire

Elle est composée essentiellement des formations sub-autochtones, qui s'inscrivent dans l'unité de Barbacha, et qui sont des marnes brunes et des bancs de calcaires associés à des lentilles de conglomérats.

c) La zone des montagnes

Cette zone est composée des formations de dolomies litées parfois marneuses et des calcaires massifs contenant des silex à leurs sommets, qui constituent la majeure partie de la rive droite.

On note, sur la rive gauche, la présence des roches intrusives de type microgranite d'âge Tertiaire accompagnées de roches métamorphiques du tertiaire composées essentiellement de schistes. Cette rive est également constituée de grès et d'argile numidien, qui sont des formations allochtones à faciès flysch [1,15].

II.3. La litho-stratigraphie

a) Le Trias

Il est représenté par un faciès tellien de formations gypso-salines et d'argiles versicolores. Il constitue généralement des pointements soulignant des contacts de charriage des unités épitelliennes supérieures et inférieures, ainsi que les klippes des unités resédimentées dans des formations plus récentes.

b) Le Jurassique

La carte géologique d'Amizour montre que le Jurassique des unités épitelliennes supérieures présente quatre termes principaux :

- **Lias inférieur** (Rhétien-Hettangien) : Il est formé à la base par des dolomies plus ou moins stratifiées, souvent recristallisées de teintes rouge violacée parfois marneuses, dans l'unité de Barbacha elles sont surmontées par des calcaires massifs parfois dolomitiques.
- **Lias moyen** (Sinémurien-Carixien): Il est formé de calcaires massifs contenant des silex à leur sommet.
- **Lias supérieur** (Domérien-bathonien): Il est formé essentiellement par des calcaires à silex s'alternant avec des argiles ou des marnes.
- **Jurassique moyen-supérieur** (Callovien-Tithonique): Il est composé de pseudo-conglomérats calcaires lie de vin pélites, radiolarite et calcaires fins siliceux.

c) Le Crétacé

Le crétacé de l'Oued Djemaa est caractérisé par une grande diversification de faciès, on peut distinguer deux types de faciès :

- **Le crétacé tellien** : Le crétacé inférieur comprend deux séries lithologiques. La première commence par des conglomérats de base à éléments du Jurassique sur lesquels repose une alternance de marnes et de calcaires ; la série est du Néocomien. La deuxième est

constituée d'un conglomérat contenu dans des pélites noires de Barrémo-Albien en position dans le sénonien inférieur du Djebel AFFROUN.

- **Le Crétacé des Flyschs :** Le crétacé à faciès flysch affleure largement sur la rive droite de l'Oued Djemaa. Il comprend :
 - Une série de pélites noires associées à des bancs épais de conglomérats d'âge Aptien.
 - Une série de pélites noires à rares lits de grés fins d'âge Néocomiens-Albien inférieur.
 - Une formation d'âge Albien supérieur formée de flyschs schisto-gréseux de Tizi Gualalen.
- **Albien supérieur-Cénomaniens:** Il repose par l'intermédiaire d'un contact anormal sur les formations du crétacé des flyschs de l'unité Barbacha. Il comprend une série de marnes brunes et calcaires dont les calcaires de l'Albien supérieur sont gréseux dans la région d'Asloum et le cénomaniens est conglomératique.
- **Le Crétacé resédimenté :** Il correspond au Keuper resédimenté dans les dépôts cénomaniens, et parfois dans les formations du sénonien inférieur.
- **Le Cénomaniens-Turonien:** Le Cénomaniens est constitué d'une série de marnes brunes et calcaires dont ces derniers sont dolomités dans les régions de Barbacha et de Djellel.
- **Le Crétacé supérieur :** Il est composé de trois ensembles lithostratigraphiques qui sont :
 - Une série de marnes blanches et conglomérats d'âge Cénomaniens-Coniacien qui affleure dans la région d'Azrou Kembita.
 - Une série de marnes brunes et bancs de calcaires associés à des lentilles de conglomérats d'âge Coniacien-Maestrichtien qui affleurent dans les régions de Djebel Affroun et de Taddert Amokrane.
 - Une série d'âge Campanien-Maestrichtien de marnes brunes à boules de calcaires jaunes et lits en discordance avec les calcaires.

d) Le Numidien

C'est le plus répandu des trois flyschs, il est représenté par des grés et argiles numidien, qui sont des formations allochtones qui se trouvent sur la rive gauche de l'Oued Djemaa dans la région d'Adrar hamou. Ce flysch est formé de trois termes d'âge Oligocène supérieur à Aquitano-Burdigalien.

e) Le Miocène

Le miocène de la région comprend deux ensembles lithologiques distincts d'âge postérieur à la mise en place des nappes, ce sont :

- **Les formations sédimentaires** : Celles-ci comprennent une série continentale d'âge Burdigalien-Helvétien : elle est formée essentiellement de conglomérats hétérogéniques transgressifs et discordants sur des formations numidiennes et des formations du Sénonien supérieur à faciès argilo-marneux.
- **Les formations magmatiques** : on peut distinguer :
 - **Les roches plutoniques** : représentées par des microgranites, qui se trouvent sur la rive gauche, à texture microgrenue d'âge Tertiaire accompagnées de roches métamorphiques du tertiaire composées de schistes.
 - **Les roches volcaniques** : représentées par des laves et des pyroclastites non distinguées. Soulignons que ces formations magmatiques sont altérées et affectées par trois familles de fractures (N030, N090 et N140). Elles affleurent dans le massif d'Amizour et au Sud de Béjaia.

f) Le Quaternaire

Les formations quaternaires sont représentées par :

- Des alluvions de Oued Djemaa et Oued Zitouna et les cônes de déjection de ces affluents.
- Des formations récentes qui sont constituées d'éboulis de pente et alluvions actuelles.

Conclusion

La région d'étude fait partie du Tell septentrional structuré lors de l'orogène Alpin, elle constitue une zone de transition entre le domaine interne et le domaine externe.

- Les terrains méso-cénozoïques sont représentés par des terrains autochtones et allochtones de nature lithologique variée.
- Les éruptions volcaniques miocènes soulignent parfaitement la phase de la fracturation qui succède à la mise en place des grandes nappes de glissement. Le quaternaire constitue l'essentiel du remplissage alluvial, en plus il constitue le recouvrement majeur du lit des Oueds.
- L'analyse des caractéristiques lithologiques des principales unités structurales de la région nous a permis d'identifier quatre formations géologiques favorables aux constitutions d'aquifères non négligeables pour la mobilisation des ressources en eaux souterraines supplémentaires.

La figure (II.1) représente la carte géologique du bassin versant étudié.

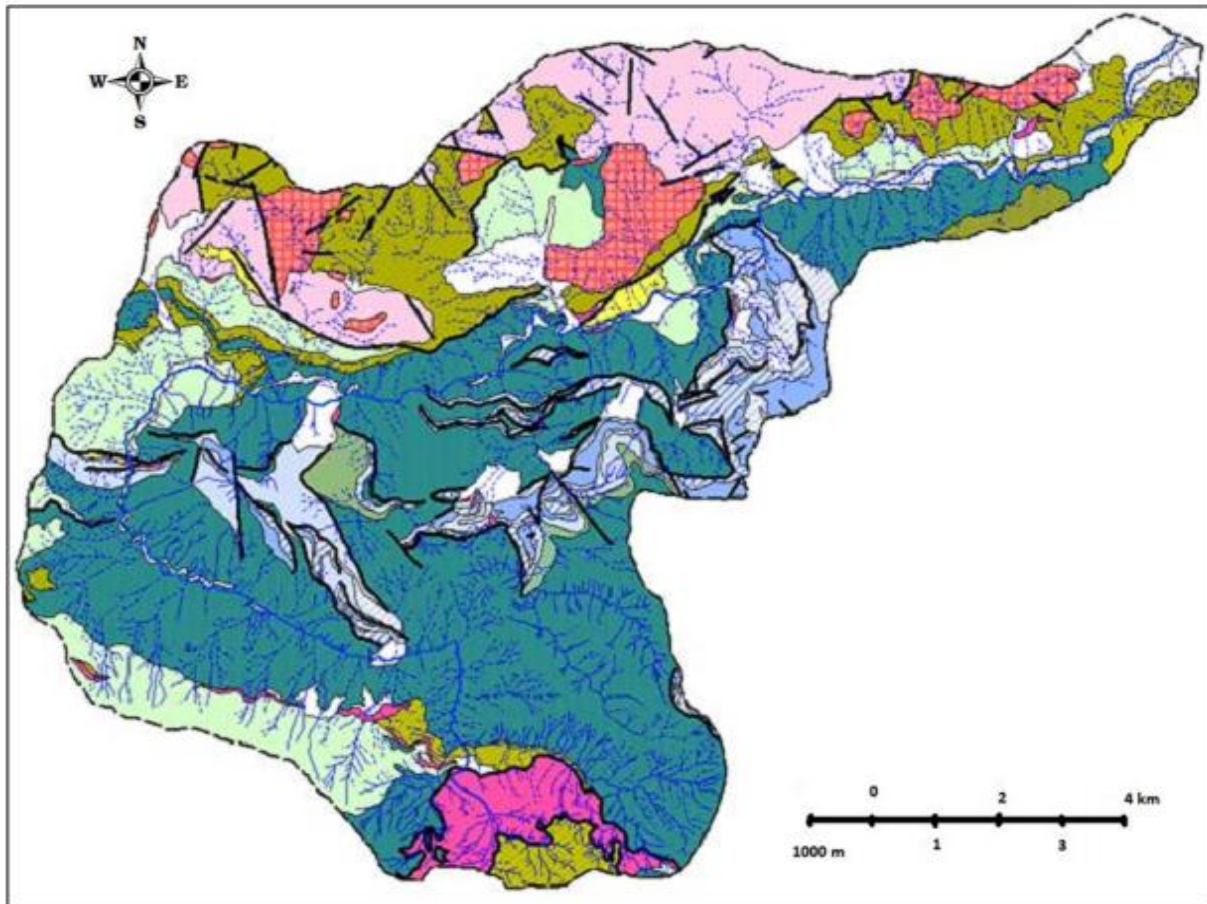


Figure II.1 : Carte hydrogéologique de Oued Djemaa et Oued Zitouna [1]

II.4. Inventaire des points d'eau

II.4.1. Introduction

La nature chimique et la concentration des eaux souterraines dépendent en partie des propriétés des eaux de recharge (Eaux de surface et eaux des précipitations), mais surtout des processus physicochimiques qui existent dans l'aquifère. Ces processus physicochimiques augmentent ou diminuent la concentration des substances dissoutes dans l'eau le long de son cheminement souterrain. Les proportions de ces variations chimiques de la concentration des substances dissoutes varient avec la nature pétrographique et physique de l'aquifère, avec la température et les propriétés chimiques de l'eau, ainsi qu'avec le temps de séjour de l'eau et les influences anthropogènes.

Les variations saisonnières des conditions chimiques et hydrauliques des recharges d'eau provoquent des fluctuations saisonnières du chimisme dans les eaux souterraines. De plus, des impacts humains sur la qualité des eaux souterraines peuvent influencer ou accélérer les processus naturels [1,4,16].

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 activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physico-chimique des eaux. On observe principalement deux types d'influence: (Agriculture, Rejets des eaux usées).

II.4.2. Caractéristiques des points d'eau étudiés

Les données utilisées pour notre étude sont les résultats des analyses effectuées sur l'eau de 17 forages par les services de l'Algérienne Des Eaux (ADE) et de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de la Wilaya de Béjaïa durant la campagne Avril 2019.

Leurs caractéristiques principales sont les suivantes (Tableau II.1 et Fig. II.2).

Tableau II.1: Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau

Nom	Longitude	Latitude	Z	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Turb	TAC	TH
	Degré déc.	Degré déc.	(m)	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	NTU	°F	°F
F1	5,1999	36,6401	5	4,16	2,82	1,38	4,72	0.66	23.6	34.8
F2	5,1885	36,6325	15	6,27	4,77	1,80	6,00	1.09	30	55.2

F3	5,2019	36,6437	6	6,80	4,84	4,20	5,00	0.226	25	58
F4	5,1994	36,6405	8	4,15	2,83	1,39	4,79	0.65	24	35
F5	5,19705	36,6373	10	4,16	2,83	1,41	4,39	0.66	22	34
F6	5,1865	36,632	20	4,15	2,83	1,38	4,79	0.655	24	35
F7	5,162	36,6336	35	5,00	8,27	2,40	5,03	0.902	25.2	66
F8	5,1627	36,6342	38	3,80	3,23	1,08	4,32	0.478	21.6	35
F9	5,22265	36,6426	7	4,16	2,83	1,39	4,61	0.65	23	35
F10	5,2216	36,6414	9	4,16	2,83	1,38	4,72	0.66	23.6	35
F11	5,2208	36,643	7	4,15	2,83	1,38	4,79	0.72	24	34.8
F12	5,2149	36,6356	21	4,16	2,82	1,41	4,72	0.7	23.6	35
F13	4,995	36,589	716	6,23	2,98	95,11	243,00	1	19.91	46.06
F14	5,0267	36,54	1074	9,27	2,97	33,40	500,00	4	40.98	61.15
F15	5,0478	36,5275	1204	6,52	4,21	60,76	260,54	15	21.35	53.61
F16	5,087	36,5496	1260	5,25	2,08	47,82	208,00	0.1	17	36.66
F17	5,097	36,547	1240	6,63	3,75	32,30	162,70	0.1	13.33	51.9

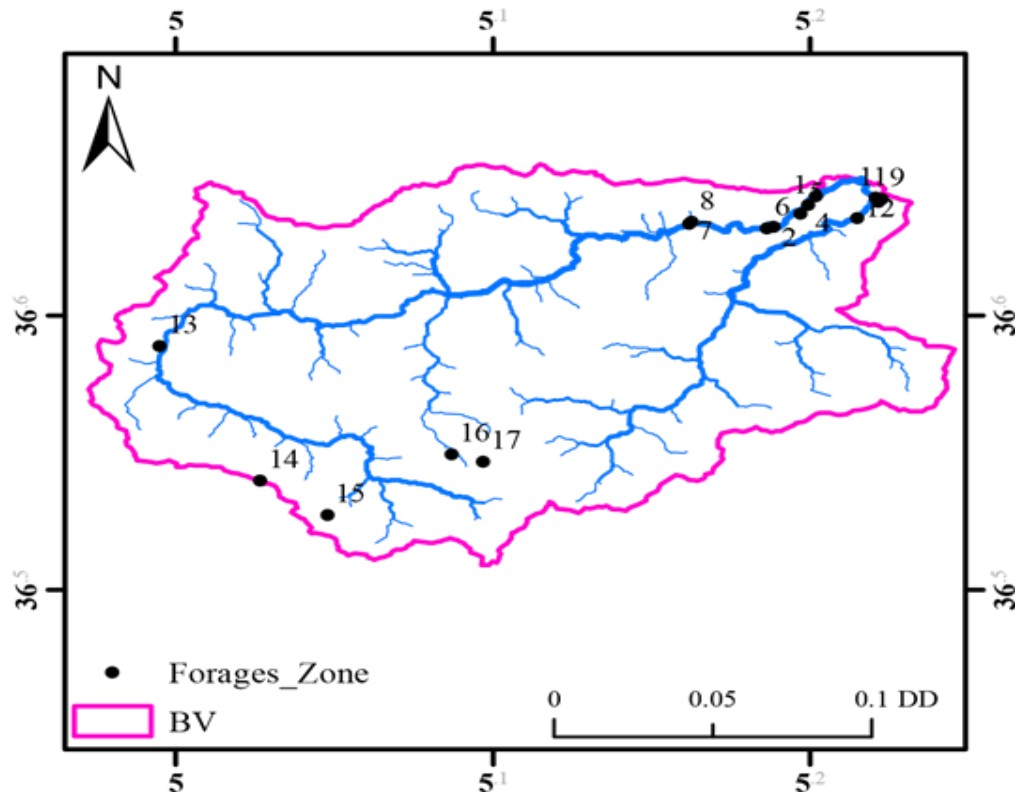


Figure II.2. Carte de positionnement des forages étudiés

II.4.3. Les cartes piézométriques

Les cartes piézométriques constituent la synthèse de l'étude hydrogéologique. Elles schématisent la fonction du réservoir souterrain et le comportement hydrodynamique de l'aquifère, avec la configuration des conditions aux limites.

II.4.3.1. Etude piézométrique

Afin d'étudier le comportement de la nappe superficielle du Quaternaire de bassin versant Djemaa-Zitouna, nous avons établi la carte piézométrique de 2019 en se basant sur le traitement des données par le logiciel ArcGis (Fig.II.3).

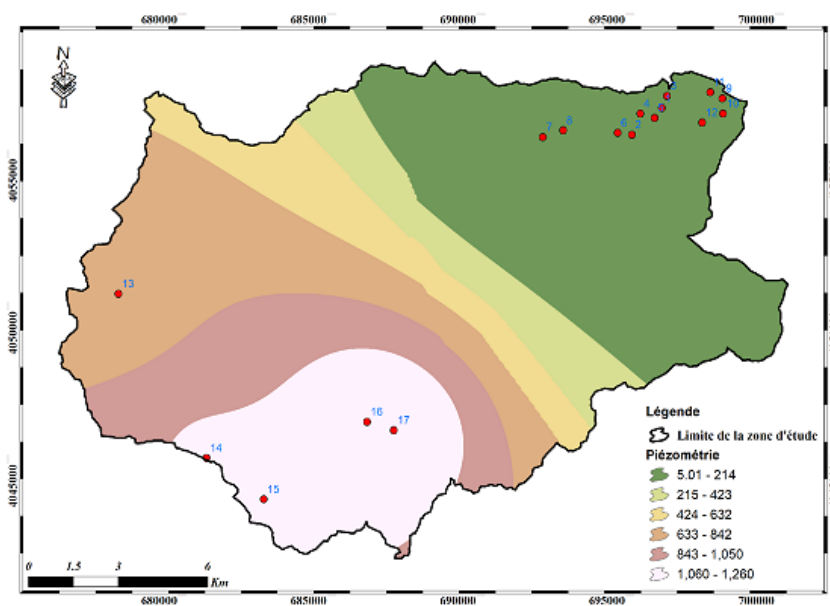


Figure II.3: La carte piézométrique de la zone d'étude

II.4.3.2. Interprétation de la carte piézométrique

La carte piézométrique, établie pour montrer deux directions principales d'écoulement des eaux souterraines de la nappe du remplissage alluviale de la vallée. Suivant la direction longitudinale, l'écoulement de la nappe se fait du Sud-ouest vers le Nord-est

Conformément au sens d'écoulement des eaux superficielles. Le sens d'écoulement caractérise la circulation principale du bassin hydrogéologique du remplissage alluvial, de l'amont vers l'aval.

Cette circulation traduit un écoulement qui se fait de la nappe vers la mer, suivant la direction transversale à l'axe de la vallée, l'écoulement de la nappe se fait des bordures vers le centre de la plaine.

II.6. Conclusion partielle

La détermination des différents endroits favorable à l'implantation des forages est basée sur une bonne connaissance de la géologie locale et des formations géologiques susceptibles d'être aquifères de la zone d'étude.

La région d'étude fait partie du Tell septentrional structuré lors de l'Orogène Alpin, elle constitue une zone de transition entre le domaine interne et le domaine externe.

L'analyse des caractéristiques lithologiques des principales unités structurales de la région nous a permis d'identifier quatre formations géologiques favorables aux constitutions d'aquifères non négligeables pour la mobilisation des ressources en eaux souterraines supplémentaires.

Chapitre III

Etude hydrochimique des eaux

Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

III.1. Introduction

L'étude de l'hydrochimie des eaux souterraines fournit 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. L'étude de la chimie des eaux souterraines 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. 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"(Piper, Schöeller-Berkaloff, ...) créé par Roland Simler du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (France). C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau [4].

Nous avons donc entrepris d'étudier les résultats des analyses chimiques de la campagne d'échantillonnage de l'eau au cours de l'année 2019 au niveau de dix-sept (17) forages situés à Béjaia-Est. Pour ce fait, une étude statistique a été menée par les méthodes d'Analyse en Composantes Principales(ACP), de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et d'Analyse Factorielle de Correspondance (AFC) pour la détermination et la classification de la qualité chimique de l'eau de la région.

III.2. 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).

$$BI = \frac{\sum r^+ - \sum r^-}{\sum r^+ + \sum r^-} * 100$$

Avec :

$\sum r^+$: Somme des concentrations des cations en meq/L (*milliéquivalent/litre*).

$\sum r^-$: Somme des concentrations des anions en meq/L.

Cette relation permet de définir trois classes:

- **BI < 2%**: Bonnes analyses.
- **2 ≤ BI < 5**: Analyses acceptables.
- **5 ≥ BI**: Mauvaises analyses (douteuses).

Le calcul de cet indice (Tableau III.1) nous a donné les résultats suivants.

Tableau III.1 : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude

Nom de point d'eau	Somme des cations (meq/L)	Somme des anions (meq/L)	Balance ionique (%)	Fiabilité des analyses
F1	6.97690	6.10260	7	Mauvaise
F2	11.0420	7.80310	17	Mauvaise
F3	11.6430	9.20040	12	Mauvaise
F4	6.98340	6.17350	6	Mauvaise
F5	6.98510	5.80290	9	Mauvaise
F6	6.98340	6.16820	6	Mauvaise
F7	13.2700	7.43330	28	Mauvaise
F8	7.02640	5.39860	13	Mauvaise
F9	6.99340	5.99320	8	Mauvaise
F10	6.99340	6.10500	7	Mauvaise
F11	6.98340	6.16820	6	Mauvaise
F12	6.97690	6.13050	6	Mauvaise
F13	9.21060	338.160	95	Mauvaise
F14	12.2330	533.420	96	Mauvaise
F15	10.7250	321.340	94	Mauvaise
F16	7.33310	255.780	94	Mauvaise
F17	10.3820	194.990	90	Mauvaise

III.3. Corrélation entre les cations et les anions

Pour confirmer la fiabilité des analyses, nous avons soumis les données hydro-chimiques à un test statistique pour mettre en évidence une corrélation linéaire qui existe entre la somme des cations et celle des anions.

La figure (III.1) représente la corrélation entre la somme des cations et la somme des anions qui témoigne de la bonne qualité des analyses chimiques de cette campagne d'échantillonnage au niveau des eaux souterraines de Béjaia.

La corrélation entre la somme des cations et celle des anions met en évidence une droite linéaire de la forme $y = ax + b$, dont l'équation est : $y = 31.227 x - 171.91$ et un coefficient de corrélation $R^2 = 0.1872$. Les 17 échantillons seront utilisés dans cette étude.

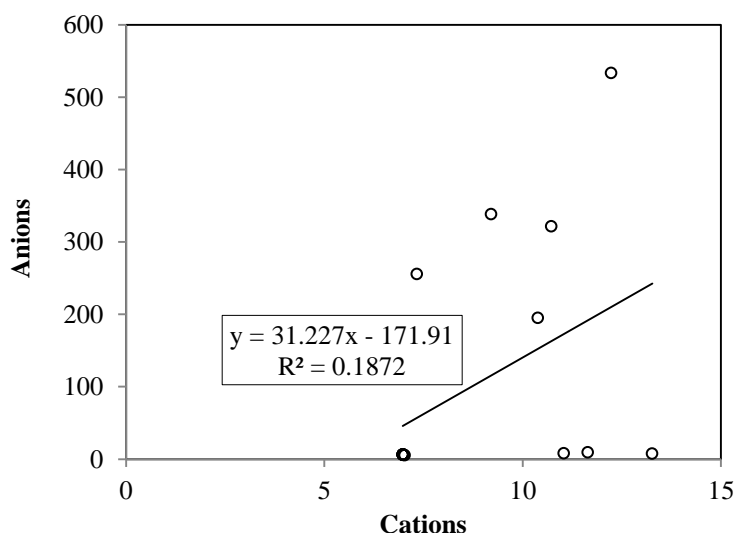


Figure III.1 : Corrélation entre les cations et les anions

III.4. Interprétation des données

III.4.1. Mesures au laboratoire

Les résultats des paramètres physiques mesurés sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau III.2: Résultats des mesures des paramètres physiques

Point d'eau	T (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	Turb (NTU)	TAC (°F)	TH (°F)
Norme	/	6.5 – 8.5	< 2800	< 5	20-35	10-50
F1	15	7,7	840	0,66	23,6	34,8
F2	27	7,1	1170	1,09	30	55,2
F3	24	7,3	1300	0,226	25	58
F4	15	7,7	840	0,65	24	35
F5	16	7,8	845	0,66	22	34
F6	15	7,7	835	0,655	24	35
F7	28	7,2	1080	0,902	25,2	66
F8	21	7,6	610	0,478	21,6	35
F9	15	7,7	830	0,65	23	35
F10	15	7,6	830	0,66	23,6	35
F11	15	7,7	840	0,72	24	34,8
F12	15	7,7	840	0,7	23,6	35
F13	16	7,1	1245	1	19,91	46,06
F14	17	6,9	1232	4	40,98	61,15
F15	17	6,8	530	15	21,35	53,61
F16	17	7,5	468	0,1	17	36,66
F17	17,4	7,4	450	0,1	13,33	51,9

III.5. Etude des paramètres physicochimiques

III.5.1. Paramètres ayant fait l'objet de limite de qualité

Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Algérienne Des Eaux (ADE) de Béjaia.

Deux méthodes ont été utilisées pour ces analyses :

- Méthode volumétrique : dosage des éléments suivants : TAC, TH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , K^+
- Méthode spectrophotométrique (DR2000) : analyse de : SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-

Pour les éléments Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- et NO_2^- , les valeurs étaient trop faibles. Elles sont négligeables.

III.5.2. Etude des paramètres physiques

III.5.2.1. Carte du titre hydrotimétrique (TH)

Le TH est l'indicateur de minéralisation de l'eau. Cela représente la somme des ions calcium magnésium contenus dans l'eau. C'est l'un des indicateurs principaux de la qualité de l'eau. Il indique sa dureté.

L'analyse de la carte de teneur en **TH** montre que la forte concentration est enregistrée au Nord-Est de la plaine au niveau du forage (F7: 66 °F) et au Sud-Ouest au niveau du forage (F14 : 61.15 °F) La concentration la plus faible est marquée dans la partie Nord-Est de la zone d'étude (F9, F10, F11, F12) avec une moyenne de 35 °F). Les parties Nord-Est et Sud-Ouest sont caractérisées par des teneurs moyennes variées de 51.9 à 58 °F.

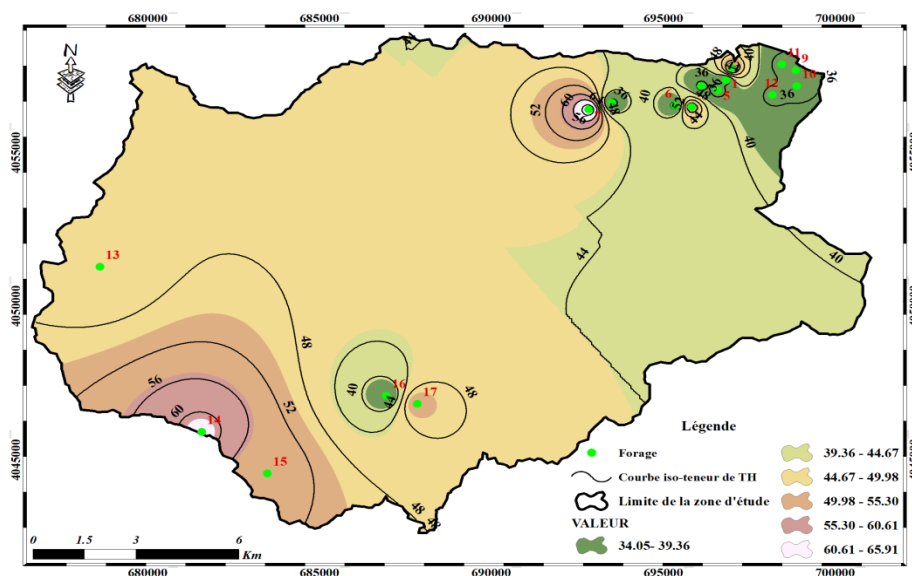


Figure III.2: Carte isovaleurs du TH

III.5.2.2. Carte du pH

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acidité carbonique, et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates [5].

L'analyse de la carte montre que les valeurs élevées du pH se trouvent au Sud-Ouest au niveau du forage (F15: 7) et à Nord-Est au niveau du forage (F 2: 7.6) de la zone d'étude. Toutes les teneurs du pH sont dans la norme de la potabilité (6.5 –8.5).

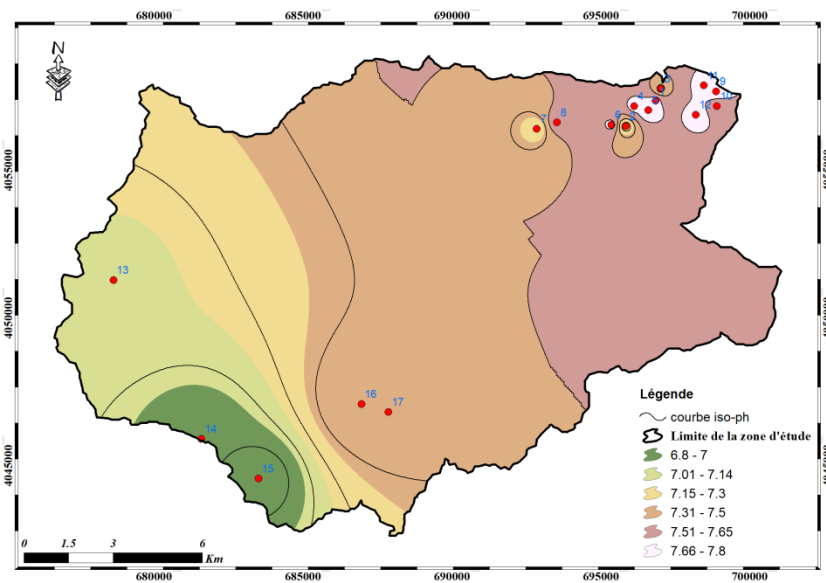


Figure III.3: Carte isovaleurs du pH

III.5.2.3. Carte de conductivité (CE)

La conductivité d'une eau augmente avec sa teneur en sels dissous, elle permet donc une estimation de la minéralisation. Elle est considérée comme étant la propriété que possède l'eau à permettre au courant électrique de passer [6].

Les conductivités enregistrées au niveau des eaux souterraines sont relativement moyennes (entre 450 $\mu S/cm$ et 1300 $\mu S/cm$). La valeur la plus élevée a été enregistrée à l'Ouest au niveau du forage (F3:1300 $\mu S/cm$), mais elle est dans la norme de potabilité (< 2800 $\mu S/cm$).

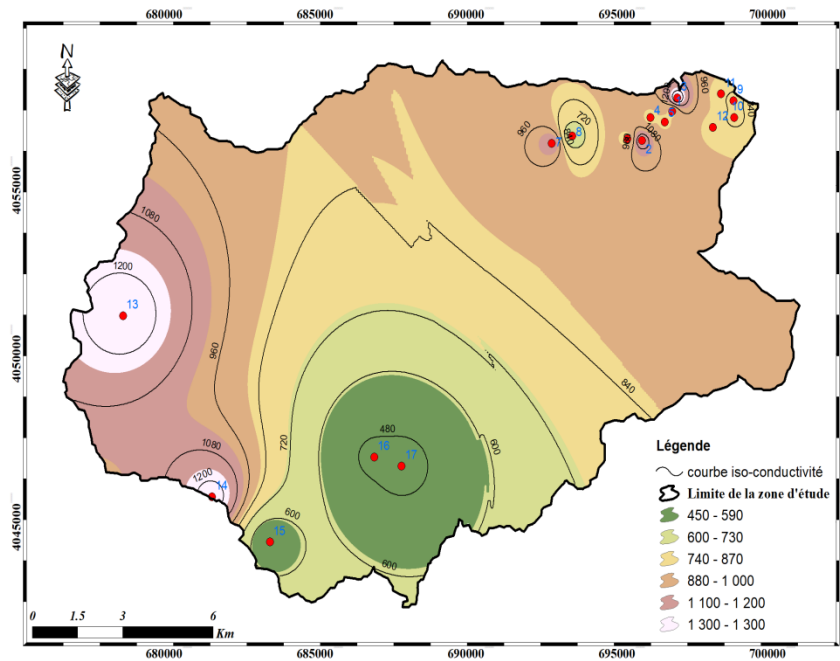


Figure III.4: Carte isovaleurs de la conductivité

III.5.2.4. Carte de la température

C'est un facteur important pour l'activité biologique, il influence la solubilité de l'oxygène du milieu récepteur, donc son pouvoir auto épurateur [7].

Les températures enregistrées au niveau des eaux souterraines sont relativement moyennes (entre 15 et 28). La valeur la plus élevée a été enregistrée au Nord-Ouest au niveau du forage (F2:25.2)

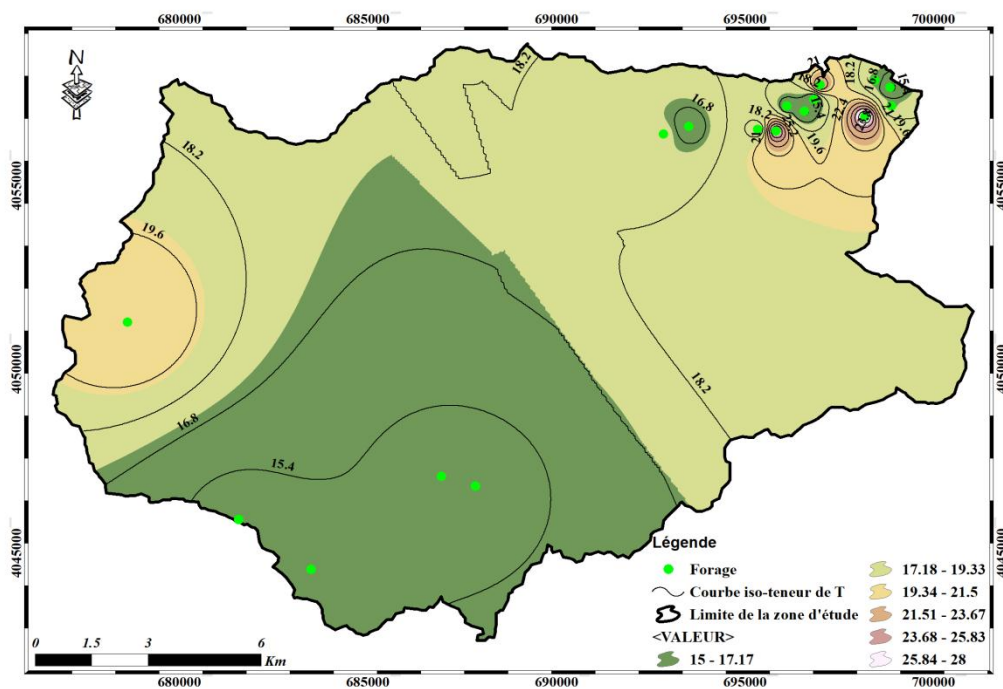


Figure III.5. Carte isovaleurs des températures

III.5.2.5. Carte iso-teneur en bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates (hydrogénocarbonates) proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2).

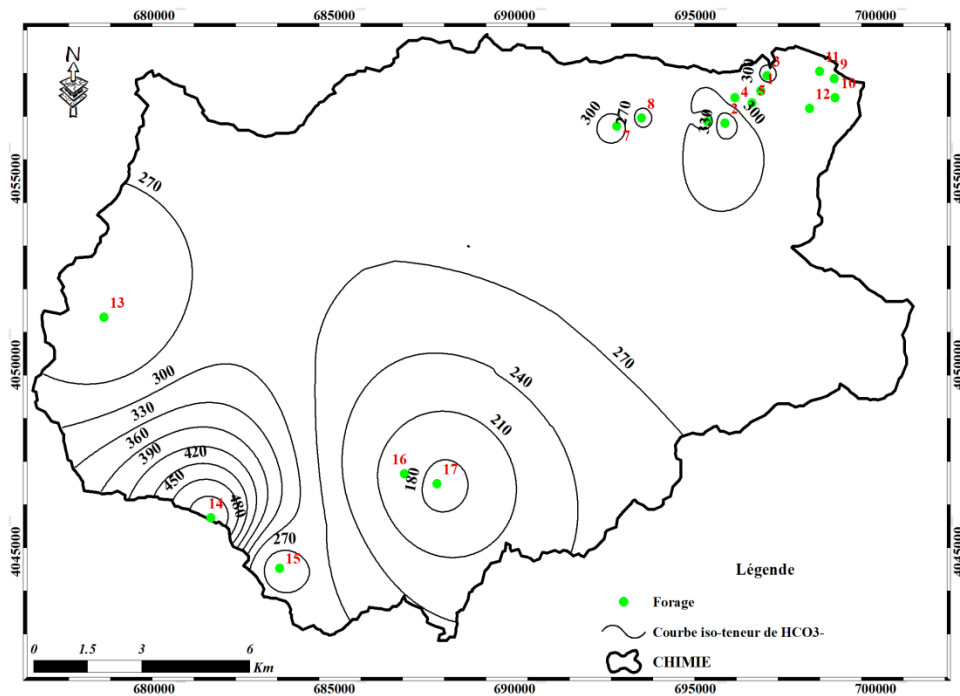


Figure III.6. Carte isovaleurs des bicarbonates (HCO_3^-)

La concentration élevée est enregistrée au niveau du Forage "Chef-lieu" (F14: 500 mg/L) dans le sens d'écoulement. Cela renseigne sur la dissolution des formations carbonatées, représentées par l'Aptien calcaire.

III.5.2.6. Carte du Titre alcalimétrique complet (TAC)

Il correspond à la teneur en ions OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- . Pour des pH inférieurs à 8.3, les teneurs en ions OH^- et CO_3^{2-} sont négligeables. Dans ce cas la mesure de TAC correspondant au dosage des bicarbonates seuls (HCO_3^-) [8].

D'après la carte de TAC, les fortes concentrations sont au niveau du Sud-ouest (F14 : 40 mg/L). Elles diminuent au niveau de sud (F17 : 14 mg/L). Les parties Nord-est sont caractérisées par des teneurs moyennes de (24 mg/L).

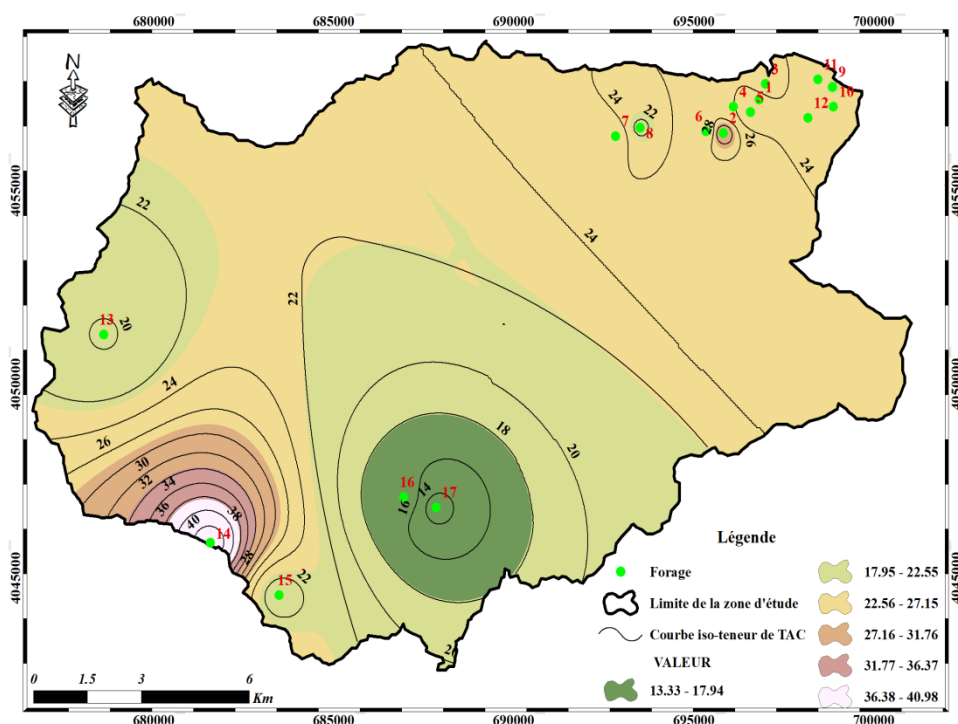


Figure III.7 : Carte isovaleurs du TAC

III.5.3. Etude des paramètres chimiques

III.5.3.1. Répartition et évolution des éléments majeurs

Les concentrations des principaux éléments chimiques sont reportées dans le tableau (III.3). Afin de voir la distribution des éléments chimiques dans notre zone d'étude, nous avons essayé de créer une carte de chaque élément chimique, en plus de discuter des sources de ces éléments (géologie, l'effet anthropique,...).

Tableau III.3: Résultats d'analyse des eaux

Nom	Longitude	Latitude	Ca ⁺⁺ (meq/L)	Mg ⁺⁺ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	HCO ₃ ⁻ (meq/L)
F1	5,1999	36,6401	4,16	2,81666667	1,38028169	4,72131148
F2	5,1885	36,6325	6,272	4,76916667	1,8028169	6
F3	5,2019	36,6437	6,8	4,84166667	4,2	5
F4	5,1994	36,6405	4,15	2,83333333	1,38591549	4,78688525
F5	5,19705	36,6373	4,16	2,825	1,4084507	4,39344262
F6	5,1865	36,632	4,15	2,83333333	1,38028169	4,78688525
F7	5,162	36,6336	5	8,26666667	2,4	5,03278689
F8	5,1627	36,6342	3,8	3,22666667	1,07802817	4,31967213
F9	5,22265	36,6426	4,16	2,83333333	1,38591549	4,60655738
F10	5,2216	36,6414	4,16	2,83333333	1,38309859	4,72131148
F11	5,2208	36,643	4,15	2,83333333	1,38028169	4,78688525

F12	5,2149	36,6356	4,16	2,81666667	1,4084507	4,72131148
F13	4,995	36,589	6,2	2,98333333	95,11	243
F14	5,0267	36,54	9,3	2,96666667	33,4	500
F15	5,0478	36,5275	6,5	4,20833333	60,76	260,54
F16	5,087	36,5496	5,3	2,08333333	47,82	208
F17	5,097	36,547	6,6	3,75	32,3	162,7

a) Carte isoteneurs de 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 [9].

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 ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) 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 [10].

L'analyse de la carte de teneur en calcium montre que la forte concentration est enregistrée au sud-ouest de la plaine au niveau du forage (F14 : 180 mg/L). La concentration la plus faible est marquée à la partie nord-est (F8 : 80 mg/L). Les parties sud sont caractérisées par des teneurs moyennes variées de 110 mg/L.

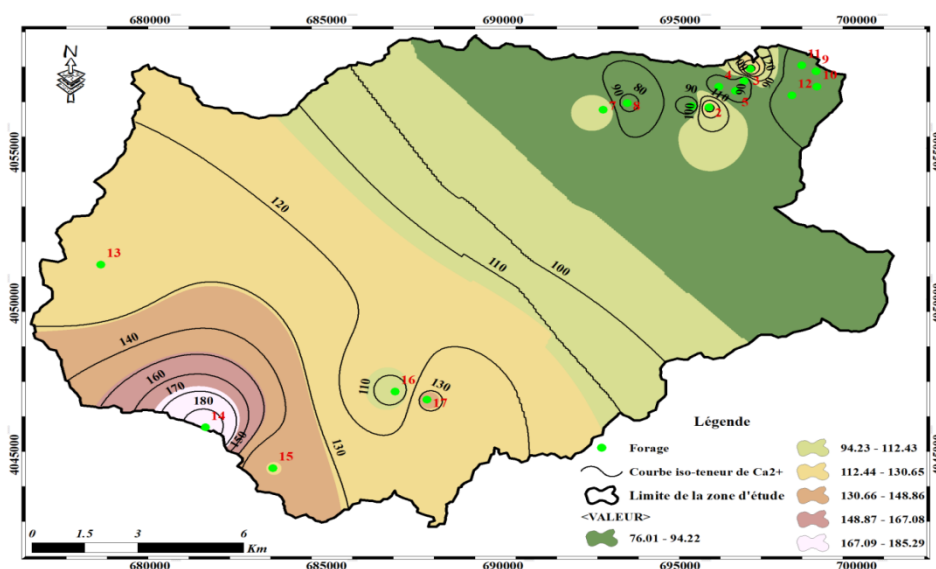


Figure III.8 : Carte isoteneurs du Ca^{2+}

b) Carte isoteneurs du 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 [11].

La concentration du magnésium sont en générale dans la norme de l'OMS (150 mg/L), avec une valeur minimale de 25 mg/L au niveau de forage 14 (32 mg/L). Les concentrations maximales sont enregistrés à la partie Nord au niveau du F7 et avec une valeur de 96 mg/L.

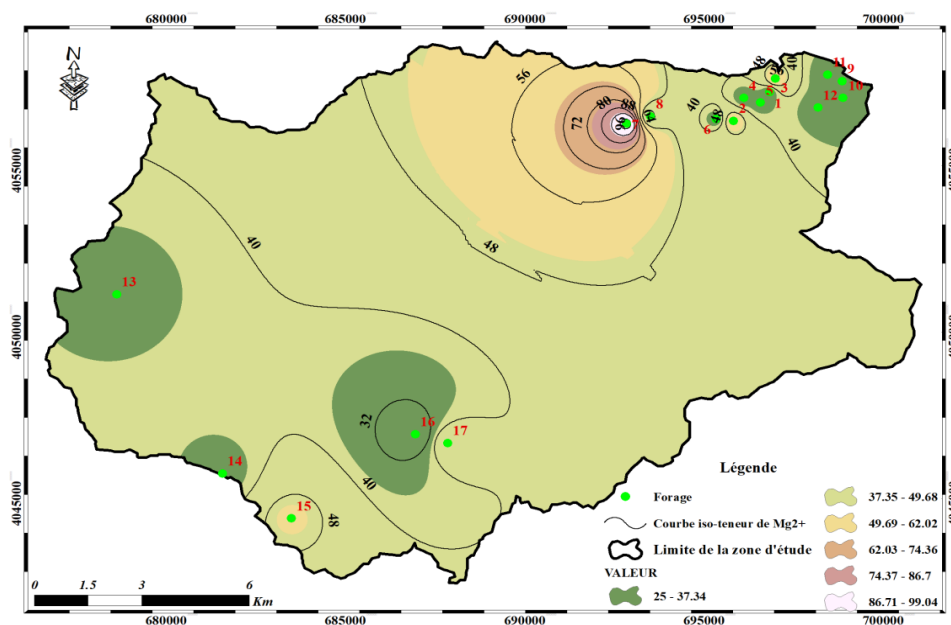


Figure III.9 : Carte isoteneurs du Mg^{2+}

c) Carte isoteneurs des 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 [8].

L'analyse de la carte de teneur en chlorure montre que la forte concentration est enregistrée au nord-est de la plaine au niveau du forage (F5 : 100 mg/L). La concentration la plus faible est marquée à la partie Sud-ouest (F14, F17 : 40mg/l). Les parties Nord-ouest sont caractérisées par des teneurs moyennes variant de 60 à 80 mg/L.

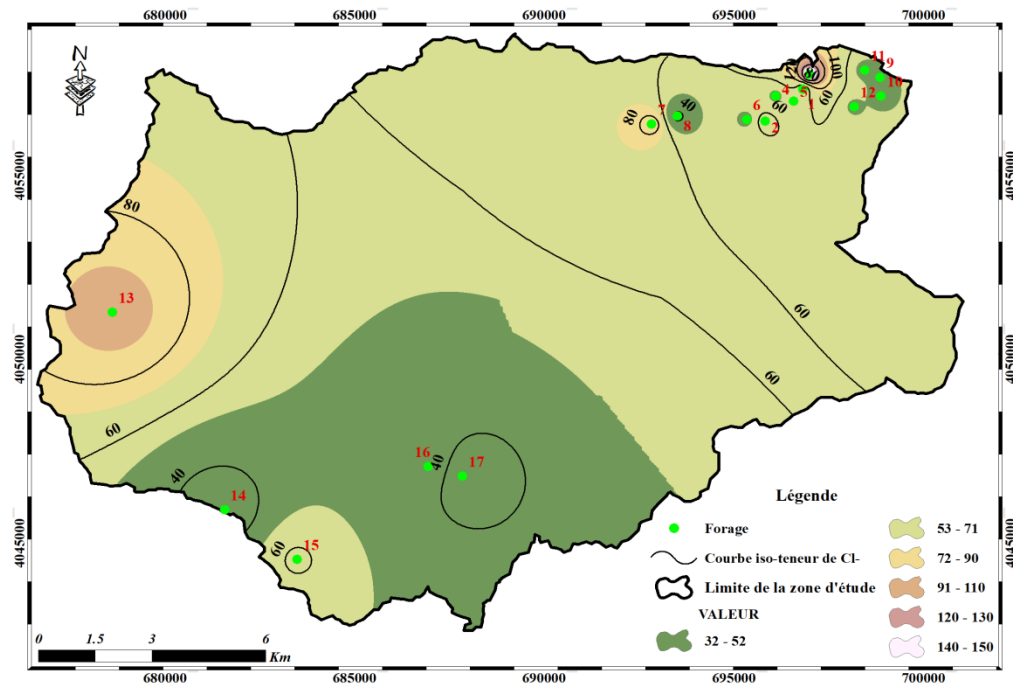


Figure III.10 : Carte isoteneurs du Cl

III.5.4. Représentation graphique des faciès chimiques

Les faciès chimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité d'une comparaison facile voire une classification des eaux naturelles nécessite l'utilisation des représentations graphiques. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer :

- le diagramme de Piper,
- le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff,
- le diagramme de Wilcox,
- le diagramme à coordonnées rayonnantes...

Dans notre étude, seules trois représentations graphiques ont été retenues et utilisées : le diagramme de Schöeller-Berkaloff, le diagramme de Piper et le diagramme Wilcox. La réalisation de ces diagrammes a été faite à l'aide du logiciel "Diagrammes".

III.5.4.1. Diagramme de Schöeller-Berkaloff

Le diagramme de *Schoeller-Berkaloff* 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.

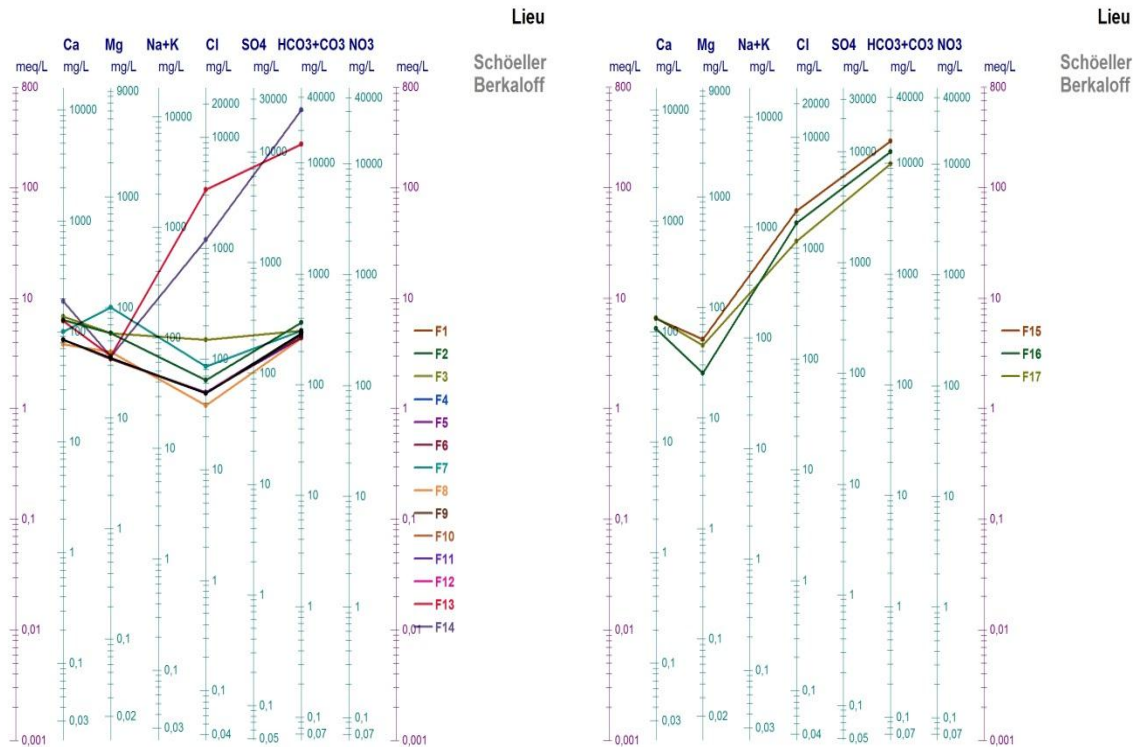


Figure III.11: Diagramme de Schöeller-Berkaloff

III.5.4.2. Classification de Wilcox

Généralement, les plantes supportent mal les sels saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, généralement connue en pourcentage du sodium, est définie par formule ci-après :

$$Na^+(\%) = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} * 100$$

où tous les éléments sont exprimés en (méq/L).

Ces éléments chimiques sont utilisés en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau. Le report des valeurs du SAR en fonction de la conductivité électrique sur le diagramme de Richard (Fig. III.12) nous a permis de dire que les eaux souterraines de la région, appartiennent à deux classes dominantes. Il s'agit de C2-S1 de salinité faible et C3-S1 de salinité faible. Donc on peut dire que les eaux souterraines de la région d'étude ne conviennent pas à l'irrigation, mais

pouvant être utilisés sous certaines condition des sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

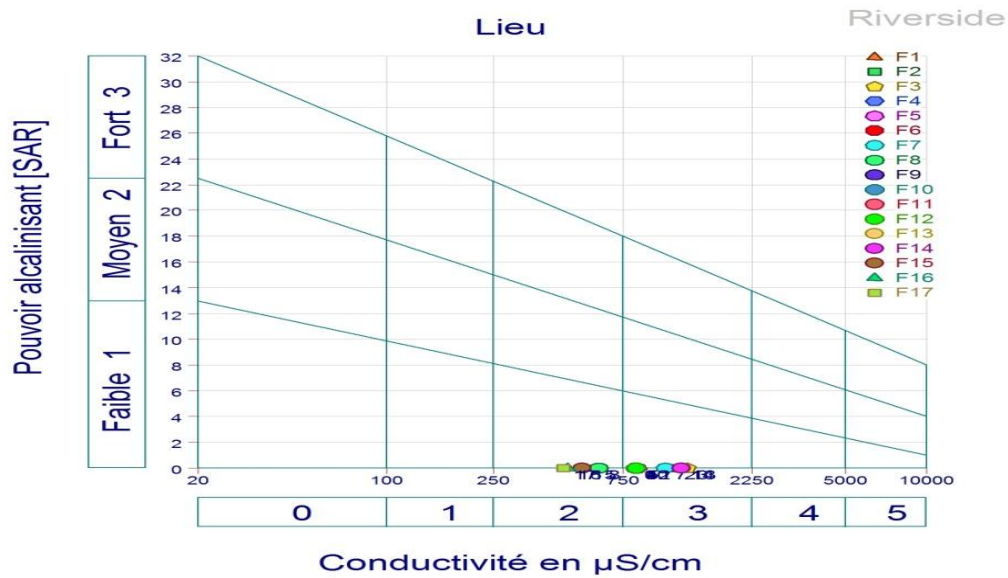


Figure III.12: Classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de SAR

III.5.4.3. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

La projection des résultats des analyses des eaux prélevées sur le diagramme de Piper (Fig. III.13) montre que le chimisme des eaux analysées est caractérisé par un faciès chimique bicarbonate calcique.

Tableau III.4 : Potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude

Point d'eau	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	CE (µS/cm)	TH (°F)	Remarque
Norme	200	150	200	-	6.5 - 8.5	2800	50	potable
F1	83,2	33,8	49	288	7,7	840	34,8	potable
F2	125,4	57,23	64	366	7,1	1170	55,2	médiocre
F3	136,0	58,1	149,1	305	7,3	1300	58	médiocre
F4	83,0	34	49,2	292	7,7	840	35	potable
F5	83,2	33,9	50	268	7,8	845	34	potable
F6	83,0	34	49	292	7,7	835	35	potable
F7	100,0	99,2	85,2	307	7,2	1080	66	médiocre
F8	76,0	38,72	38,27	263,5	7,6	610	35	potable
F9	83,2	34	49,2	281	7,7	830	35	potable
F10	83,2	34	49,1	288	7,6	830	35	potable
F11	83,0	34	49	292	7,7	840	34,8	potable
F12	83,2	33,8	50	288	7,7	840	35	potable
F13	124,6	35,8	95,11	243	7,1	1245	46,06	potable
F14	185,3	35,6	33,4	500	6,9	1232	61,15	médiocre

F15	130,3	50,5	60,76	260,54	6,8	530	53,61	médiocre
F16	105	25	47,82	208	7,5	468	36,66	potable
F17	132,6	45	32,3	162,7	7,4	450	51,9	acceptable

III.6.1.1. Titre hydrotimétrique total (TH)

Le TH ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium.

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \quad (\text{en meq/L})$$

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] * 5 \quad (\text{en } ^\circ\text{F})$$

Le tableau suivant montre que la majorité des eaux analysées sont très dures avec un TH supérieur à 50 °F.

Tableau III.5: Dureté des eaux en °F (Theobaldet Gama, 1969) [13]

TH(en °F)		0 –7	7 –22	22 –32	32 -54	> 54
Qualification de l'eau		Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Qualification de l'eau	2019	0	0	0	0	100

III.6.2. Aptitude à l'irrigation

III.6.2.1. Salinité

Selon [Rayers](#) et [Westcot](#) (1988) quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau [13]. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation montrent que :

- ✓ Si, la salinité exprimée par la conductivité électrique est inférieure à 700 $\mu\text{S/cm}$, il n'y a aucune restriction pour l'irrigation ;

- ✓ Si, la conductivité électrique varie entre 700 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- ✓ Et si, elle est supérieure à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est forte

Tableau.III.6: Classification de conductivité (2019)

Classe de la salinité	CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Pourcentage des échantillons (%)
C1	< 250	0
C2	250-750	23.53
C3	750-2250	76.47
C4	2250-5000	0
C5	5000-10000	0

III.7. Etude statistique des données hydrochimiques

III.7.1. Statistique descriptive

L'analyse statistique des données hydrochimiques est basée sur la description quantitative (le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation).

- **Le minimum et le maximum**

Ils représentent la plus grande et la plus petite valeur de l'échantillon.

- **La moyenne arithmétique**

La moyenne arithmétique d'une série quantitative est définie par la somme des valeurs observées, divisée par l'effectif total.

- **L'écart-type**

L'écart-type observé correspond à la racine carrée de la variance observée.

- **Le coefficient de variation (CV)**

Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart-type et la moyenne.

Les résultats statistiques des variables chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude sont reportés dans le tableau ci-après et comparés aux normes algériennes.

Tableau III.7: Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude

Variable	Observations sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ca⁺⁺	17	3,800	9,265	5,236	1,495
Mg⁺⁺	17	2,083	8,267	3,513	1,435
Cl⁻	17	1,078	95,110	17,058	27,704
HCO₃⁻	17	4,320	500,000	84,242	142,807
T	17	15,000	28,000	17,965	4,333
pH	17	6,800	7,800	7,441	0,316
Conductivité	17	450,000	1300,000	869,706	264,637
Turb	17	0,100	15,000	1,662	3,544
TAC	17	13,330	40,980	23,657	5,715
TH	17	34,000	66,000	43,658	11,363

Les résultats des coefficients de corrélation entre les variables sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau III.8: Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude

Variab les	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	T °C	pH	CE	Turb	TAC	TH
Ca ⁺⁺	1									
Mg ⁺⁺	0,206	1								
Cl ⁻	0,523	-0,119	1							
HCO ₃ ⁻	0,815	-0,143	0,735	1						
T	0,277	0,844	-0,159	-0,148	1					
pH	-0,843	-0,453	-0,619	-0,704	-0,450	1				
CE	0,378	0,336	-0,029	0,057	0,394	-0,323	1			
Turb	0,368	0,120	0,432	0,475	-0,057	-0,629	-0,202	1		
TAC	0,449	0,127	-0,218	0,316	0,208	-0,352	0,663	0,111	1	
TH	0,790	0,762	0,273	0,450	0,710	-0,844	0,459	0,320	0,377	1



Bonn Corrélation



Corrélation moyenne



Corrélation faible

III.7.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses physicochimiques). Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Le principe de l'ACP consiste à déterminer la corrélation des variables et de regrouper ces variables en ensembles dans des familles de même origine. Ces ensembles des variables nouvelles, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales [13,14].

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT (2016). Les données portent sur l'ensemble des analyses relatives aux huit forages. Les 8 variables traitées, concernent les paramètres physico-chimiques suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Conductivité, pH, TH, T, TAC. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le tableau (III.8).

1. Etude des valeurs propres

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, met en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de variance totale ainsi que leur cumul. Le premier axe principal a une valeur propre égale à **4.570**, il explique **45.704 %** de la variance totale. La seconde composante égale à **2.538** correspond à un pourcentage de **25.382 %**. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec **25.382 %** de la variance totale. Si on fait les trois facteurs (axes), ils traduisent l'essentiel des informations recherchées et permettent de représenter de manière significative le nuage de points car la somme de la variance exprimée par ces facteurs est de l'ordre de **85.109 %**. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus (Tableau III.9).

Tableau III.9: Valeurs propres des axes et leurs contributions

	F1	F2	F3
Valeur propre	4,570	2,538	1,402
Variabilité (%)	45,704	25,382	14,023
% cumulé	45,704	71,086	85,109

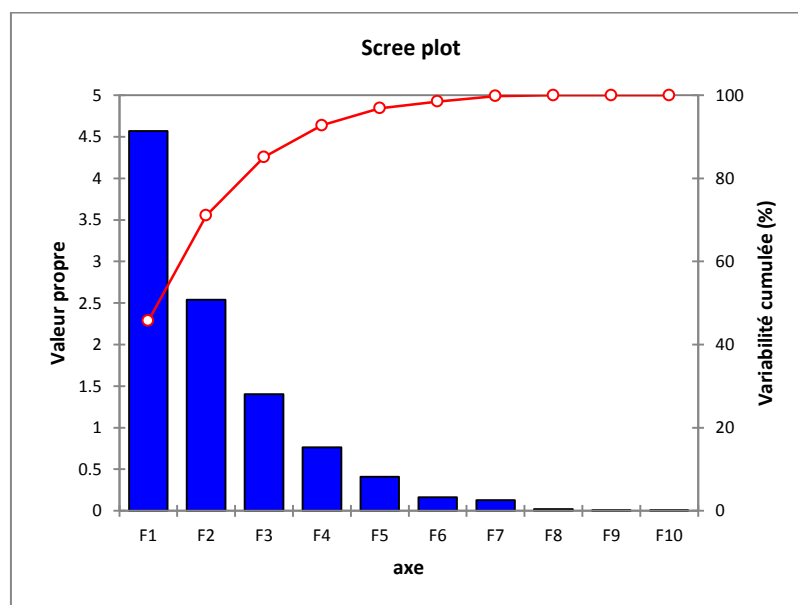


Figure III.14 : Valeurs propres des axes et leurs contributions

2. 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 (III.10).

Tableau III.10: Corrélation entre les variables et les axes

	F1	F2	F3
Ca ⁺⁺	-0,896	-0,211	0,186
Mg ⁺⁺	-0,530	0,665	-0,462
Cl ⁻	-0,495	-0,696	-0,182
HCO ₃ ⁻	-0,687	-0,637	0,209
T	-0,523	0,722	-0,324
pH	0,963	0,155	0,134
CE	-0,478	0,495	0,560
Turb	-0,494	-0,470	-0,294
TAC	-0,489	0,270	0,726
TH	-0,925	0,275	-0,167

- Le facteur F1 est corrélé positivement aux Ca²⁺, HCO₃⁻, pH, TH
- Le facteur F2 est corrélé positivement aux Mg⁺⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, T
- Le facteur F3 est corrélé positivement aux TAC

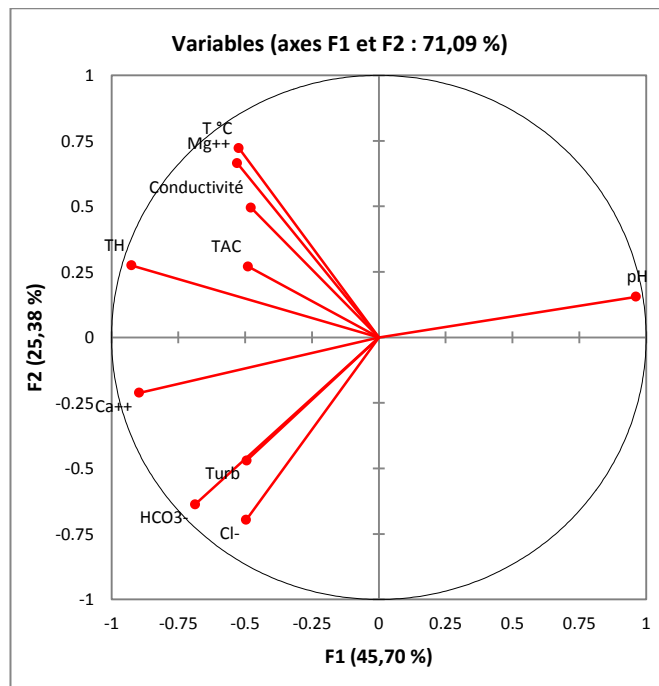


Figure III.15: Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1 et F2)

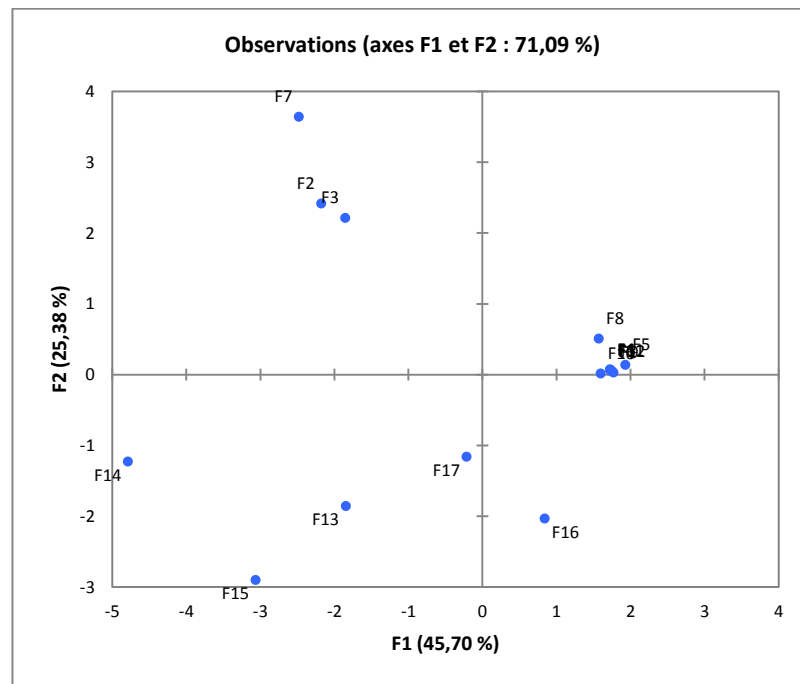


Figure III.16: Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)

Presque toutes les variables sont bien représentées dans ce plan factoriel car leurs corrélations avec les axes sont relativement importantes (les projections sont proches du cercle de corrélation

Sauf le pH et les HCO_3^- . L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est la suivante:

- Le premier axe factoriel exprimé par **45.70 %** est corrélé positivement aux: Mg^{2+} , Ca^{2+} , CE, TAC, TH et d'un degré moindre aux Cl, pH, HCO_3^- . C'est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issue de l'interaction eau-roche.

- Le second axe factoriel F2 exprimé par **25.38 %** est corrélé positivement. L'examen de cet espace factoriel (Fig.III.16) montre des groupements d'individus formant ainsi différentes familles d'eaux, où nous remarquons que presque tous les points d'eau sont regroupés excepté un point qui s'écarte clairement. Aussi, il semble se dégager 3 groupes :

Groupe 1 : rassemble les points d'eau (F7, F2, F3) sont des points d'eau qui se caractérisent par les plus fortes teneurs en T, Mg^{++} , TH.

Groupe 2 : rassemble les points d'eau (F14, F13, F15, F17) caractérisé par une forte minéralisation sur tout en HCO_3^- , Cl, Ca^{++} . Ces forages captent des eaux chlorurées calciques. La conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement de la zone d'étude qui est côtière et l'influence des eaux salées.

Groupe 3 : s'individualise par le point (F8, F5, F6, F4) qui se caractérise par des teneurs élevées en pH. Il présente une tendance Mg^{2+} et Ca^{2+} , influencé par les formations calcaires contenant du magnésium et la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$)

III.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a pour objectif de constituer des groupes homogènes d'objets (classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables, ou à partir d'une matrice décrivant la similarité ou la dis-similarité entre les objets. La CAH permet de construire une hiérarchie entière des objets sous la forme d'un "arbre" dans un ordre ascendant. 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 classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est lente. Par ailleurs, le dendrogramme peut devenir illisible si on l'utilise avec trop de données. La CAH permet donc d'obtenir une représentation schématique simple d'un tableau de données complexe à partir d'une typologie (segmentation), c'est à dire d'une partition des n individus dans des classes, définies par l'observation de p variables [12,14].

III.7.3.1. Principe de la CAH

La CAH est une méthode de classification itérative dont le principe est le suivant: Nous commençons par calculer la dis-similarité entre les N objets. Puis nous regroupons les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe

comprenant ces deux objets. Nous calculons ensuite la dis-similarité entre cette classe et les (N-2) autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis nous regroupons les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. Nous continuons ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés. Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme) (Fig. III.18), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. Nous pouvons alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs [12,14].

III.7.3.2. Application de CAH sur les résultats d'analyses des eaux de la région

Pour essayer de regrouper ces eaux en un nombre limité de groupes (classes), ces derniers auront deux propriétés :

- L'homogénéisation dans chaque classe et disparité entre les classes.
- Classes non prédéfinies mais découvertes au cours de l'opération. Nous avons utilisé le code de calcul XLSTAT(2016), afin de regrouper les forages ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 17 (forages) et les variables de 10. La méthode du lien complet a été choisie pour cerner la plus grande distance entre deux groupes. Pour la distance entre ces groupes c'est la distance euclidienne qui a été prise en considération vu sa fréquente utilisation dans ce genre de données [12,14].

Les résultats de cette méthode sont les suivants.

a) Statistiques des nœuds

Le tableau (III.11) regroupe les résultats concernant les nœuds successifs et les pertes d'inertie lors du passage d'une classe à une autre classe.

Tableau III.11 : Nœuds successifs du dendrogramme

Nœud	Niveau	Poids
33	57,279	17
32	37,772	8
31	25,849	5
30	16,968	4
29	10,035	3
28	5,602	3
27	2,598	9
26	2,470	2
25	1,070	2
24	0,244	8
23	0,087	7
22	0,019	6
21	0,006	5
20	0,001	3
19	0,000	2
18	0,000	2

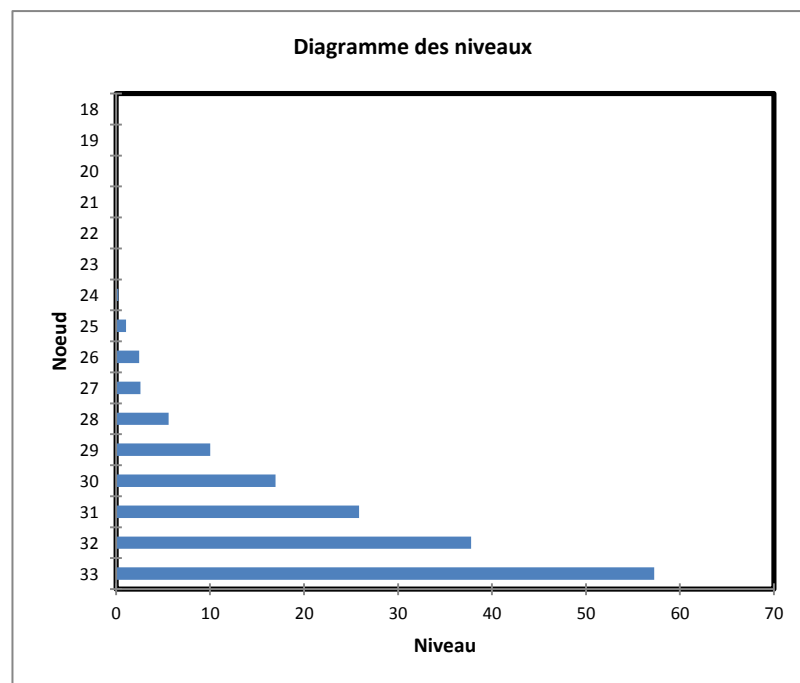


Figure III.17: Diagramme des niveaux

b) Dendrogramme

Le dendrogramme permet de visualiser le regroupement progressif des forages. Si une troncature a été demandée, un trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature, cette dernière permet de visualiser les classes. Dans notre cas, nous distinguons 5 classes (Fig. III.18 et III.19).

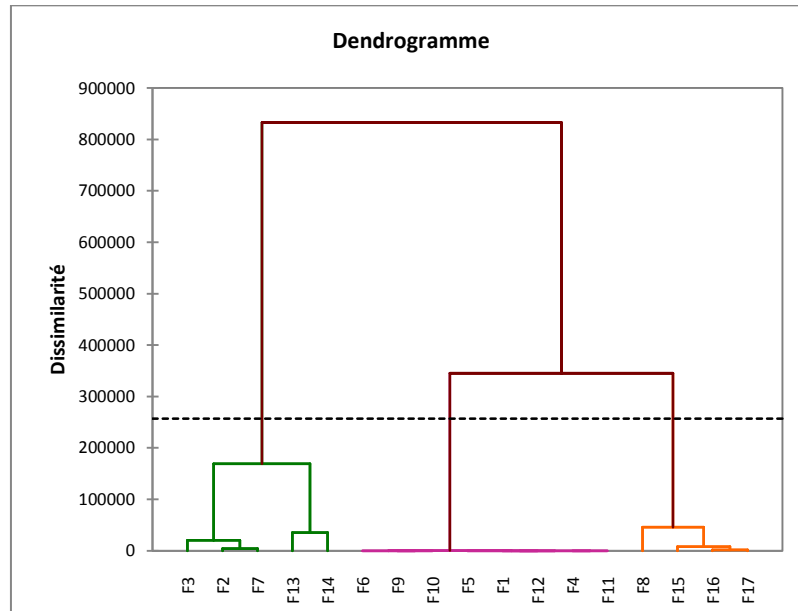


Figure III.18: Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)

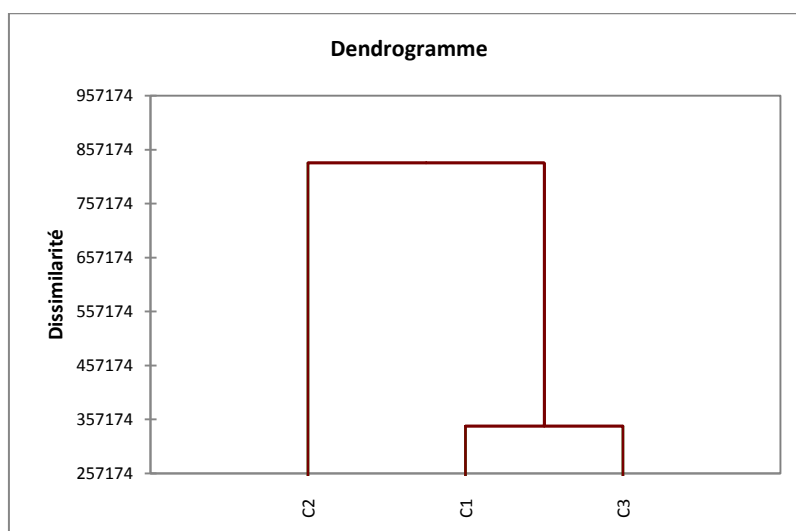


Figure III.19: Hiérarchie des partitions (intra-classes et inter-classes) obtenues par CAH

Le tableur XLSTAT nous fournit en plus du dendrogramme les barycentres des classes (Tableaux III.12).

Tableau III.12 : Barycentres des classes

Classe	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	T	pH	Conductivité	Turb	TAC	TH
1	4,156	2,828	1,389	4,691	15,125	7,700	837,500	0,669	23,475	34,825
2	6,713	4,766	27,383	151,807	22,400	7,120	1205,400	1,444	28,218	57,282
3	5,549	3,317	35,490	158,890	18,100	7,325	514,500	3,920	18,320	44,293

Les trois groupes préliminaires visualisés par l'examen du dendrogramme pour la période 2019 donnent les mêmes résultats et chaque groupe représente un faciès hydro-chimique; ce qui nous amène à une analyse et interprétation unique.

La conductivité électrique semble être un facteur distinctif majeur avec des concentrations croissantes dans tous les principaux ions des groupes 1, 2 et 3 (Tableau III.12).

- **Le groupe 1** : est composé des forages: F1, F4, F6, F11, F12. La conductivité électrique est de 837.500 (μS/cm)
- **Le groupe 2** : est représenté par le forage 14. La conductivité électrique est 1205.4 (μS/cm)
- **Le groupe 3**: est représenté par le forage 15. La conductivité électrique est 514.5 (μS/cm).

II.7.4. Analyse factorielle des correspondances (AFC)

Les méthodes d'analyses factorielles ont été initialement développées en France par *Jean-Paul Benzécri* au début des années 1960 [13]. Des techniques similaires ont été développées indépendamment dans différents pays, où elles sont plus connues sous les noms de graduation optimale, de moyennes réciproques, de scoring optimal, de méthode de quantification ou d'analyse d'homogénéité.

L'AFC est une analyse factorielle, et le terme "correspondances" signifie que sont étudiées les liaisons entre deux variables nominales, par opposition à la corrélation qui s'intéresse aux liens entre variables numériques.

Les deux buts principaux d'une analyse factorielle sont d'une part de détecter des proximités, et d'autre part de faire apparaître quelques variables synthétiques abstraites décorrélées entre elles (réduction de dimensionnalité). Ce second attrait ne constitue toutefois pas le but majeur de l'AFC. Le principe de l'AFC est l'étude de l'inertie du nuage de points ayant pour coordonnées les valeurs présentes sur les lignes du tableau de données. Les objectifs de l'AFC sont similaires à ceux de l'ACP : obtenir une typologie des lignes et des colonnes et étudier le lien entre ces deux typologies. Cependant, le concept de similarité entre les lignes et les colonnes est différent. Ici, la similarité entre deux lignes ou deux colonnes est complètement symétrique. Deux lignes (resp. colonnes) sont proches l'une de l'autre si elles s'associent aux colonnes (resp. lignes) de la même façon. On recherche les lignes (resp. colonnes) dont la distribution est la plus différente de celle de la population. Celles qui semblent le plus ou le moins semblable. Chaque groupe de lignes (resp. colonnes) est caractérisé par les colonnes (resp. lignes) auxquelles il est complètement ou peu associé.

1) Le graphique symétrique

Aussi appelé représentation barycentrique. Il utilise exclusivement les coordonnées principales mélangeant points-lignes et points-colonnes. Le pourcentage d'inertie correspondant à chacun des axes concernés et le pourcentage d'inertie cumulée du graphique sont affichés. La proximité entre deux modalités sur le graphique est représentative de leur association.

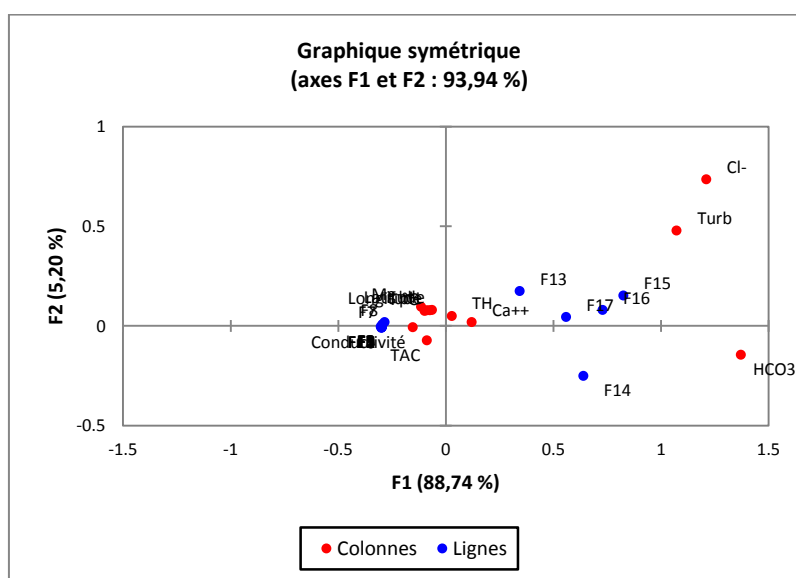


Figure III.20 : Graphique symétrique

L'application de l'AFC nous permet de conclure :

✓ les forages (F1, F12) sont à conjonction avec les éléments Mg^{++} , pH, CE et TAC. Ces forages captent des eaux carboniques de la dissolution des roches carbonatées, et présentent une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement de la zone d'étude et l'influence des eaux salées. Les forages F1, F14, F15, F16, F17 sont à conjonction avec les éléments TH, Ca^{2+} , Cl^- et HCO_3^- présentent la dissolution des roches évaporitiques.

III.7.5. Comparaison de différentes méthodes statistiques

-L'analyse en composant principale (ACP) permet de représenter les échantillons d'eau par 90.43% des informations à trois plans. L'ACP a donné trois groupes d'éléments physico-chimiques (carbonatés et évaporitiques)

.-La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de classer les eaux en cinq groupes, le premier carbonaté et caractérise une eau minéralisée de faciès chimique sulfaté calcique. Le second groupe est celui de la minéralisation d'origine évaporitiques. Le troisième groupe est présenté par les eaux profondes en contact avec les roches carbonatées, marqué par la pollution des nitrates d'origine anthropique. Le quatrième groupe caractérisé par les eaux composées (éléments minéraux). Le cinquième groupe présente les eaux moins salées.

-Cependant, l'analyse factorielle de correspondance (AFC) a permis de représenter les échantillons d'eau sur deux plans F1 et F2 par une signification de 85.10 %. Elle a donné deux groupes, le premier groupe présente une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée. Le second groupe présente la dissolution des roches évaporitiques. Le choix d'utilisation d'une méthode dépend du cas à étudier, par conséquent les deux méthodes CAH et ACP montrent plus la qualité des eaux pour les principaux ensembles et donnent toutefois les mêmes groupes. Par contre l'AFC détient les mêmes objectifs que l'ACP, mais ne forme pas le but majeur de l'AFC et faire apparaître quelques variables synthétiques abstraites décorrélées entre elles (réduction de dimensionnalité), comme elle appuie sur la symétrie entre lignes (observations) et colonnes (variables).

III.8. Conclusion partielle

L'étude de la qualité des eaux de la zone d'étude nous a permis de conclure que :

- Les résultats obtenus de l'analyse chimique de l'eau souterraine de la zone d'étude montrent l'évolution des principaux paramètres de qualité chimique tant du point de vue hydrologique (précipitations, infiltration) et géologique. Les caractéristiques minérales des eaux de la région d'étude sont apparues globalement potables avec quelques forages qui présentent des duretés allant de 51.9 à 66 °F (> 50 °F).

- Les méthodes statistiques multivariées ont été utilisées pour caractériser les systèmes d'eaux souterraines de la zone d'étude en fonction de leurs propriétés physicochimiques. Ceci est utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans les eaux souterraines de la zone d'étude. En outre, les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff ont mis en évidence que la qualité des eaux souterraines est caractérisée par un faciès chimique dominé par le bicarbonate calcique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude, qui a porté sur la connaissance de la situation actuelle des eaux souterraines de la région de Béjaia-Est (Bassin versant Djemaa-Zitouna), a abouti aux conclusions suivantes :

- La qualité chimique des eaux de la région montre que les eaux souterraines sont globalement potables, toutefois il existe quelques forages qui présentent des duretés allant de 51.9 à 66 °F (> 50 °F).
- L'analyse des caractéristiques lithologiques des principales unités structurales de la région nous a permis d'identifier quatre formations géologiques favorables aux constitutions d'aquifères non négligeables pour la mobilisation des ressources en eaux souterraines supplémentaires.
- L'étude hydrogéochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines. Les facteurs naturels et anthropiques influent sur cette qualité. Plusieurs outils d'interprétation ont été utilisés (cartographie, diagrammes, statistiques, etc.).
- Les méthodes statistiques multivariées ont été utilisées pour caractériser les systèmes d'eaux souterraines de la zone d'étude en fonction de leurs propriétés physicochimiques. Ceci est utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans les eaux souterraines de la zone d'étude. En outre, les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff ont mis en évidence que la qualité des eaux souterraines est caractérisée par un faciès chimique dominé par le bicarbonate calcique.
- L'interprétation des données par les méthodes statistiques multi-variées a montré que la variation des éléments chimiques est très significative. Les résultats obtenus indiquent que les paramètres responsables des variations de la qualité des eaux souterraines sont principalement liés à la présence et à la dissolution de certains minéraux carbonatés et évaporitiques dans l'aquifère, ainsi que par les activités anthropiques tout au long du bassin, correspondant à des apports d'engrais agricoles, de rejets domestiques et industriels.

Recommandations

Ci-après quelques recommandations qui visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, et à proposer des interventions en conséquence :

- Arrêter le déversement direct des rejets urbains et industriels au niveau des Oueds, en réalisant un traitement préalable de ces effluents avant qu'ils atteignent le milieu récepteur et surveiller en permanence la qualité des eaux.

- La recharge de la nappe.
- Eviter l'implantation des ouvrages d'AEP au niveau des berges des Oueds.
- Installer un réseau de piézomètres à hautes fréquences à travers la nappe pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique.
- Convaincre les responsables des services de l'environnement 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 les nouvelles techniques d'irrigation (gouttes à gouttes); -tout creusement de nouveau forage doit être effectué après une étude sérieuse.
- Implémentation d'une gestion intégrée des ressources en eau à même d'assurer un développement durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] S. Kherzi, Etude Hydrochimique des eaux de l'Oued Djemaa, Wilaya de Béjaia. *Mémoire de Magister en Hydraulique générale*, Université de Béjaia, (2011).
- [2] S. Riad, Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. *Thèse doctorat*. Université des Sciences et Technologies de Lille (France) et Université Ibnou Zohr d'Agadir (Maroc), (2002)
- [3] A. Sari, L'hydrologie de surface, *Editions distribution Houma*, Alger, (2002).
- [4] 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, Bejaia. *Thèse de Doctorat en Sciences*, Université de Béjaia, (2015).
- [5] M. Makhoukh, Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya. Maroc (2011).
- [6] A. Benrabia, Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda Wilaya de M'sila. *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique, Université de M'sila, (2013).
- [7] A. Benallou, Analyse physico-chimique des effluents provenant de la laiterie de Arib. Centre université de Khemis Miliana (2004).
- [8] K. Menad, Traitement des eaux saumâtres par l'osmose inverse cas de l'eau de Khemis Miliana. Université Khemis Miliana, (2012).
- [9] J. I. Drever, The geochemistry of natural waters. *3rd Edition*, Prentice Hall, New Jersey, (1997).
- [10] A. Graine, M. Ben Zemmouri, Approche hydrogéochimique des éléments conditionnant la qualité chimique des eaux souterraines de la région de Boussaâda. *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique urbaine, Université de M'sila (2018).
- [11] R. Bermond, C. Perrdon, Paramètres de la qualité des eaux. *Ministère de l'environnement*, Paris, (1979) 259.
- [12] M. Sanaa, Y. Naima, Caractérisations, classification et statistique multi variable des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de Sebdou(N-W algérien). *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique, Université de Tlemcen (2017).
- [13] A. Beyragued, A. Boudiaf, Contribution à la connaissance de la qualité des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam-Bejaia. *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique urbaine, Université de M'sila (2017).
- [14] H. Abdelatif, A. Khezzari, Etude de données physicochimiques des eaux de Boussaâda. *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique urbaine, Université de M'sila (2020).
- [15] M. Maza, N. Ben Hamiche, L. Hamdi, A. Saou, M. Graba, F. Oulebsir, Les ressources en eau, enjeu du développement : Cas de l'Oued Djemaa Wilaya de Bejaia, Université A. Mira de Bejaia. *Rapport 2010*.
- [16] O.M. Phillips, 1991: Flow and Reactions in Permeable Rocks. *Cambridge University Press*. Cambridge, (1991).