

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE 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 : HYDRAULIQUE URBAINE

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

Par: **HEBIL Yaakob**

et

**SAHRAOUI Marwa**

**Intitulé**

**Etude de la qualité physicochimique des eaux  
souterraines de la zone Ouest de Béjaia**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Temim Djamel

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Ferhati Ahmed

Université de M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2023 / 2024**

# REMERCIEMENTS

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

Nous tenons à exprimer à notre Directeur de mémoire, le Professeur **MERZOUK Belkacem**, notre profonde reconnaissance pour l'encadrement et les conseils qu'il nous a apportés. Il nous a transmis ses connaissances scientifiques et nous a supportés pendant nos travaux en brillant par sa gentillesse, sa disponibilité, sa générosité et ses encouragements.

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

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

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

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

*Sahraoui Marwa*

&

*Hebil Yaakob*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère mère et mon honorable père pour leur*

*soutien, leur aide,*

*leur patience et leur amour.*

*Mes frères Oualid, Ishak et Mohammed.*

*Toute ma famille.*

*Tous mes enseignants chacun par son nom.*

*Tous mes amis.*

*Toute ma promotion chacun par son nom.*

*Toute personne qui m'a aidé.*

**Yaakob Hebil**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère mère et mon honorable père pour leur*

*soutien, leur aide,*

*leur patience et leur amour.*

*Mes frères et mes sœurs*

*Toute ma famille.*

*Tous mes enseignants chacun par son nom.*

*Tous mes amis.*

*Toute ma promotion chacun par son nom.*

*Toute personne qui m'a aidée.*

**Marwa Saharaoui**

## Résumé

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la qualité physicochimique des eaux souterraines de la zone Ouest de Béjaia, appartenant au sous bassin versant Oued Soummam. A cet effet, nous avons utilisé des mesures et des analyses physicochimiques des eaux souterraines de cette région, effectuées par le laboratoire de l'Algérienne des eaux portant sur 18 forages.

L'utilisation des diagrammes chimiques (Schöeller-Berkaloff et Piper) et l'application d'analyses statistiques par différentes méthodes, 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 XLSTAT (2014) ont montré que les faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien, et chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique sont les plus dominants en raison de la nature géologique et hydrogéologique de la zone d'étude.

**Mots clés :** *Eaux souterraines, Béjaia Ouest, Hydrochimie, Diagrammes, Analyses statistiques.*

## Abstract

The main objective of this work is to study the physicochemical quality of groundwater in the western area of Béjaia, belonging to the Oued Soummam sub-watershed. For this purpose, we used measurements and physicochemical analyzes of groundwater in this region, carried out by the Algerian Water Laboratory involving 18 drillings.

The use of chemical diagrams (Schöeller-Berkaloff and Piper) and the application of statistical analyzes by different methods, such as, Principal Component Analysis (PCA), Hierarchical Ascending Classification (HAC) and Factor Analysis of Correspondences (FAC) using the XLSTAT software (2014) showed that the calcium and magnesium chloride-sulphate, and the sodium-potassium chloride or sodium sulfate are the most dominant facies due to the geological and hydrogeological nature of the study area.

**Keywords:** *Groundwater, Béjaia West, Hydrochemistry, Diagrams, Statistical Analyses.*

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية في المنطقة الغربية لبجاية التابعة للحوض المائي وادي الصومام. ولهذا الغرض، استخدمنا القياسات والتحليلات الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية في هذه المنطقة، التي أجراها مخبر الجزائرية للمياه (ADE) والتي شملت 18 بئرا.

استخدام المخططات الكيميائية (Schöeller-Berkaloff and Piper) وتطبيق التحليلات الإحصائية بطرق مختلفة مثل التحليل للمركبات الأساسية (ACP) والتصنيف التصاعدي الهرمي (CAH) والتحليل التوافقي (AFC) باستخدام برنامج XLSTAT (2014) أظهرت أن سحنات كلوريد-كبريتات الكالسيوم والمغنيسيوم، وسحنات كلوريد الصوديوم-البوتاسيوم أو سحنة كبريتات الصوديوم هي الأكثر هيمنة بسبب الطبيعة الجيولوجية والهيدروجيولوجية للمنطقة.

**الكلمات المفتاحية :** *المياه الجوفية، بجاية غرب، الهيدروكيميا، المخططات البيانية، التحليلات الإحصائية.*

## *Liste des tableaux*

## LISTE DES TABLEAUX

<b>N° du Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau I.1	Moyennes mensuelles et annuelles des précipitations (1970-2018)	03
Tableau I.2	Distribution des températures moyennes mensuelles à la station de Bejaia (2000-2016)	04
Tableau I.3	Classification de l'ORSTOM	12
Tableau I.4	Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié	14
Tableau II.1	Classification des eaux d'après leur pH	23
Tableau II.2	Normes Algériennes de potabilisation	26
Tableau II.3	Inventaire et caractéristiques des points d'eau	27
Tableau II.4	Teneurs des ions majeurs des eaux des forages étudiés	27
Tableau III.1	Potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude	29
Tableau III.2	Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude	30
Tableau III.3	Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux étudiées	46
Tableau III.4	Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux étudiées	46
Tableau III.5	Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux	48
Tableau III.6	Corrélations entre les variables et les facteurs	48
Tableau III.7	Nœuds successifs du dendrogramme	52
Tableau III.8	Barycentres des classes	54

## *Liste des figures*

## LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Fig. I.1	Carte de limites de la Wilaya de Béjaia	02
Fig. I.2	Forme allongée du sous bassin Oued Soummam	08
Fig. I.3	Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Soummam	09
Fig. I.4	Carte des tranches d'altitude du sous bassin Oued Soummam	10
Fig. I.5	Carte des pentes du sous bassin	12
Fig. I.6	Réseau hydrographique du sous bassin Oued Soummam	13
Fig. II.1	Carte géologique de la vallée de la Soummam	17
Fig. II.2	Carte hydrogéologique de la Willaya de Béjaia	17
Fig. II.3	Colonne stratigraphique synthétique d'unités de Gouraya-Aghbalou	20
Fig. II.4	Relation hydraulique nappe-Oued d'après le jaugeage différentiel	22
Fig. II.5	Carte de positionnement des forages étudiés	28
Fig. III.1	Corrélation entre les cations et les anions	31
Fig. III.2	Carte iso-valeurs du TH	32
Fig. III.3	Carte iso-valeurs du pH	33
Fig. III.4	Carte iso-valeurs de la conductivité	33
Fig. III.5	Carte iso-valeurs des températures	34
Fig. III.6	Carte iso-valeurs du TAC	35
Fig. III.7	Carte iso-valeurs de $\text{Na}^{2+}$	36
Fig. III.8	Carte iso-valeurs de $\text{Ca}^{2+}$	37
Fig. III.9	Carte iso-valeurs de $\text{Mg}^{2+}$	38
Fig. III.10	Carte iso-valeurs de $\text{K}^{+}$	38
Fig. III.11	Carte iso-valeurs de $\text{SO}_4^{2-}$	39
Fig. III.12	Carte iso-valeurs de $\text{NO}_3^{-}$	40
Fig. III.13	Carte iso-valeurs de $\text{Cl}^{-}$	41
Fig. III.14	Carte iso-valeurs de $\text{HCO}_3^{-}$	42
Fig. III.15	Carte iso-valeurs de la turbidité	42
Fig. III.16	Diagramme de Schöeller-Berkaloff	44
Fig. III.17	Diagramme de Piper	45
Fig. III.18	Valeurs propres des axes et leurs contributions	48
Fig. III.19	Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1-F2)	49

Fig. III.20	Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)	49
Fig. III.21	Diagramme des niveaux	52
Fig. III.22	Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)	53
Fig. III.23	Hiérarchie des partitions (intra-classes et inter-classes) obtenues par CAH	53
Fig. III.24	Graphique symétrique	55

# *Sommaire*

# TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicaces

Résumé en français, en anglais et en arabe

Liste des tableaux

Liste des figures

Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
------------------------------------	----

## Chapitre I: Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction .....	02
I.2. Aperçu géographique .....	02
I.2.1. Situation géographique de la Wilaya de Béjaia .....	02
I.2.2. Le climat .....	02
I.2.3. La pluviométrie .....	03
I.2.4. Les plans d'eau .....	03
I.2.5. Températures .....	04
I.2.6. Le relief .....	04
I.2.7. Démographie .....	05
I.3. Caractéristiques économiques de la Wilaya de Bejaia .....	05
I.4. L'agriculture .....	06
I.5. L'industrie .....	06
I.6. Les sources de pollution de l'Oued Soummam .....	06
I.7. Etude morphométrique du sous bassin de la région d'étude .....	07
I.7.1. La surface .....	07
I.7.2. Le périmètre .....	07
I.7.3. La forme .....	07
I.7.4. Le rectangle équivalent .....	08
I.7.5. Altimétrie et courbe hypsométrique .....	09
I.7.6. Caractéristiques des altitudes .....	10
I.7.7. Indice de pente .....	10
I.8. Les caractéristiques du réseau hydrographique .....	12
I.8.1. Densité de drainage .....	13
I.8.2. Temps de concentration .....	13
I.8.3. Vitesse d'écoulement de l'eau .....	14
I.8.4. Densité hydrographique .....	14
I.9. Conclusion partielle .....	15

## Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique

II.1. Introduction .....	16
II.2. Aperçu géologique de la zone d'étude .....	16
II.3. Litho-stratigraphie .....	17
II.3.1. Socle et couverture .....	17
II.3.2. Trias .....	18
II.3.3. Jurassique .....	18
II.3.4. Crétacé .....	19
II.3.5. Oligocène .....	19
II.3.6. Miocène .....	19
II.3.7. Pliocène .....	20
II.3.8. Quaternaire .....	20
II.4. Pédologie .....	21
II.5. Aperçu hydrogéologique .....	21
II.6. Les eaux souterraines .....	22
II.7. Paramètre de qualité des eaux .....	23
II.7.1. Paramètres organoleptiques .....	23
II.7.2. Paramètres physicochimiques .....	23
II.7.3. Indicateurs biologiques .....	25
II.7.4. Normes de potabilisation .....	25
II.8. Caractéristiques des points d'eau étudiés .....	27
II.9. Conclusion partielle .....	28

## Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

III.1. Introduction .....	29
III.2. Potabilité des eaux .....	29
III.3. Calcul de la balance ionique .....	30
III.4. Corrélation entre les cations et les anions .....	31
III.5. Etude des paramètres physicochimiques .....	31
III.5.1. Carte du titre hydrotimétrique (TH) .....	32
III.5.2. Carte du pH .....	32
III.5.3. Carte de conductivité (CE).....	33
III.5.4. Carte de la température .....	34
III.5.5. Carte du Titre alcalimétrique complet (TAC).....	34
III.5.6. Carte de sodium ( $\text{Na}^+$ ).....	35
III.5.7. Carte du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).....	36
III.5.8. Carte du magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) .....	37
III.5.9. Carte de potassium ( $\text{K}^+$ ) .....	38
III.5.10. Carte des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) .....	39
III.5.11. Carte des Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) .....	40
III.5.12. Carte des chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) .....	40
III.5.13. Carte des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) .....	41
III.5.14. Carte de la turbidité .....	42

III.6. Représentation graphique des faciès chimiques .....	43
III.6.1. Classification de Schöeller-Berkaloff .....	43
III.6.2. Classification de Piper .....	44
III.7. Etude statistique des données hydrochimiques .....	45
III.7.1. Statistique descriptive .....	45
III.7.2. Analyse en composantes principales (ACP) .....	47
III.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) .....	50
III.7.4. Analyse factorielle des correspondances (AFC) .....	54
III.8. Conclusion partielle .....	56
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>57</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

L'eau est un élément indispensable pour la vie mais sa disponibilité n'est pas assurée partout, et sa qualité souvent ne respecte pas les normes concernant l'eau potable.

Les eaux souterraines sont une source de consommation très importante dans la plupart des régions du monde, en particulier lorsque les précipitations sont faibles. Elles représentent une part importante de l'eau potable dans les régions arides et semi-arides. La qualité de ces eaux se diffère d'une région à une autre selon plusieurs critères, dont le plus important est la nature géologique et hydrogéologique de l'aquifère. Cette qualité peut être aussi affectée par les activités anthropiques dues par l'être humain.

Malgré la présence du barrage Tichy-Haf au niveau de la Wilaya de Béjaia, l'eau souterraine reste une source très utilisée pour satisfaire les besoins en eaux potable de ses habitants. A présent avec la rareté des précipitations, l'accélération du développement démographique et économique ainsi que, l'évolution du mode de vie nous obligent à prendre en considération l'étude de la qualité et de la quantité de cette ressource destinée à l'alimentation en eau potable.

Le but de ce présent travail est d'étudier les principaux facteurs qui régissent la qualité physico-chimique des eaux souterraines analysées en 2023 de la zone Ouest de Béjaia (Bassin versant Oued Soummam), 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.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre portera sur la présentation de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre présente le contexte géologique et hydrogéologique de la basse Soummam.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude hydrochimique des eaux en utilisant les diagrammes (Schöeller-Berkaloff et Piper), et l'application des méthodes statistiques multivariées sous le logiciel XLSTAT, telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC).

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

# **Chapitre I**

## ***Présentation de la zone d'étude***

## Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

### I.1. Introduction

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

### I.2. Aperçu géographique

#### I.2.1. Situation géographique de la Wilaya de Béjaia

La Wilaya de Béjaia est située à l'extrême Centre -Est algérien. Elle est localisée entre  $36^{\circ}12'53''$  et  $36^{\circ}53'52''$  de latitude Nord et  $4^{\circ}21'02''$  et  $5^{\circ}29'01''$  de longitude Est. Elle a une superficie de 3268 km<sup>2</sup>. Cette Wilaya est limitée au Nord par la mer méditerranée, au Sud par les Wilayas de Sétif et Bordj Bou Arreridj, à l'Est par la Wilaya de Jijel et à l'Ouest par les Wilayas de Bouira et Tizi-Ouzou (Fig. I.1) [1].



Figure I.1 : Carte de limites de la Wilaya de Béjaia

#### I.2.2. 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 [2].

### ***1.2.3. La pluviométrie***

La région de Bejaia fait partie des régions les mieux arrosées du pays et reçoit une quantité d'eau considérable durant l'hiver. Toutefois, cette pluviométrie est caractérisée par une grande variabilité intermensuelle, ce qui donne des saisons pluvieuses et d'autres sèches. Les mois les plus prodigues sont décembre, janvier, février et les plus secs sont juin, juillet et août. Quant aux précipitations neigeuses, elles durent en moyenne de 10 à 20 jours/an et ne touchent que les pics des montagnes les plus élevés. Le volume de la pluviométrie décroît en allant du littoral vers l'intérieur (la haute Soummam), à l'exception de quelques sommets montagneux qui reçoivent de la neige [3]. D'après la station pluviométrique de Bejaia-aéroport (Altitude : 2 m, Latitude : 36°43', Longitude : 05°04'E), la pluie moyenne annuelle est de 761 mm/an. La répartition mensuelle de cette pluie est la suivante.

**Tableau I.1: Moyennes mensuelles et annuelles des précipitations (1970-2018)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	An
P (mm)	48	89	98	122	113	111	89	74	42	14	7	11	761

### ***1.2.4. Les plans d'eau***

La Wilaya de Béjaia compte une dizaine de lacs et barrages, dont certains sont exploités pour subvenir aux besoins en eau, pour les ménages, l'agriculture et l'industrie. Parmi ces plans d'eau, on cite :

#### ***1.2.4.1. Barrages et lacs***

- Le barrage d'Ighil-Emda (Kherrata) : d'une capacité de 110 millions de m<sup>3</sup> est destiné à la production de l'énergie électrique.
- Le barrage de Tichihaf : d'une capacité de 150 million de m<sup>3</sup> 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.

#### ***1.2.4.2. 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 [4].

### ***1.2.5. Températures***

La wilaya de Bejaia bénéficie d'un climat de type méditerranéen. Il est généralement humide avec un léger changement de température saisonnier. Les températures moyennes sont globalement douces et varient de 9,1 °C en hiver à 25,4 °C en été. Les températures moyennes mensuelles sur une période de 17 années (2000-2016) enregistrées à la station de Bejaia sont représentées dans le tableau ci-dessous, font apparaître un hiver doux et un été chaud [5].

**Tableau I.2 : Distribution des températures moyennes mensuelles à la station de Bejaia (2000-2016)**

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
<b>T<sub>max</sub></b> (°C)	14,2	14,7	17,4	17,5	20,9	25	27,4	28,3	26	23,5	18,9	15,3
<b>T<sub>min</sub></b> (°C)	9,8	8,6	13	15	17,2	20,3	24	24,8	23,2	19,9	14,7	11,8
<b>T<sub>moy</sub></b> (°C)	12	11.65	15,2	16,25	19.05	22,65	25,7	26,55	24.6	21,7	16,8	13,55

### ***1.2.6. Le relief***

Situé en plein atlas tellien, le territoire de la Wilaya de Bejaia se présente comme une masse montagneuse compacte et bosselée, traversée par le couloir formé par la vallée de la Soummam.

On distingue trois ensembles de reliefs :

- **L'ensemble de montagnes:** occupe 75% soit 3/4 de la superficie totale de la Wilaya. Elle est constituée des chaînes des Bibans, Babors et Djurdjura.
- **L'ensemble de piémonts:** d'une morphologie ondulée constitué d'une succession de collines, il apparaît moins accidenté que la zone de montagne. Il représente la zone intermédiaire entre la plaine et la montagne.
- **L'ensemble de plaine:** composé des plaines de la vallée de la Soummam qui apparaît comme une bande sinueuse de 80 km de long sur une largeur maximale de 04 km et la plaine côtière qui sépare la mer et la chaîne des Babors, elle se présente comme une bande

étroite qui s'étend de l'embouchure de Oued Soummam à celui de Oued Agrioun soit une trentaine de kilomètres.

### ***1.2.7. Démographie***

Sur le plan démographique, la Wilaya de Bejaia est passée de 924 280 habitants en 2010 à près de 974 000 habitants en 2016. Cette évolution importante est accompagnée d'un taux de croissance estimé à 1,07% /an et une densité moyenne de 298 habitants/km<sup>2</sup>. La distribution de la population fait ressortir que 61 % des habitants vivent dans les chefs-lieux, 26,6 % dans les agglomérations secondaires et le reste dans des hameaux et les zones éparses. Ainsi, la population vivant en agglomération représente 87,6 % du total d'habitants [5].

La vallée de la Soummam passe par 23 communes dont la répartition de la population selon la direction de la vallée et de la population de la wilaya en 2018 atteint 978050 habitants. Il y a lieu de signaler que plus de la moitié de la population de la wilaya de Bejaia se trouve concentrée le long de cette vallée, ainsi que les unités industrielles. Le nombre des habitants des communes qui sont en relation avec l'Oued Soummam est de 490423 habitants [5].

### **1.3. Caractéristiques économiques de la Wilaya de Bejaia**

En matière d'activités économiques, la Wilaya de Bejaia est incontestablement l'une des régions nationales les plus dynamiques. Ceci peut être illustré par les statistiques suivantes :

A l'échelle nationale d'abord, cette Wilaya occupe la quatrième position en termes de la part en pourcentage des entreprises locale sur l'ensemble des entreprises à l'échelle nationale de type industriel avec 4.17 % et ce, après la Wilaya d'Alger (12.26 %), la Wilaya Oran (6.4 %) et la Wilaya de Tizi-Ouzou (5.35 %) (Ministère algérien de la PME, bulletin 2006). A l'échelle locale ensuite, la Wilaya de Bejaia compte 6812 entreprises au début 2006.

De cet ensemble, 1.89 % revient au secteur primaire, 42.10 % relève du secteur secondaire et 56% est dans le secteur tertiaire ; ce qui donne une répartition sectorielle similaire à celle des pays développés. Au sein du secteur secondaire, 17.57 % des entreprises appartiennent à l'industrie (y compris matériaux de construction dont le nombre d'entreprises s'élève à 162), 40.58 % à l'artisanat, 41.84 % au BTP. La classification par nature juridique des entreprises nous donne, sur les 504 entreprises industrielles recensées, 11.11 % sont de nature publique et 88,89% sont de nature privée. Par ailleurs, près de 68.30 % des entreprises industrielles privées sont des toutes petites entreprises (le nombre de salariés est inférieur à 10). Par contre, 31.69 % (soit 142 entreprises) emploient un effectif supérieur ou égal à 10 salariés.

En plus, de par leurs importances stratégiques (sécurité alimentaire), les industries agroalimentaires occupent une place privilégiée dans la nouvelle stratégie industrielle nationale fondée sur les pôles de compétitivité. A cet effet, la région de la Soummam a été choisie comme

l'un des espaces appropriés pour le développement d'un pôle de compétitivité basé sur les entreprises agroalimentaires. Dans le domaine de communication, elle représente un axe très important, à la fois régional et national, tant sur le plan routier que ferroviaire. Elle est empruntée sur toute sa longueur par l'oléoduc Hassi Messaoud - Bejaia qui assure l'évacuation jusqu'au port de Bejaia d'une partie importante du pétrole [6].

#### **I.4. L'agriculture**

La vallée de la Soummam présente un relief très peu accidenté avec des pentes dominantes inférieures à 3% (plaines sous lesquelles l'intensification de l'agriculture pourrait se faire sans aucune contrainte de mécanisation), formant une surface agricole totale de 75888 ha, ce qui représente 35% de la superficie agricole de Bejaia avec 87% représentant l'agricole utile. L'agriculture est pratiquée sur l'ensemble de la plaine, avec une très grande variété de cultures : Plantation fruitières : 56 %, cultures herbacées : 18%, prairies naturelles : 1%, Vignobles : 1 %, Terres au repos : 24 %.

#### **I.5. L'industrie**

La région de Soummam représente une zone d'activité intense, elle renferme plusieurs unités industrielles répartis sur toute la région, dont trois zones principales qui forment des zones de concentration de ces activités, Bejaia, El kseur et Akbou, constituant un ensemble de 87 unités de production dont 52 sont des unités privées, les principales unités industrielles sont concentrées en grande partie dans la wilaya de Bejaia. Parmi les grandes usines implantées dans la région ceux de SONATRACH, NAFTAL et CEVITAL. L'activité industrielle est répartie principalement en cinq filières [2,5]:

- 1- Matériaux de construction (27 %)
- 2- Agro-alimentaire (26 %)
- 3- Chimie de Plastique et pharmacie (19 %)
- 4- Textiles (9 %)
- 5- Sidérurgie et Métallurgie (3 %).

#### **I.6. Les sources de pollution de l'Oued Soummam**

La pollution des eaux est variable et elle peut se manifester généralement sous plusieurs formes principales : urbaine, agricole et industrielle (agroalimentaire, textile, huileries ...). Dans le bassin versant de la Soummam, l'assainissement accuse un retard considérable, et le traitement des eaux usées est loin d'être satisfaisant [2]. Le déversement de ces rejets à ciel ouvert vers l'Oued Soummam, menaçant ainsi la pollution du littoral de la ville de Bejaia, ainsi que la qualité des sources et des champs captant destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) de la population.

Ce n'est qu'au mois de janvier 2024 qu'une station d'épuration des eaux usées urbaines (STEP) à Sid-Aich a été mise en fonctionnement. D'autres STEP sont attendues à Akbou et à Tazmalt.

### **I.7. Etude morphométrique du sous bassin de la région d'étude**

Le bassin versant de la basse Soummam s'appuie sur divers paramètres qui jouent un rôle très important dans l'aspect hydrologique, tel que le relief, la forme, l'altitude, la pente, ...

#### **I.7.1. La surface (A)**

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont être en partie reliés à sa surface. La surface du bassin versant peut-être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciels ArcGis, Global Mapper, MapInfo ...). La surface du sous bassin versant de l'Oued Soummam est de 1058.64 km<sup>2</sup>.

#### **I.7.2. Le périmètre (P)**

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en *km*. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre du sous bassin d'étude est de 192.08 km.

#### **I.7.3. La forme**

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

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

Avec

$K_G$  : Indice de compacité de *Gravelius*

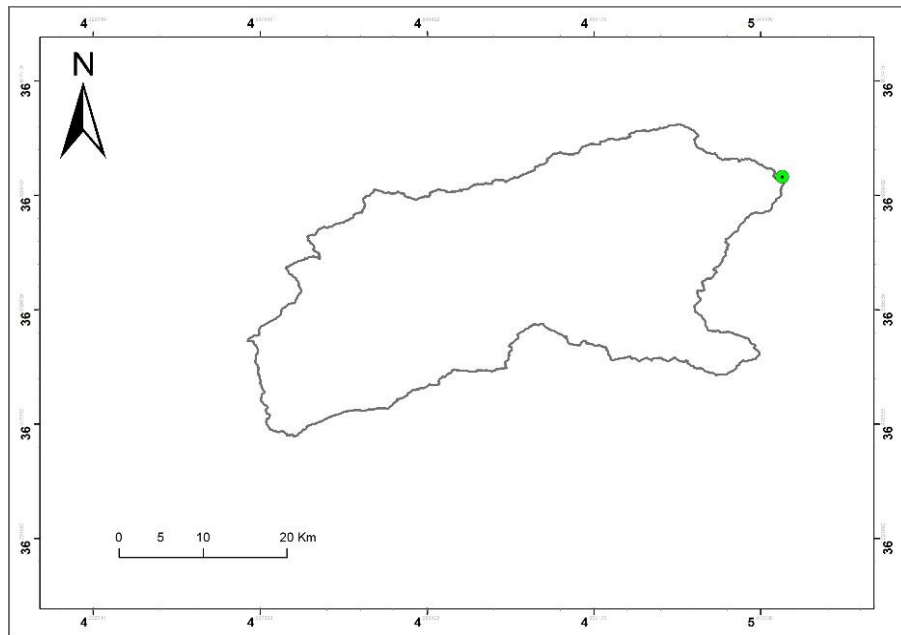
$P$  : Périmètre de sous bassin versant en (km)

$A$  : surface de sous bassin en (km<sup>2</sup>)

- 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,  $A = 1058.6582 \text{ km}^2$  ;  $P = 192.08 \text{ km}$ .

$K_G = 1.65 \Rightarrow$  Notre bassin versant est de forme allongée (Fig. I.2).



**Figure I.2 : Forme allongée du sous bassin Oued Soummam**

#### ***1.7.4. Le rectangle équivalent***

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

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

$$A = L_r * l_r$$

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

Avec :

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

Les formules empiriques :

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

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

Les dimensions du rectangle équivalent sont :

$$L_r = 72.9546 \text{ km} ; \quad l_r = 22.2471 \text{ km}$$

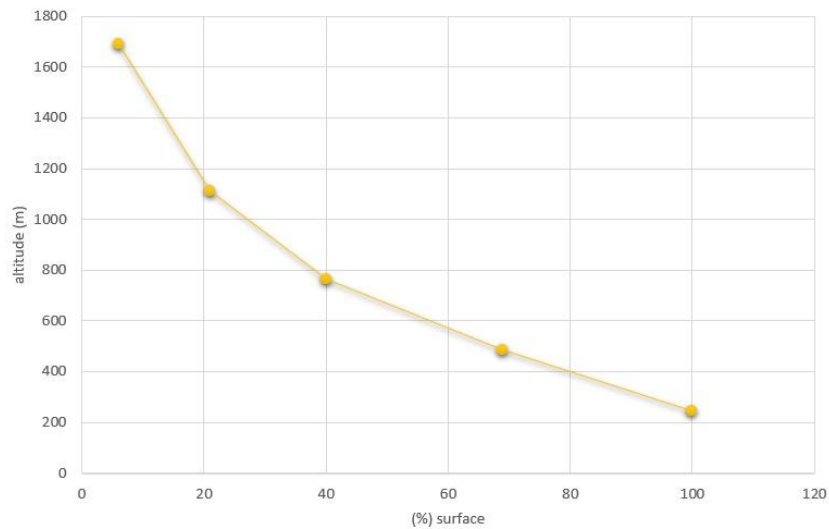
### I.7.5. Altimétrie et courbe hypsométrique

Le relief influe sur l'écoulement par divers paramètres hydrométéorologiques variant avec l'altitude (précipitations, température,...) et la morphologie du bassin. Par ailleurs, la pente influe sur la vitesse d'écoulement [7].

Les fréquences altimétriques sont représentées par la courbe hypsométrique et celle des altitudes (Figs. I.3 et I.4).

La courbe hypsométrique est la répartition de la surface du bassin versant ou le pourcentage de surface en fonction de son altitude. Elle est tracée à partir du cumul de l'histogramme d'altitudes. Cette courbe permet de faire des recherches sur le niveau de maturité d'un cours d'eau.

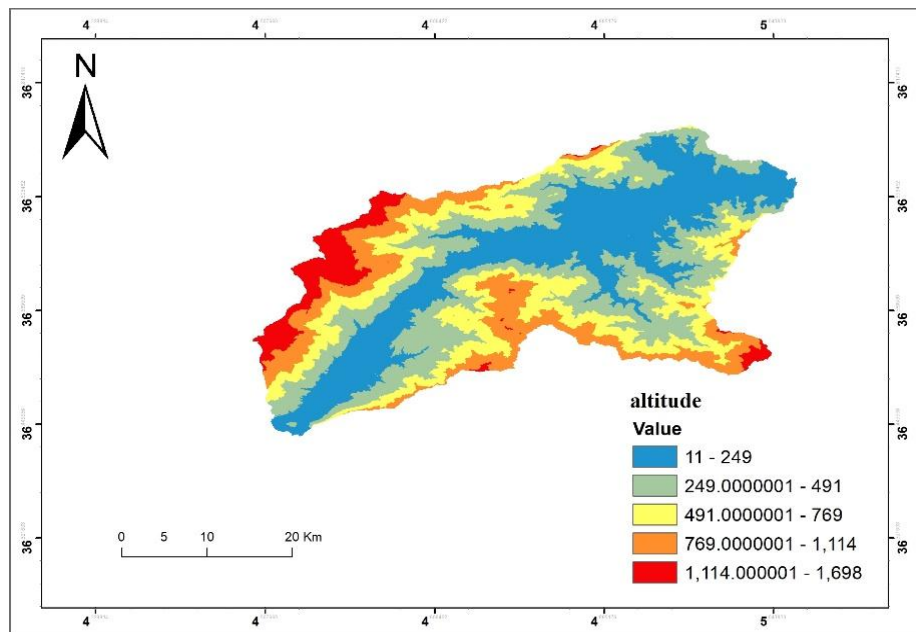
Son but est de comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elle permet aussi de calculer l'altitude moyenne, l'altitude la plus fréquente et l'indice de pente global du bassin [8].



**Figure I.3: Courbe hypsométrique du sous bassin Oued Soummam**

D'après la courbe hypsométrique, on distingue trois zones :

- La première zone avec une pente relativement forte due aux reliefs.
- La deuxième zone avec une pente douce due aux piémonts.
- La troisième zone à faible pente relative à la dépression.



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

Cette représentation montre que la classe d'altitude la plus élevée (1114 - 1698 m) ne représente que 63.4251 km<sup>2</sup>, soit environ 5.9911% de la surface totale du bassin. 30.7634 % de la surface du bassin se trouve entre 11 et 249 m d'altitude, 28.2301 % entre 249 et 491 m, 20.3185 % entre 491 et 769 m d'altitude, 14.6966 % entre 769m et 1114 m.

#### ***1.7.6. Caractéristiques des altitudes***

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

$$H_{\min} = 11 \text{ m}$$

$$H_{\max} = 1698 \text{ m}$$

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

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

Avec,

$H_i$  : Altitude moyenne de chaque classe (m)

$A_i$  : Surface partielle des tranches d'altitude (km<sup>2</sup>)

$A_t$  : Surface totale sous bassin (km<sup>2</sup>).

$$\Rightarrow H_{\text{moy}} = 530.1964 \text{ m}$$

#### ***1.7.7. Indice de pente***

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

**I.7.7.1. Indice de pente globale ( $I_g$ )**

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

$$I_g = D / L_r$$

Avec :

**D** : Dénivelée simple (m) ; **L<sub>r</sub>** : Longueur du rectangle équivalent (km).

A partir de la courbe hypsométrique, on obtient :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1720 - 260 = 1460 \text{ m}$$

$$I_g = 0.02001$$

$I_g < 0.002$ .....	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
<b><math>0.020 &lt; I_g &lt; 0.050</math></b> .....	<b>Relief assez fort</b>

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.

**I.7.7.2. Dénivelée spécifique ( $D_s$ )**

La dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief suivant la classification d'ORSTOM (Tableau I.3). 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 ( $D_s$ ).

$$D_s = I_g * [A]^{1/2} \Rightarrow D_s = 651.14 \text{ m}$$

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

Tableau I.3 : Classification de l'ORSTOM

R1	Relief très faible	$05 < D_s < 10$ m
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25$ m
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$ m
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100$ m
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$ m
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500$ m
<b>R7</b>	<b>Relief très fort</b>	<b><math>500 &lt; D_s &lt; 750</math> m</b>

Le bassin versant étudié présente la carte des pentes ci-après.

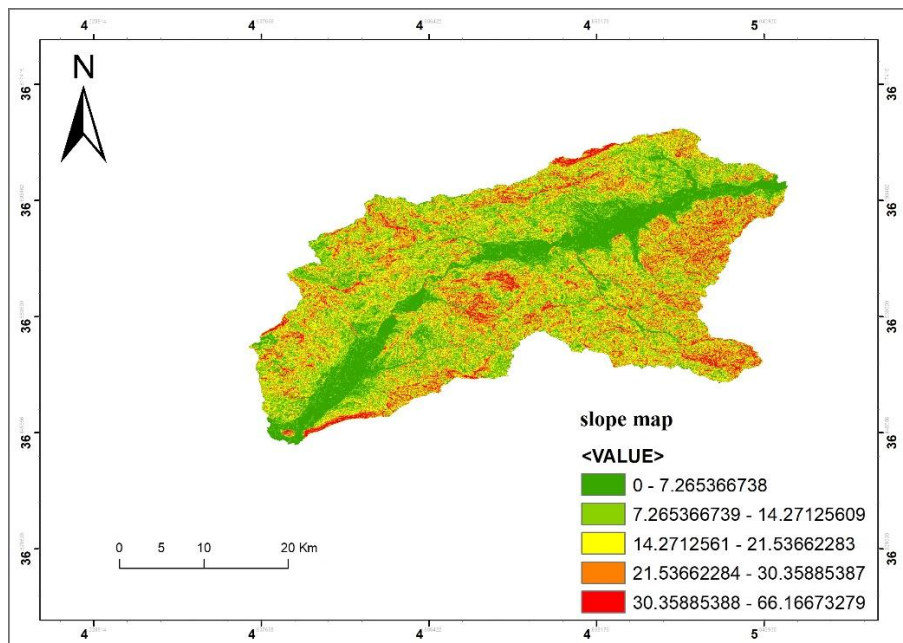


Figure I.5: Carte des pentes du sous bassin (°)

### I.8. Les caractéristiques du réseau hydrographique

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

Le réseau hydrographique du sous bassin Oued Soummam tracé par le logiciel ArcGis est marqué par cinq Oueds principaux : Oued Sahel, Oued Boussellam, Oued Soummam, Oued El Kseur et Oued Amizour (Fig. I.6).

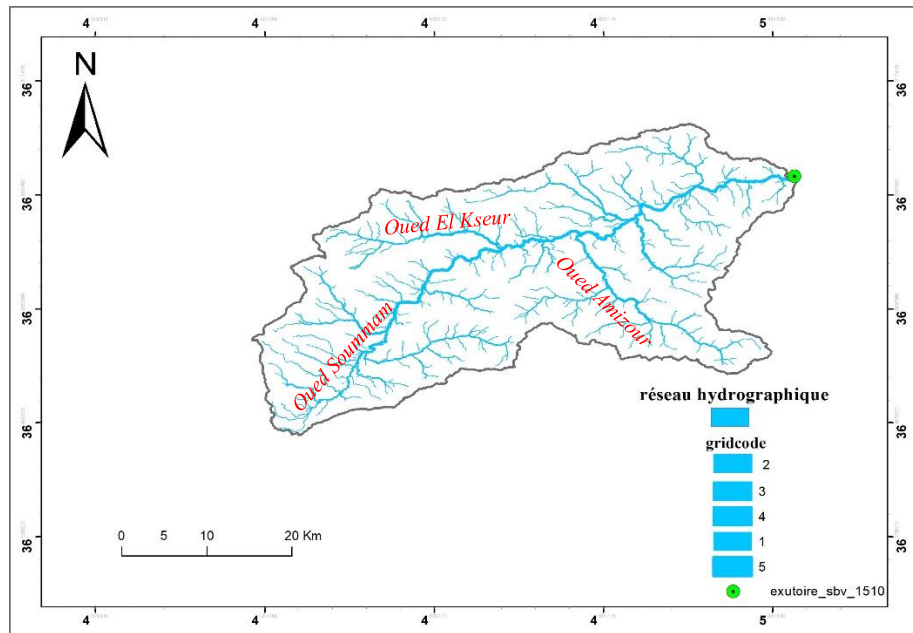


Figure I.6 : Réseau hydrographique du sous bassin Oued Soummam

### I.8.1. Densité de drainage ( $D_d$ )

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

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

Où :

$$L_i : \text{Longueur des talwegs en km} \quad \Rightarrow \quad D_d = \mathbf{0.8236} \quad (\text{km/km}^2).$$

### I.8.2. Temps de concentration ( $T_c$ )

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

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

Où,  $L_p$  : Longueur du talweg principal (km).

$$\Rightarrow T_c = \mathbf{12.01 \text{ h}}$$

**I.8.3. Vitesse d'écoulement de l'eau ( $v_e$ )**

Elle est donnée par l'expression suivante.

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

$$v_e = 1.33 \text{ m/s}$$

**I.8.4. Densité hydrographique ( $F$ )**

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

Elle est donnée par la relation:

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

$N_i$  : nombre de cours d'eau = 1187

$$\Rightarrow F = 1.121 \text{ km}^{-2}$$

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales du bassin versant Oued Soummam.

**Tableau I.4: Principales caractéristiques morphométriques du bassin étudié**

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Aire	A	km <sup>2</sup>	1058.65
Périmètre	P	km	192.08
Indice de compacité	$K_G$	/	1.65
Altitude maximale	$H_{\max}$	m	1698
Altitude minimale	$H_{\min}$	m	11
Altitude moyenne	$H_{\text{moy}}$	m	530.19
Indice de pente globale	$I_g$	%	0.02
Largeur du rectangle équivalent	$l_r$	km	22.24
Longueur du rectangle équivalent	$L_r$	km	72.95
Dénivelée	D	m	1460
Dénivelée spécifique	$D_s$	m	651.14
Altitude à 5%	$H_{5\%}$	m	1720
Altitude à 95%	$H_{95\%}$	m	260
Densité de drainage totale	$D_d$	km/km <sup>2</sup>	0.82
Temps de concentration	$T_c$	heures	12.01
Densité hydrographique	F	1/km <sup>2</sup>	1.12
Vitesse d'écoulement de l'eau	$v_e$	m/s	1.33

**I.9. Conclusion partielle**

Dans ce chapitre nous avons présenté notre zone d'étude qui est caractérisée par un climat sud-méditerranéen. Elle est considérée comme la région la plus arrosée en Algérie et elle présente des zones montagneuses et des terrains plats.

Nous avons évoqué aussi quelques sources de pollutions urbaines, agricoles et industrielles sans traitement préalable qui peuvent nuire à la qualité des eaux des champs captant destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) de la population.

L'étude morphométrique du sous bassin versant nous a permis de dire qu'il présente une forme allongée et très irrégulière avec un relief assez fort. Le réseau hydrographique est très développé contenant trois grandes rivières, à savoir, le Sahel, affluent venant du Nord-Ouest, le Boussellam venant du Sud-Est et la Soummam qui se forme à Akbou à la confluence du Sahel et du Boussellam et coule directement du Nord-Est vers la mer.

# **Chapitre II**

*Contexte géologique et hydrogéologique*

## Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique

### II.1. Introduction

L'étude géologique et hydrogéologique est très importante pour l'identification des gisements d'eau souterraine. Elle 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 [2].

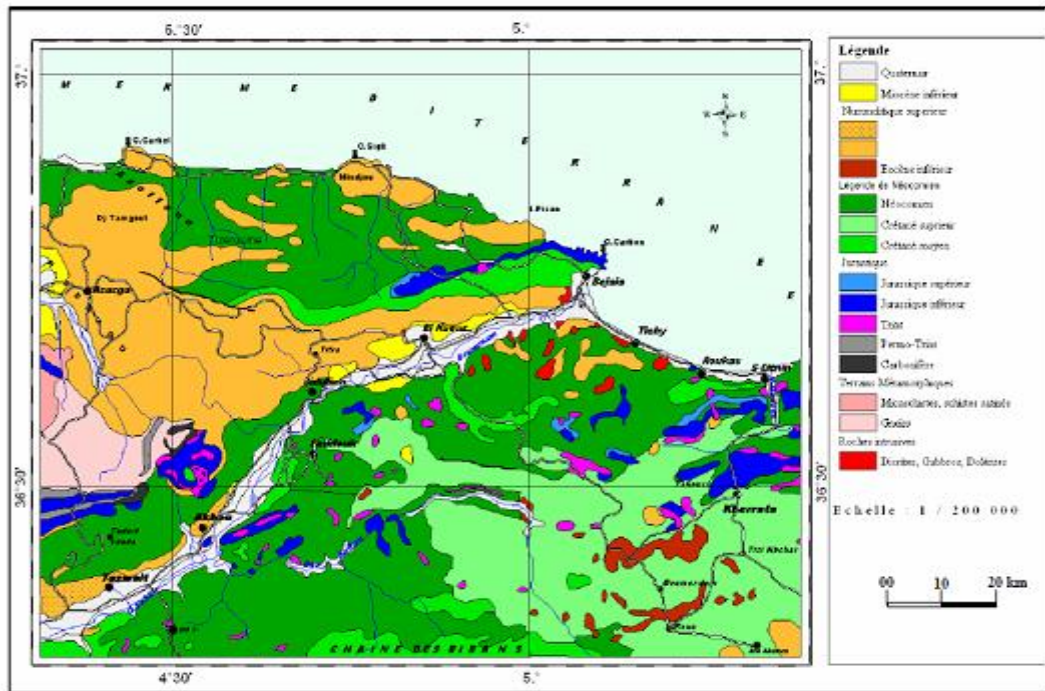
### II.2. Aperçu géologique de la zone d'étude

Comme le reste du domaine tellien, la vallée de la Soummam a connu une intense activité géologique tout au long de l'Orogène Alpin. Toutefois, cette activité diffère notablement selon qu'il s'agisse des chaînes montagneuses ou de la plaine alluviale. Elle se situe entre les massifs intermédiaires de la grande et petite Kabylie constitués d'anciennes roches métamorphiques. Les dépôts mésozoïque et cénozoïque participent à la construction géologique de la région qui se trouve à l'état d'une tectonique plissante et disjonctive des plus complexes. La région est formée d'unités structurales comprenant un socle cristallophyllien affleurant dans la région de Bouhatem (Schistes à séricite, Quartzites, Cipolins et pegmatites) et des formations sédimentaires composées du Jurassique, de flysch crétacés et tertiaires respectivement massylliens, mauritaniens et numidiens, du Miocène et du Plio-Quaternaire [9].

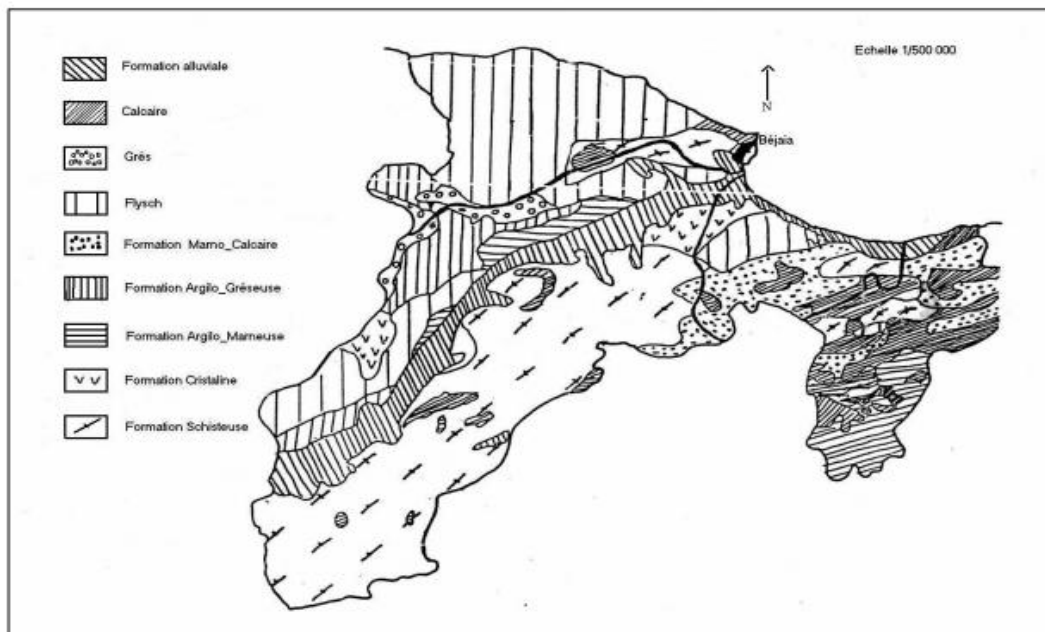
Le bassin versant de la vallée de la Soummam est dans ses grandes lignes constitué :

- Sur la rive gauche, par de l'Oligocène traversé par des formations du Crétacé inférieur, du Miocène apparaît dans la partie aval, en bordure de l'Oued.
- Des terrasses alluviales importantes tapissent en général le pied des pentes sauf dans la région de Sidi-Aich où le Crétacé apparaît jusqu'au lit sur la rive droite. Il est en majeure partie formé de Crétacé inférieur moyen et supérieur (Fig. II.1). Les terrasses alluviales sont beaucoup plus restreintes.

Les terrains rencontrés sont généralement imperméables : argilogrès de l'oligocène, schistes de l'alboaptien, marno-calcaires du crétacé (Fig. II.2).



**Figure II.1 : Carte géologique de la vallée de la Soummam**  
 (Extraite de la carte géologique Nord Constantine de 1/200000)



**Figure II.2 : Carte hydrogéologique de la Willaya de Béjaia [10]**

### II.3. Litho-stratigraphie

La description lithostratigraphique de la région de la vallée de la Soummam selon l'ordre chronologique est la suivante [9].

#### II.3.1. Socle et couverture

On trouve :

- quartz blanc verdâtre et filons de quartz blanc d'âge anté-Silurien.

- une dizaine de mètres de conglomérats et éléments de calcaire et de quartz du Siluro-Dévonien.
- marnes micacées en intercalation avec des lits de grès calcaireux micacés et de conglomérats à éléments centimétriques, sur une quinzaine de mètres.
- marnes micacées et grès sur plusieurs mètres.
- des niveaux noirs de silexites sur plusieurs mètres.
- plusieurs mètres de calcaires marneux gris micacés se terminant par des lentilles de grès.
- argiles grises indurées en intercalation avec des bancs métriques de grès assez grossiers de faciès voisin de celui des grès numidiens, le tout sur une vingtaine de mètres.
- des marnes jaunes.

On rencontre aussi des filons de dix à vingt mètres de pegmatites d'orientation sensiblement Est-Ouest mais aussi des schistes, des gneiss et des marbres.

### ***II.3.2. Trias***

On distingue deux faciès [9]:

- 1) **Tellien gypso-salin et à argiles versicolores** : N'affleurant jamais en surface, il souligne les contacts de base des charriages des unités épitelliennes inférieure et supérieure, des klippes et des lentilles re-sédimentées dans des formations plus récentes.
- 2) **Alpin grésodolomitique**. Ce faciès est plus rare que le précédent et n'est reconnu que dans le massif de Chellata, dans la partie occidentale de la vallée de la Soummam.

### ***II.3.3. Jurassique***

#### **a) Lias inférieur**

À la base on retrouve des dolomies plus ou moins stratifiées, recristallisées le plus souvent et de couleur rouge violacé sur lesquelles reposent des calcaires massifs, parfois dolomités et localement oolitiques.

#### **b) Lias moyen**

Formé de calcaires stratifiés à silex, parfois alternant avec des argiles ou des marnes, sur lesquels repose un niveau de conglomérats.

#### **c) Lias supérieur**

Essentiellement marno-calcaire, il est formé de trois séries. La série de base, la plus puissante, est constituée de bancs de calcaires à tests de Lamellibranches avec des intercalations de marnes de couleur rouge. Des bancs calcaires et des argiles à Radiolaires composent la série intermédiaire. Enfin, la série supérieure est formée par des calcaires en bancs à patine jaune et des marnes de couleur rouge. Cette dernière série est très indurée du fait qu'elle soit localement silicifiée.

### II.3.4. Crétacé

Il comporte deux faciès [9]:

- 1) **tellien** : représenté par les unités épitelliennes (Brek-Gouraya, Bouhamza et Barbacha).
- 2) **de type flysch** : représenté par les flysch massylien pour l'essentiel.

#### a) Crétacé tellien

Le Crétacé inférieur comporte deux séries. La première commence par des conglomérats de base à éléments du Jurassique sur lesquels repose une alternance marno-calcaire ; la série est du Nèocomien. La deuxième est constituée d'un conglomérat contenu dans des pélites noires de l'Albien. Le Crétacé supérieur quant à lui est formé par des micro-brèches et des argiles du Cénomano-Turonien à la base et des micro-brèches et des marnes du Campanien au sommet.

#### b) Crétacé de type flysch

Il affleure sur le versant qui borde la rive gauche de la vallée la Soummam et repose sur les séries du Crétacé tellien. Il comporte cinq termes et de la base au sommet on retrouve des :

- grès pélitiques d'âge Aptien-Albien inférieur.
- calcaires gréseux en bancs, quartzites, micro-brèches et pélites sombres daté du Vraconien-Cénomaniens.
- niveaux à phtanites noires du Turonien.
- marnes en intercalation avec des calcaires gréseux et quelques niveaux de micro-brèches.

Le tout étant du Sénonien.

### II.3.5. Oligocène

L'Oligocène présente deux faciès:

- 1) l'Oligo-Miocène Kabyle (OMK)
- 2) le flysch numidien.

**L'Oligo-Miocène Kabyle** affleure au niveau des massifs de Chellata et de Bouhatem et est constitué de conglomérats et de calcaires et marnes gréseux. Le flysch numidien affleure largement de part et d'autre de la vallée de la Soummam. Il est constitué d'argiles dites "argiles sous-numidiennes" contenant de rares bancs de quartzites ou de marnes schisteuses de l'Oligocène supérieur ; de grès grossiers à intercalations de pélites noires de l'Aquitaniens et au sommet de la série nous retrouvons des argiles noires à niveaux de silexites de l'Aquitano-Burdigaliens. Ce dernier terme affleure sur la rive gauche de la Soummam mais constitue, aussi, l'encaissant du massif éruptif d'Amizour.

### II.3.6. Miocène

Le Miocène de la Soummam est post-nappes ; il est formé par :

- **les formations sédimentaires bordant la plaine**, dans lesquelles on distingue deux faciès :

- un faciès marin comportant des conglomérats de base et des marnes grises.
- un faciès continental gréseux se terminant par des niveaux de micro brèches et de micro conglomérats en alternance avec des niveaux de marnes gréseuses du Burdigalien.
- **les formations magmatiques** : on y distingue :
  - un terme plutonique constitué de quartz monzonite, de granodiorite, de micro granodiorite, de microgranites et de diorites formant de véritables dômes dans leur encaissant numidien autour desquels s'observent auréoles métamorphiques ;
  - un terme volcanique constitué de tufs andésitiques stratifiés de 400 m de puissance, d'andésites et de rhyolites.

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 Bejaia.

### II.3.7. Pliocène

Il est argilo-marneux en bordure de la vallée de la Soummam et bréchique au pied du Djebel Gouraya.

### II.3.8. Quaternaire

Les formations quaternaires sont [9]:

- les alluvions de l'Oued Soummam et les cônes de déjection de ses affluents.
- les éboulis et brèches de pentes consolidées.

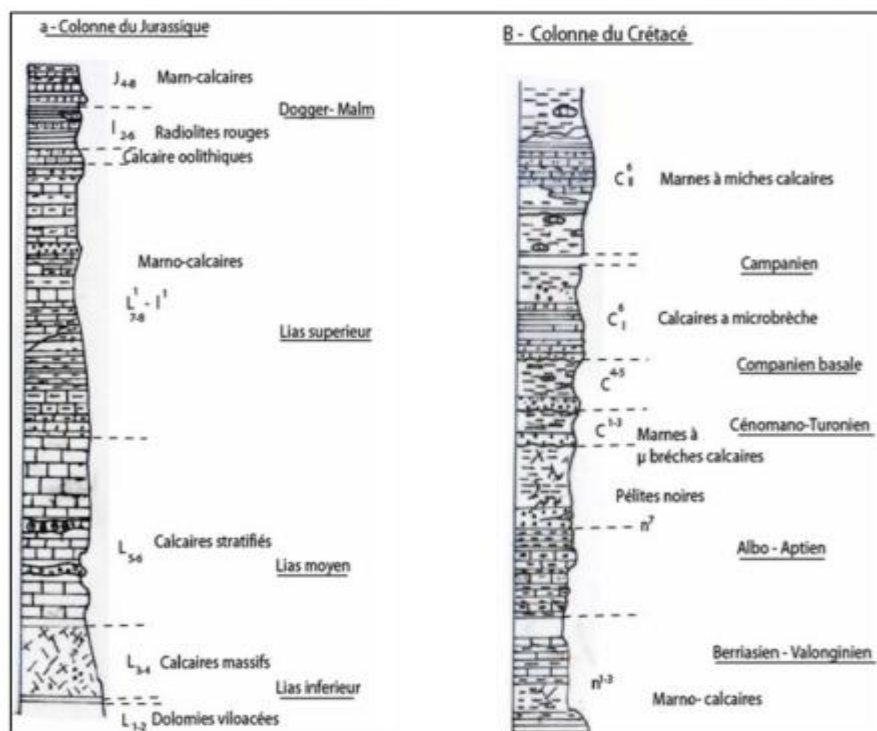


Figure II.3 : Colonne stratigraphique synthétique d'unités de Gouraya-Aghbalou

#### II.4. Pédologie

Selon plusieurs études menées sur les sols de la vallée de la Soummam d'Akbou à Béjaia, il existe deux groupes principaux [9].

- Les sols minéraux bruts d'érosion appelés aussi lithosols, qui sont d'une superficie très réduite où la roche mère est dure et mise à nu par l'érosion.
- Les sols minéraux, d'apport alluvial, occupent le lit majeur de l'Oued Soummam et ses affluents. Ceux-ci sont des sols constitués de sables, graviers, amenés par les cours d'eau.

#### II.5. Aperçu hydrogéologique

L'étude hydrogéologique de la vallée de la basse Soummam passe par la description lithologique et tectonique, *in-situ* et à partir des cartes géologiques, des différentes formations géologiques s'étendant sur les zones d'étude. Ceci permet d'apprécier et de synthétiser les caractéristiques essentielles des principales formations hydrogéologiques rencontrées. A partir des cartes géologiques, la région de Bejaia se situe dans un contexte, tant géologique qu'hydrogéologique, favorable à la formation de nappes d'eau souterraines. La structure du réservoir a été mise en évidence par la prospection géophysique réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) en 1970 et complétée par les sondages effectués dans la plaine alluviale [9,11].

Les principales formations hydrogéologiques appartenant à la région d'étude sont :

- **les formations calcaires jurassiques** qui sont des formations calcaires karstiques présentes à travers les monts Aghbalou – Gouraya et Timezrit. Ces formations, à porosité de fracture (failles et diaclases), dont la lithologie est marquée par la présence de masses calcaires et dolomitiques, est susceptible de constituer d'immenses réservoirs d'eau souterraine où la circulation de l'eau est rapide et à fort débit. Le fait que ces terrains soient fortement karstifiés et entrecoupés par de nombreuses failles, des sources d'eaux souterraines, appelées résurgences, apparaissent en surface à la faveur de ces fractures. Le débit de ces sources est, pour certaines d'entre elles, irrégulier au cours de l'année et dépend de l'intensité des précipitations, cela va jusqu'au tarissement dans quelques cas. Pour d'autres sources, il est de l'ordre de 10 L/s ou plus, c'est le cas de la source de Toudja.
- **les formations des grés numidiens** qui présentent une grande extension géographique et une granulométrie grossière favorable à l'infiltration des eaux pluviales et de fonte des neiges. Localement, ils jouent un rôle dans la constitution des nappes de la zone littorale du massif d'Akfadou. Ces formations développent et forment tout le massif compris entre la vallée du haut Sébaou et le cours inférieur de la Soummam. Les derniers lambeaux de ces grès s'abaissent jusqu'au niveau de la mer au cap Sigli, et à l'Est jusqu' à l'embouchure de la Soummam. Ils sont aussi visibles au sud de Oued Ghir et du massif de Boudrahem, apparaissant au contact, tantôt des flysch crétacés et tertiaires, tantôt des formations crétacés

à faciès tellien. Les grès numidiens du massif d'Akfadou alimentent de nombreuses sources de faibles débits car les marnes inter stratifiées empêchent la création de grands réservoirs d'eau.

- **les formations post-nappes** qui sont formées par :

- les sédiments miocènes discordant sur les unités telliennes et de flysch (*Miocène marin dans la région de Sidi-Aich, et Miocène continental dans la région d'Akbou*).
- les épanchements volcaniques sous-marins néogènes d'Amizour et du Sud de la ville de Béjaia, en rive droite de la vallée de la Soummam.
- les formations pliocènes représentées par des argiles marneuses et des brèches.
- les formations quaternaires représentées par les alluvions de la Soummam.
- les cônes de déjection de ses principaux affluents, les éboulis et brèches de pentes consolidés.

## II.6. Les eaux souterraines

La nappe principale, actuellement en exploitation sur la vallée de la Soummam, est celle des alluvions quaternaires. Sous les alluvions se trouvent les niveaux conglomératiques du Miocène qui constituent les formations aquifères.

Au niveau du Sahel-Soummam (en amont de Sidi-Aich), les alluvions quaternaires et le Miocène conglomératique semblent constituer un aquifère unique, et au niveau de la basse Soummam, les deux formations sont séparées par un niveau argileux [11].

L'alimentation de la nappe en période des hautes eaux est assurée par les précipitations, les écoulements directs sur les alluvions, et par ses affluents. En période d'étiage, la recharge continue à être assurée par le faible écoulement de l'Oued et les affluents de la rive gauche.

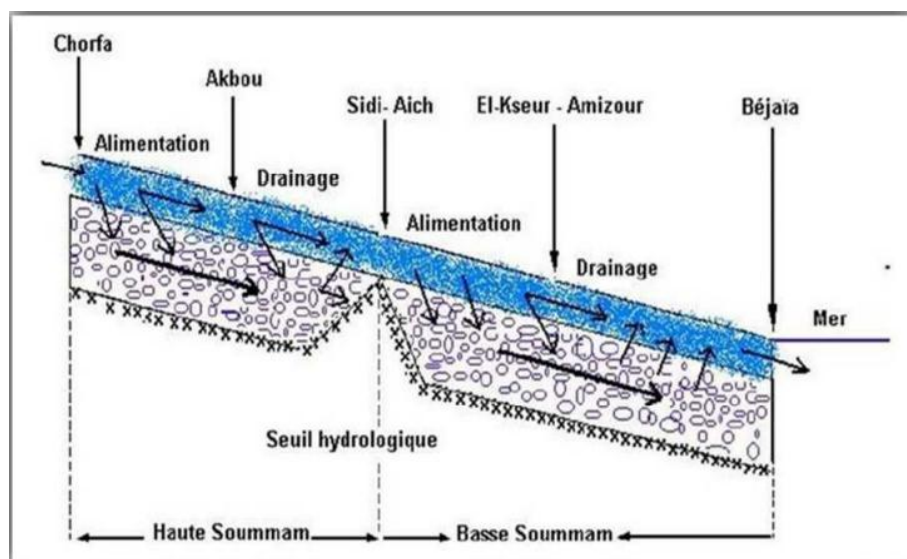


Figure II.4 : Relation hydraulique nappe-Oued d'après le jaugeage différentiel

## II.7. Paramètre de qualité des eaux

### II.7.1. Paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques correspondent à l'évaluation de la qualité d'un produit, notamment l'eau, à l'aide des sens humains, principalement la couleur, l'odorat et le goût [12].

#### a) La couleur

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

#### b) L'odeur

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

#### c) Le goût

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

### II.7.2. Paramètres physicochimiques [12]

#### a) Température

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

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

#### b) pH

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

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

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

**c) Minéralisation**

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

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

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

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

$$\text{SAF} = [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$$

**e) Ions majeurs**

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

- les **cations** : Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et Potassium ( $\text{K}^+$ )
- les **anions** : Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ).

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

**g) La dureté**

La dureté d'une eau est déterminée par la présence d'ion calcium et magnésium. Lorsque ces deux ions sont présents en forte concentration, l'eau est dite dure. Dans le cas contraire, elle est dite douce. Lorsque une eau dure en chauffée, on observe l'apparition d'un précipité : il s'agit du tartre ou calcaire [12].

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

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

On distingue :

- **La dureté totale ou le titre hydrotimétrique (TH)**: correspond à la somme des concentrations en  $[\text{Ca}^{2+}]$  et  $[\text{Mg}^{2+}]$ .
- **La dureté calcique ( $\text{D}_{\text{Ca}}$ )**: correspond à la teneur globale en ions  $\text{Ca}^{2+}$ .
- **La dureté magnésienne ( $\text{D}_{\text{Mg}}$ )**: correspond à la teneur en ions  $\text{Mg}^{2+}$ .
- **La dureté carbonatée ou le titre alcalimétrique complet (TAC)**: c'est la somme des alcalinités carbonatée et bicarbonatée.

- **La dureté permanente (P)**: c'est la dureté qui persiste après ébullition prolongée de l'eau, elle est égale à (TH – TAC) et correspond à l'association des ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  avec les anions  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  ou  $NO_3^-$ .
- **La dureté temporaire (Dt)**: elle est égale à (TH – P) et correspond à la combinaison des ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  avec les ions  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$  et  $OH^-$ . Cette dureté est éliminée par ébullition de l'eau.

On utilise la classification suivante :

TH (°F)	0 – 7.5	7.5 - 15	15 - 30	30 – 50	> 50
Eau	Très douce	douce	Moyennement dure	dure	Très dure

### h) L'alcalinité

L'alcalinité (basicité) d'une eau peut être définie comme la capacité des milieux aqueux à réagir avec les ions  $H_3O^+$ . Elle est due à la présence des ions bicarbonates (hydrogénocarbonates)  $HCO_3^-$ , carbonates  $CO_3^{2-}$  et hydroxydes  $OH^-$  [12].

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

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

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

### II.7.3. Indicateurs biologiques

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

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

- Escherichia coli.
- Streptocoques fécaux.
- Clostridium sulfitoréducteurs.

### II.7.4. Normes de potabilisation

Le tableau ci-après nous résume les normes algériennes de potabilisation des eaux de consommation humaine [12].

Tableau II.2 : Normes Algériennes de potabilisation (*Journal officiel N° 34 – 19 juin 2011*)

Paramètre	Valeur limite	
<b>A. Paramètres organoleptiques</b>	/	
- Couleur	20 mg (Co-Pt)/L	
- Turbidité	5 NTU	
- Odeur et Saveur	absence	
<b>B. Paramètres physico-chimiques</b>	/	
- Température .....	25 °C	
- pH .....	6.5 à 8.5	
- Conductivité .....	2800 µS/cm à 23 °C	
- Chlorures Cl <sup>-</sup> .....	200 mg /L	
- Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> .....	200 mg /L	
- Magnésium Mg <sup>2+</sup> .....	150 mg/L	
- Sodium Na <sup>+</sup> .....	200 mg/L	
- Potassium K <sup>+</sup> .....	20 mg/L	
- Calcium Ca <sup>2+</sup> .....	200 mg/L	
- Aluminium Al <sup>3+</sup> .....	0.2 mg/L	
- Dureté totale TH .....	50 °F	
- Résidu sec à 105 °C .....	2 g/L	
- Minéralisation .....	2 g/L	
<b><u>Paramètres concernant les substances indésirables</u></b>	/	
- Nitrates NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	50 mg/L	
- Nitrite NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .....	0.1 mg/L	
- Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	0.5 mg/L	
- NTK (Kjeldahl) .....	2 mg/L	
- Matières organiques M.O .....	5 mg/L	
- Hydrogène Sulfuré H <sub>2</sub> S .....	0.02 µg/L (absence d'odeur)	
- Hydrocarbures .....	10 µg/L	
- Phénols .....	0.5 µg/L (absence)	
- Fer Fe <sup>2+</sup> .....	0.2 mg/L	
- Manganèse Mn <sup>2+</sup> .....	0.5 mg/L	
- Cuivre Cu <sup>2+</sup> .....	1 mg/L	
- Phosphate PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> .....	0.5 mg/L	
- Zinc Zn <sup>2+</sup> .....	0.05 mg/L	
- Fluor F <sup>-</sup> .....	2 mg/L	
- Argent Ag <sup>+</sup> .....	50 µg/L = 0.05 mg/L	
<b><u>Paramètres concernant les substances toxiques</u></b>	/	
- Arsenic As <sup>3+</sup> .....	50 µg/L = 0.05mg/L	
- Cadmium Cd <sup>2+</sup> .....	5 µg/L = 0.005 mg/L	
- Sélénium Se <sup>2-</sup> .....	5 µg/L = 0.005 mg/L	
- Cobalt Co <sup>3+</sup> .....	50 µg/L = 0.05 mg/L	
- Chrome hexavalent Cr <sup>+6</sup> .....	1 µg/L	
- Mercure Hg <sup>2+</sup> .....	1 µg/L	
- Nickel Ni <sup>2+</sup> .....	50 µg/L	
<b>C. Paramètres Bactériologiques</b>	/	
- Escherichia Coli .....	{ - absence dans 50 ml (eau non traitée) { - absence dans 100 ml (eau traitée)	
- Streptocoques fécaux .....		- absence dans 50 ml (eau traitée)
- Clostridium Sulfitoréducteurs .....		- absence dans 20 ml (eau non traitée)

## II.8. Caractéristiques des points d'eau étudiés

La nature chimique et la concentration des eaux souterraines dépendent en partie des propriétés des eaux de la recharge des nappes, mais surtout des processus physicochimiques qui existent dans l'aquifère. Ces processus augmentent ou diminuent la concentration des substances dissoutes dans l'eau le long de son écoulement souterrain.

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs.

Les données utilisées pour notre étude sont les moyennes des résultats des analyses effectuées sur l'eau de dix-huit (18) forages par les services de l'Algérienne Des Eaux (ADE) de la Wilaya de Béjaïa durant l'année 2023.

Leurs caractéristiques principales sont les suivantes (Tabs. II.3, II.4 et Fig. II.5).

**Tableau II.3: Inventaire et caractéristiques des points d'eau**

Nom	N°	Long. (dd)	Latit. (dd)	T (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	Turb (NTU)	TAC (°F)	TH (°F)
Béjaïa - 04 Chemins	F1	5.0626	36.7143	23	8.95	681	0.98	22.1	28.87
F1+2 Décaillet	F2	4.9176	36.6841	22.56	7.52	2753.33	0.48	22.03	81.8
F1+2 O.Ghir	F3	4.9319	36.6858	19.7	7.57	1433	0.34	22	52.8
N.F T. Larbaa	F4	4.9296	36.6876	24.6	7.41	4050	37.6	15	160
ANC. F T.Larbaa	F5	4.9279	36.688	23.33	7.97	4005.55	1.86	16.76	140
Forage Avarwaq	F6	5.0306	36.6981	17.7	7.8	1130	8.64	28.6	45
F1 ROMPO	F7	4.8521	36.6524	17.1	7.44	3620	0.524	34	85
F2 ROMPO	F8	4.8534	36.6519	20.76	7.346	4318	0.44	39.26	85.12
F Décaillet	F9	4.8551	36.6516	18.65	7.49	2545	0.46	21.5	435
F1 Timzrit	F10	4.7841	36.6395	28.5	7.43	3720	0.92	240	160
F2 Timzrit	F11	4.7883	36.6407	28.6	7.6	3710	0.95	24.6	160
F PILOTE	F12	4.8588	36.6656	18.75	7.37	5760	0.5085	42	158
F5 Aghernouz	F13	4.673	36.5879	23.2	7.75	4050	19.68	23.4	120.5
F1 BIS Remila	F14	4.7351	36.6313	31	7.3	7310	2.56	24	216
F2 BIS Maala	F15	4.6729	36.5906	25.6	7.59	3950	0.571	33	110
F2 BIS Tassift	F16	4.6783	36.5938	20.9	7.625	4225	0.7155	20.5	90.5
F6 Akbou	F17	4.5497	36.4555	22.7	7.482	1470.2	0.4354	18.42	48.7
Biziou	F18	4.6069	36.5017	20.5	7.51	18 780	2.02	60	350

**Tableau II.4: Teneurs des ions majeurs des eaux des forages étudiés**

Nom	N°	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)
Béjaïa - 04 Chemins	F1	269.62	49.27	1.43	142.35	83.2	19.39	50	1.15
F1+2 Décaillet	F2	268.67	488.66	4.77	285.66	268	35.69	108	6.8
F1+2 O.Ghir	F3	268	218	10	147.48	128	50.33	90	1.2
N.F T. Larbaa	F4	183	1002	0.63	410	384	154.9	142	8
ANC. F T.Larbaa	F5	204	921.33	7.76	385.33	336	139.11	289.55	6.06
Forage Avarwaq	F6	348.9	182.23	0.27	392.81	107.2	90.09	66	1.3

F1 ROMPO	<b>F7</b>	415	700	2.62	470.29	250	54.45	250	54.45
F2 ROMPO	<b>F8</b>	478.68	952.6	2.9	392.82	244.84	57.78	580.6	7.48
F Décaillet	<b>F9</b>	262	532.5	5.415	281.3	236	49.62	171	3.15
F1 Timzrit	<b>F10</b>	293	802	4.51	393	320	194	129	5.5
F2 Timzrit	<b>F11</b>	300	809	3.82	390	320	193.6	132	7.8
F PILOTE	<b>F12</b>	508	1360.5	5.1	495.5	312	164.5	403.5	7.35
F5 Aghernouz	<b>F13</b>	285.28	906.5	5.887	485	248.8	141.3	384.5	5.4
F1 BIS Remila	<b>F14</b>	293	1938	2.65	570	432	261.36	680	6.4
F2 BIS Maala	<b>F15</b>	402	830	4.14	474	296	87.12	400	4.7
F2 BIS Tassift	<b>F16</b>	250	910.5	3.42	322	284	47.19	613	4.35
F6 Akbou	<b>F17</b>	224.58	257.38	4.59	137.92	120.6	44.46	123.78	3.06
Biziou	<b>F18</b>	732	4199	12.82	820	800	363	2520	257.5

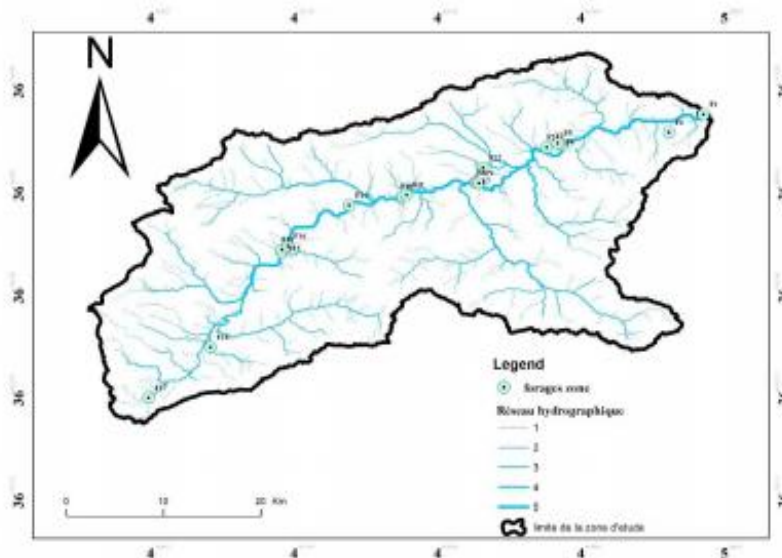


Figure II.5 : Carte de positionnement des forages étudiés

## II.9. Conclusion partielle

La détermination des différents endroits favorables à l'implantation des forages et des puits est basée sur une bonne connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie.

La vallée de la Soummam est une plaine de basses terrasses alluviales, allongée sous forme d'une étroite bande sinueuse orientée Sud-Ouest – Nord-Est de Tazmalt à Bejaia. Elle constitue une limite méridionale du Tell algérien.

La couverture alluviale de la vallée de la Soummam paraît largement épaisse. Déposée sous forme de terrasses Mio-plio-quadernaires superposées l'une sur l'autre, elle constitue, de sa lithologie formée essentiellement d'alluvions grossières: sables, galets, graviers du Miocène, sus-jacentes à un substratum marneux miocène, argileux oligocène, et même parfois crétacé plus ou moins profond, et de par sa porosité d'interstice un réservoir considérable pour l'emmagasinement de l'eau.

# **Chapitre III**

## ***Etude hydrochimique des eaux***

## Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

### III.1. Introduction

L'étude hydrochimique des eaux souterraines nous offre beaucoup d'informations utiles pour comprendre les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères. Cela signifie des échanges potentiels entre l'eau et les roches, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition d'éléments chimiques par dissolution et altération des minéraux dans le réservoir. Cette étude permet également de suivre le développement spatial de divers éléments dissous, d'estimer leur source, d'estimer la profondeur de circulation de l'eau et d'évaluer la qualité de l'eau en relation avec l'eau potable et l'irrigation [2,9,10].

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" 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. L'analyse multivariée pour déterminer la qualité des eaux a été menée par des méthodes d'analyse statistique, telles que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle de Correspondance (AFC).

Dans ce travail, nous avons procédé à l'étude des résultats d'analyses physicochimiques enregistrés durant l'année 2023 au niveau de dix-huit (18) forages situés à Bejaia-Ouest.

### III.2. Potabilité des eaux

L'appréciation de la qualité des eaux de la zone étudiée se fait à partir des normes de qualité, basées sur les paramètres physicochimiques, bactériologiques et organoleptiques [12-14]. A chaque paramètre est affecté une valeur guide ou idéale et une valeur maximale admissible (CMA). Dans ce travail, seule la potabilité de point de vue physicochimique a été prise comme critère de potabilité tout en se référant aux normes algériennes (Tableau III.1).

**Tableau III.1 : Potabilité des eaux souterraines de la zone d'étude**

Forage	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	TH (°F)	Remarque
Norme	200	150	200	20	200	-	50	200	50	Potable
F1	83.2	19.39	50	1.15	49.27	269.62	1.43	142.35	28.87	Potable
F2	268	35.69	108	6.8	488.66	268.67	4.77	285.66	81.52	Médiocre
F3	128	50.33	90	1.2	218	268	10	147.48	52.63	Moyenne
F4	384	154.9	142	8	1002	183	0.63	410	159.51	Mauvaise
F5	336	139.11	289.55	6.06	921.33	204	7.76	385.33	141.04	Mauvaise

F6	107.2	90.09	66	1.3	182.23	348.9	0.27	<b>392.81</b>	<b>63.81</b>	Moyenne
F7	<b>250</b>	54.45	<b>250</b>	54.45	<b>700</b>	415	2.62	<b>470.29</b>	<b>84.75</b>	Mauvaise
F8	<b>244.84</b>	57.78	<b>580.6</b>	7.48	<b>952.6</b>	478.68	2.9	<b>392.82</b>	<b>84.84</b>	Mauvaise
F9	<b>236</b>	49.62	171	3.15	<b>532.5</b>	262	5.415	<b>281.3</b>	<b>79.27</b>	Mauvaise
F10	<b>320</b>	<b>194</b>	129	5.5	<b>802</b>	293	4.51	<b>393</b>	<b>159.64</b>	Mauvaise
F11	<b>320</b>	<b>193.6</b>	132	7.8	<b>809</b>	300	3.82	<b>390</b>	<b>159.47</b>	Mauvaise
F12	<b>312</b>	<b>164.5</b>	403.5	7.35	<b>1360.5</b>	508	5.1	<b>495.5</b>	<b>145.50</b>	Mauvaise
F13	<b>248.8</b>	141.3	<b>384.5</b>	5.4	<b>906.5</b>	285.28	5.887	<b>485</b>	<b>120.19</b>	Mauvaise
F14	<b>432</b>	<b>261.36</b>	<b>680</b>	6.4	<b>1938</b>	293	2.65	<b>570</b>	<b>215.29</b>	Mauvaise
F15	<b>296</b>	87.12	<b>400</b>	4.7	<b>830</b>	402	4.14	<b>474</b>	<b>109.67</b>	Médiocre
F16	<b>284</b>	47.19	<b>613</b>	4.35	<b>910.5</b>	250	3.42	<b>322</b>	<b>90.24</b>	Médiocre
F17	120.6	44.46	123.78	3.06	<b>257.38</b>	224.58	4.59	137.92	48.37	Moyenne
F18	<b>800</b>	<b>363</b>	<b>2520</b>	<b>257.5</b>	<b>4199</b>	732	12.82	<b>820</b>	<b>348.88</b>	Mauvaise

### III.3. Calcul de la balance ionique

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

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

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

Cette relation permet de définir trois classes [15,16].

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

Le calcul de cet indice (Tableau III.2) nous a donné les résultats suivants.

**Tableau III.2 : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude**

N°	Somme des cations (méq/L)	somme des anions (méq/L)	Balance ionique BI (%)	Fiabilité des analyses
F1	7.9785	8.7954	4.8657	Excellente
F2	21.2398	24.2109	6.5267	Acceptable
F3	14.5372	13.7735	2.7001	Excellente
F4	38.4822	39.8081	1.6868	Excellente
F5	41.1331	37.4783	4.6538	Excellente
F6	15.7696	19.0395	9.3913	Acceptable
F7	29.2683	36.3792	10.7729	Douteuse
F8	42.4875	42.9409	0.5250	Excellente
F9	23.4485	25.2579	3.7105	Excellente
F10	37.9129	35.6784	3.0409	Excellente
F11	38.0675	35.9171	2.9131	Excellente
F12	47.0356	57.1003	9.6600	Acceptable

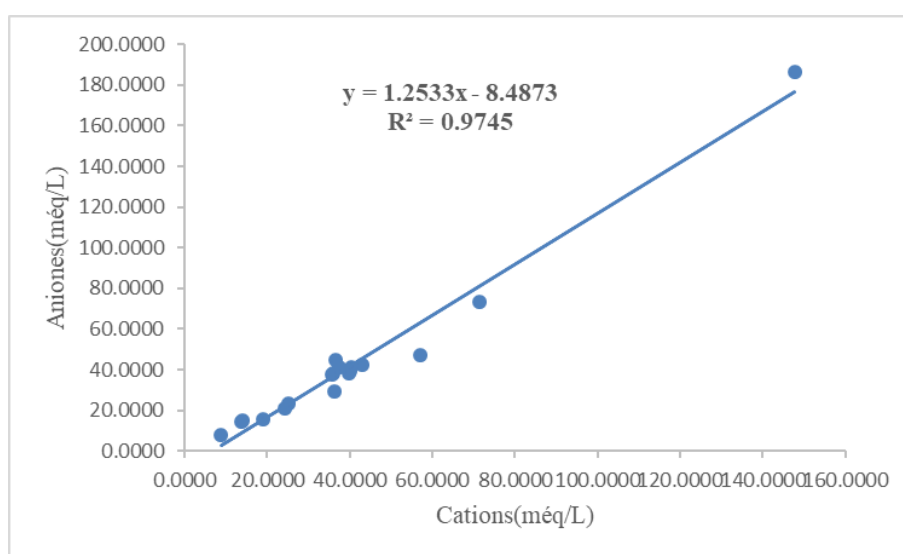
<b>F13</b>	41.0674	40.4366	0.7782	Excellente
<b>F14</b>	73.1052	71.3772	1.1988	Excellente
<b>F15</b>	39.5688	39.9349	0.4566	Excellente
<b>F16</b>	44.8934	36.5389	10.2624	Douteuse
<b>F17</b>	15.1932	13.8864	4.5005	Excellente
<b>F18</b>	186.2527	147.7208	11.5811	Douteuse

### III.4. 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 Bejaia.

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 :  $y = 1.2533x - 8.4873$  et un coefficient de corrélation  $R^2 = 0.9745$ . Les 18 échantillons seront utilisés dans cette étude.



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

### III.5. Etude des paramètres physicochimiques

Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Algérienne des eaux (ADE) de Bejaia en 2023. 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 :  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ .

### III.5.1. 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 Sud-Ouest de la plaine au niveau du forage (F18: 350 °F), la concentration la plus faible est marquée dans la partie Nord-Est de la zone d'étude (F6) et au Sud-Ouest au niveau du forage (F17) avec une concentration entre 45 °F et 48.7 °F.

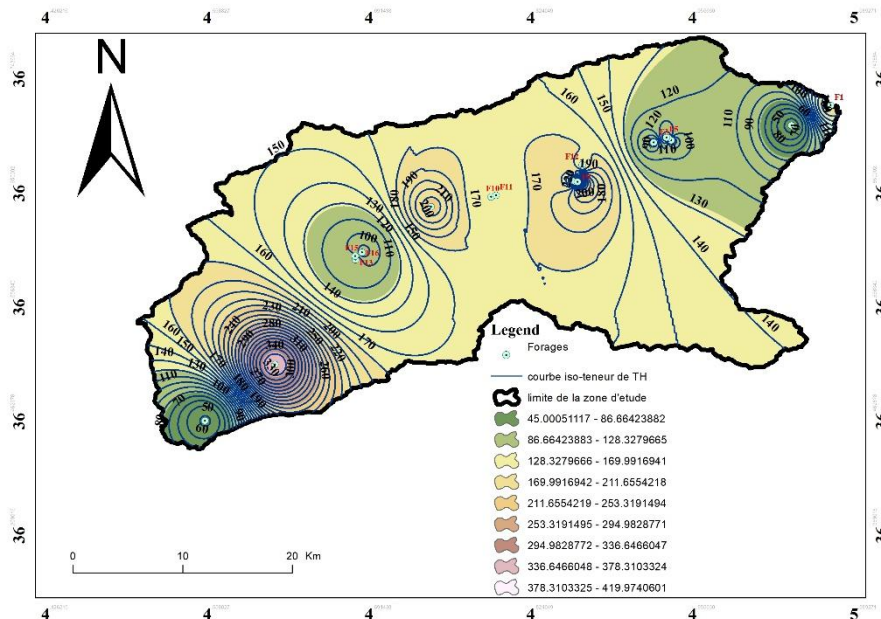


Figure III.2: Carte iso-valeurs du TH

### III.5.2. 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 [2,14].

L'analyse de la carte (Fig. III.3) montre que les valeurs les plus faibles sont observées dans la zone amont du bassin et les plus élevées dans la zone aval ; au Nord-est au niveau du forage (F1: 8.95). Ceci est lié à la nature des roches présentes dans la région et qui sont essentiellement constituées de roches sédimentaires à composante carbonatée importante. Cette augmentation serait due à une progression du faciès des eaux qui passe de bicarbonaté calcique (zone amont) au bicarbonaté sodique (zone aval), d'une part, et à la multiplication des activités anthropiques. Aussi, les pH les plus élevés sont caractéristiques des eaux chlorurées sodiques des zones centrales de la nappe au niveau d'El Kseur et de Béjaia.

Toutes les teneurs du pH sont dans la norme de la potabilité (6.5-8.5) sauf (F1).

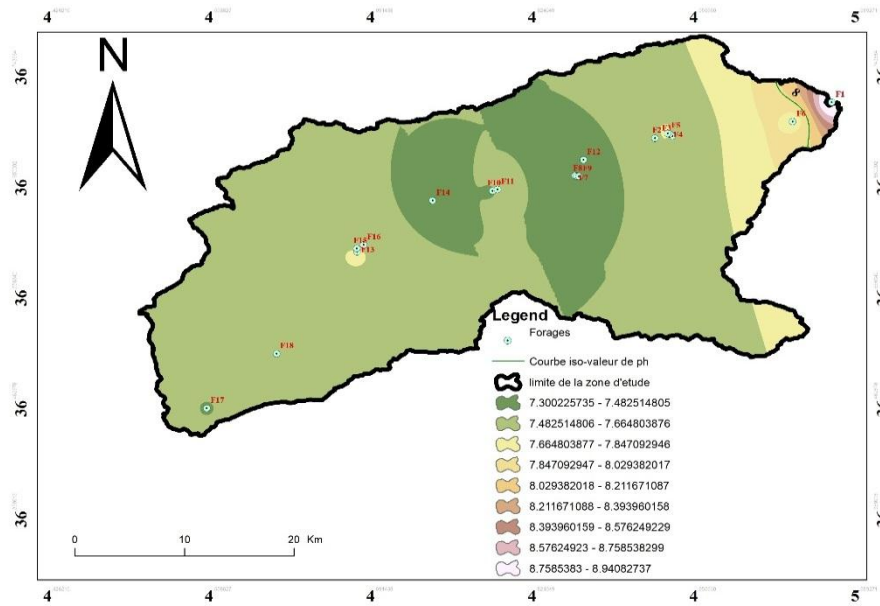


Figure III.3: Carte iso-valeurs du pH

III.5.3. 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 le passage d’un courant électrique [2].

La valeur la plus élevée a été enregistrée à l’Ouest au niveau du forage (F18 :18780  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), et les valeurs les plus faibles ont été enregistrées à l’Est au niveau des forages (F1 et F6).

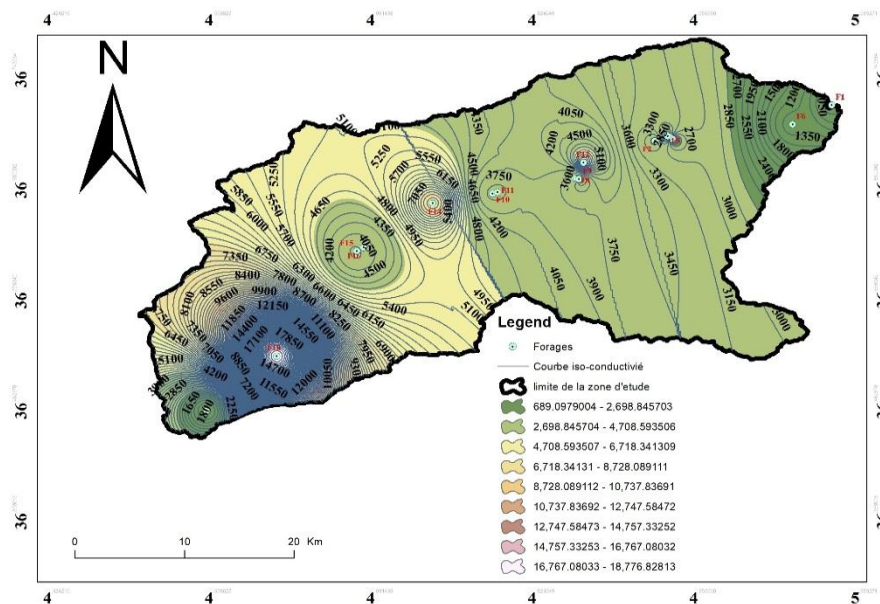


Figure III.4 : Carte iso-valeurs de la conductivité

De cette étude de la conductivité, il ressort que la très grande hétérogénéité de la conductivité des eaux de la zone d’étude serait due d’une part, au phénomène d’évaporation qui est lié aux faibles

gradients hydrauliques comme le montrent les cartes piézométriques, et d'autre part, à la dissolution des arènes granitiques et des couches évaporitiques.

#### III.5.4. Carte de la température

La température est un facteur important pour l'activité biologique. Il influence la solubilité de l'oxygène du milieu récepteur, donc son pouvoir auto épurateur [2].

Les températures enregistrées au niveau des eaux souterraines sont relativement moyennes (entre 17° et 31°C). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées au niveau des forages (F14, F10 et F11).

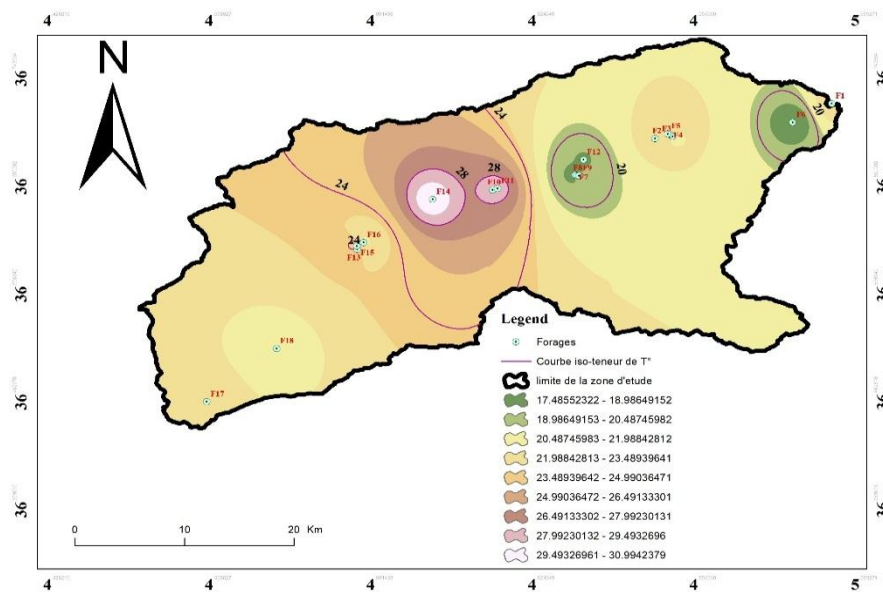


Figure III.5 : Carte iso-valeurs des températures

#### III.5.5. Carte du Titre alcalimétrique complet (TAC)

Il correspond à la teneur en ions  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ . Pour des pH inférieurs à 8.3, les teneurs en ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  sont négligeables. Dans ce cas, la mesure de TAC correspondant au dosage des bicarbonates seuls ( $\text{HCO}_3^-$ ) [2,12].

Ces différences de teneurs pourraient avoir leur explication dans un processus similaire à celles des ions  $\text{HCO}_3^-$ . Ces différences de teneurs pourraient avoir leur explication dans un processus similaire à celles des ions  $\text{HCO}_3^-$ . D'après la carte du TAC (Fig. III.6), la forte concentration est au niveau du forage F18 (60 °F). Ces teneurs diminuent au niveau des autres forages.

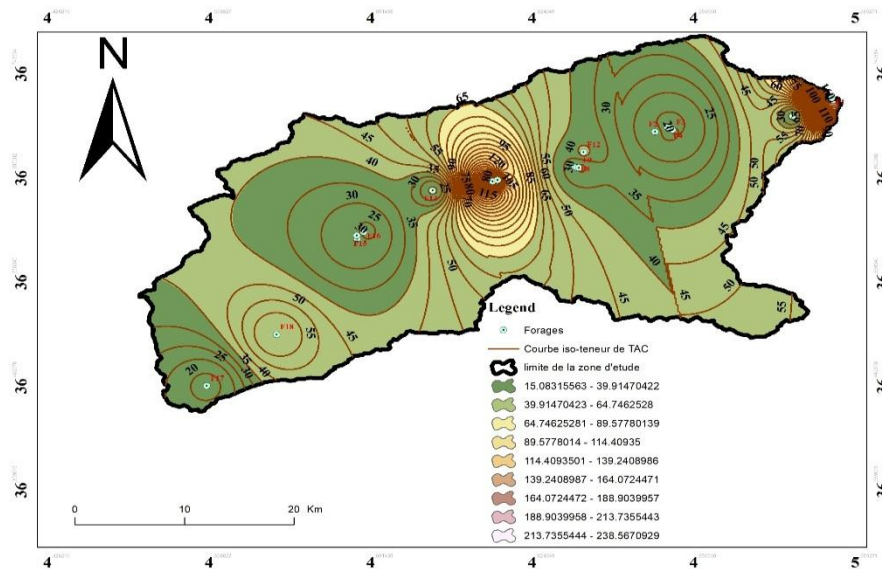


Figure III.6 : Carte iso-valeurs du TAC

### III.5.6. Carte de sodium ( $Na^+$ )

Le sodium est un élément essentiel dont le corps a besoin pour bien fonctionner. Le sodium est un élément dit conservatif car une fois en solution, aucune réaction ne permet de l'extraire de l'eau souterraine. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine. Les teneurs, anormalement élevées, peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres. Dans les eaux souterraines non polluées et sans contact avec des évaporites, la teneur en sodium se situe entre 1 et 20 mg/L [9,12]. Le sodium est le plus abondant des éléments alcalins. Ses composés largement répandus dans la nature, et ils représentent 26 g/kg de la croûte terrestre.

L'analyse de la carte de teneur de sodium montre que la forte concentration est enregistrée au niveau du forage F18, avec une teneur de 2520 mg/L (Fig. III.7). La concentration la plus faible est marquée au niveau du forage F1 avec une concentration de 50 mg/L. La concentration maximale admissible par la norme de l'OMS étant égale à 200 mg/L.

Les concentrations les plus élevées (F5, F7, F8, F12-F16, F18) sont observées autour des centres urbains d'Akbou, Sidi-Aich et El Kseur où l'activité anthropique (industrie, agriculture) y est importante et des intrusions granitiques. Cette forte concentration pourrait résulter d'un phénomène d'évaporation de la nappe.

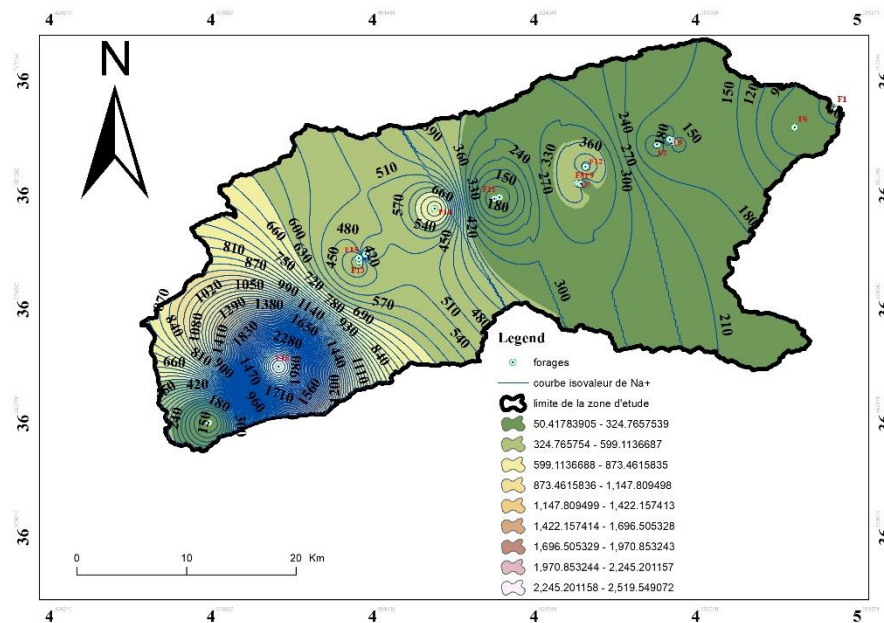


Figure III.7 : Carte iso-valeurs de Na<sup>+</sup>

### III.5.7. Carte du calcium (Ca<sup>2+</sup>)

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 [13].

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

Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées et également des formations gypsifères (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>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 [13].

L'analyse de la carte de teneur en calcium (Fig. III.8) montre que les teneurs en calcium sont relativement fortes dépassant de très loin la norme algérienne (200 mg/L) pour la majorité des forages. Elles sont comprises entre 83.2 et 800 mg/L. Par contre, les faibles teneurs en calcium (< 200 mg/L) sont rencontrées dans les forages (F1, F3, F6, F17). Ces faibles teneurs pourraient avoir leur explication dans un phénomène chimique de minéralisation des eaux. En outre, les fortes teneurs suggèrent un apport en calcium, soit par les phénomènes de concentration par évaporation, soit par l'altération des minéraux des roches intrusives, tels que les pyroxènes et les feldspaths de la zone d'Amizour et du mont du Gouraya.

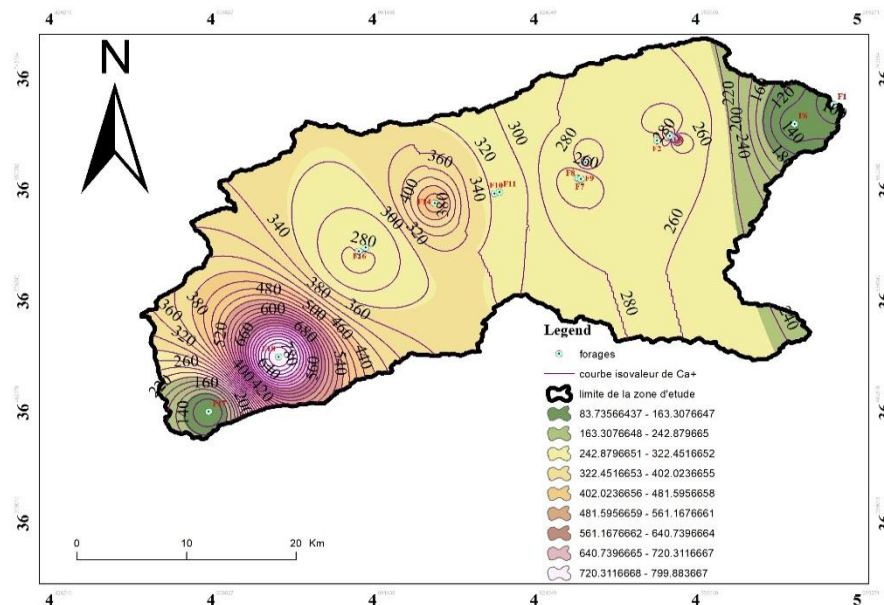


Figure III.8 : Carte iso-valeurs de Ca<sup>2+</sup>

### III.5.8. Carte du magnésium (Mg<sup>2+</sup>)

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 [13].

La concentration du magnésium sont en générale dans la norme (150 mg/L), avec une valeur minimale au niveau du forage (F1 :19.39 mg/L). La concentration maximale est enregistrée, au niveau du F18 avec une valeur de 363 mg/L (Fig. III.9). L'évolution des teneurs en Mg<sup>2+</sup> montre que les fortes teneurs sont localisées dans la zone dite "*de dépression piézométrique*", entre Sidi-Aich et El Kseur, où elles oscillent entre 154.9 et 261.36 mg/L. Hormis cette zone, les teneurs en Mg<sup>2+</sup> sont en dessous de la concentration maximale admissible qui est de 150 mg/L pour la consommation. Ces différences de teneurs pourraient avoir leur explication dans un processus similaire à celles des ions Ca<sup>2+</sup> décrit précédemment. En somme, le magnésium se comporte de la même manière que le calcium dans l'aquifère. Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).



### III.5.10. Carte des sulfates ( $SO_4^{2-}$ )

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

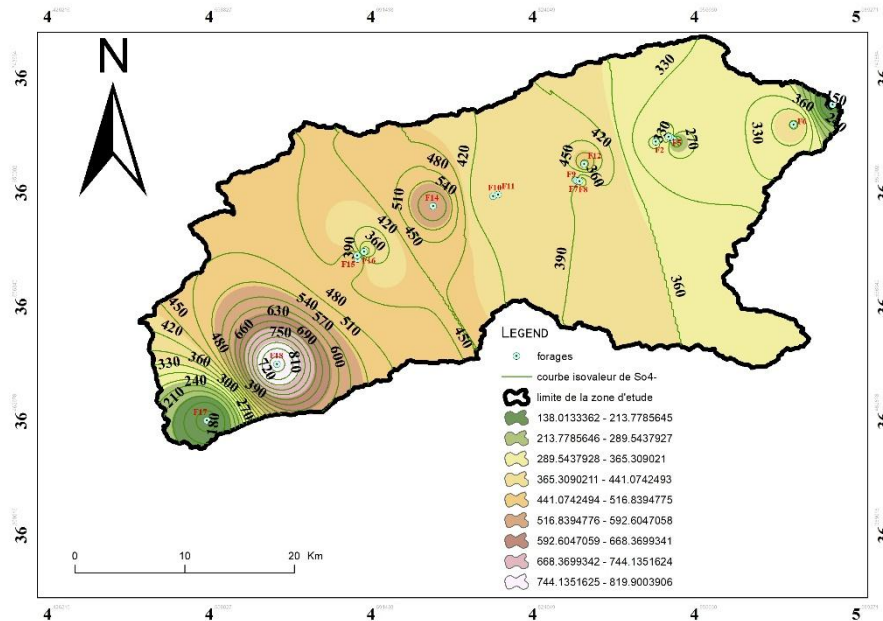


Figure III.11 : Carte iso-valeurs de  $SO_4^{2-}$

L'analyse de la carte des teneurs en sulfates (Fig.III.11) révèle que la distribution spatiale des teneurs n'est pas homogène. Les teneurs en sulfates varient entre un minimum de 137.92 mg/L (F17) et un maximum de (820 mg/L) au niveau du F18.

Comme le montre la carte, les teneurs les plus faibles sont observées dans les zones amont et aval du bassin. De même, elle indique une augmentation progressive vers le centre de la dépression et la zone d'affleurement des granites du socle où, en plus du phénomène évaporatoire auquel est soumise la zone d'étude, une pollution anthropique vient s'ajouter. En effet, de nombreuses activités anthropiques (Industrielle et agricole) sont localisées dans cette zone. En plus de cela, de fortes teneurs en sulfates sont aussi signalées dans la zone du pourtour immédiat des zones d'activités industrielles (Akbou, Sidi-Aich et El Kseur). Cette augmentation locale serait due probablement, soit aux lessivages des sols, soit aux lessivages des couches évaporitiques de l'assise géologique.

Comme elles peuvent être d'origine anthropique par l'usage d'engrais ou de produits phytosanitaires dans l'agriculture. La concentration maximale admissible en cet ion est de 200

mg/L selon les normes algériennes. Au vu des résultats d'analyses, les concentrations en sulfates dépassent de loin la norme à travers toute la zone sauf les forages (F1, F3 et F17).

### III.5.11. Carte des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

La présence des nitrates, en concentration élevée dans des aquifères sous climat aride et semi-aride, serait due à une pollution anthropique. Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique. Les nitrates ont plusieurs origines, par l'entraînement provenant des engrais minéraux ou organiques non utilisés par les plantes, ou d'origine ponctuelle par les rejets d'eau usée domestique, agricole ou industrielle [9,14].

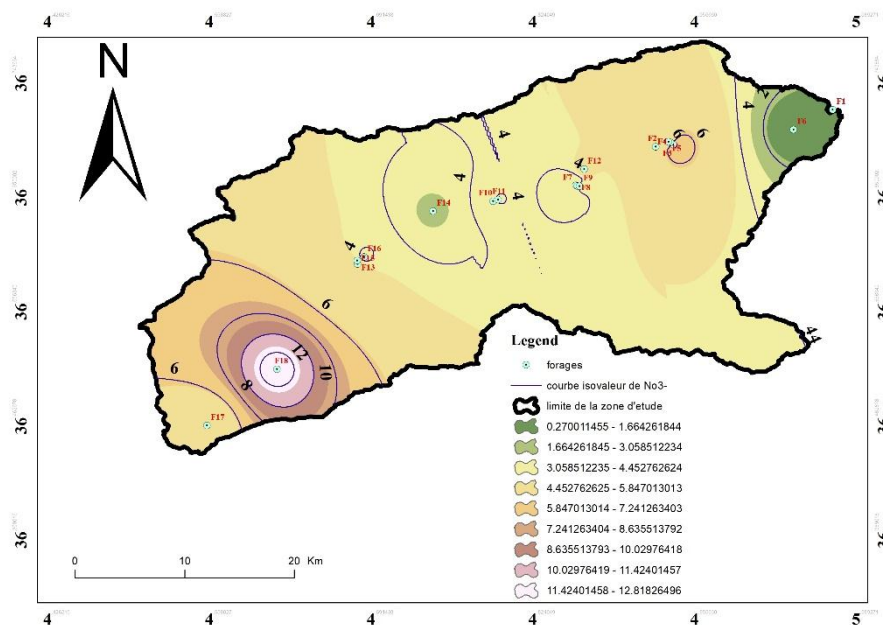


Figure III.12 : Carte iso-valeurs de  $\text{NO}_3^-$

Les teneurs en nitrates enregistrées au niveau des eaux souterraines de la région d'étude sont relativement faibles (entre 0.27 et 12.82 mg/L). La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F18), mais elle est dans la norme de potabilité (< 50 mg/L) (Fig. III.12).

### III.5.12. Carte des chlorures ( $\text{Cl}^-$ )

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 [13].

L'analyse de la carte de teneur en chlorures ci-après, montre que les valeurs des  $\text{Cl}^-$  sont relativement élevées (entre 49.27 et 4199 mg/L). Elles dépassent largement la norme de potabilisation qui est de 200 mg/L, sauf pour les forages (F1 et F6). Les fortes teneurs qui se trouvent entre Sidi-Aich et El Kseur sont probablement dues à l'influence de la nature évaporitique de certaines formations de cette zone où les eaux ont été lessivées par ces

formations, soit, par l'influence de nombreux amendements riches en chlorures utilisés en agriculture.

Il a noté que le forage F1 qui est proche de la mer, a enregistré la teneur la plus faible en Cl<sup>-</sup> (49.7 mg/L). Ceci peut nous rassurer que le phénomène de l'intrusion marine est à écarter pour le moment.

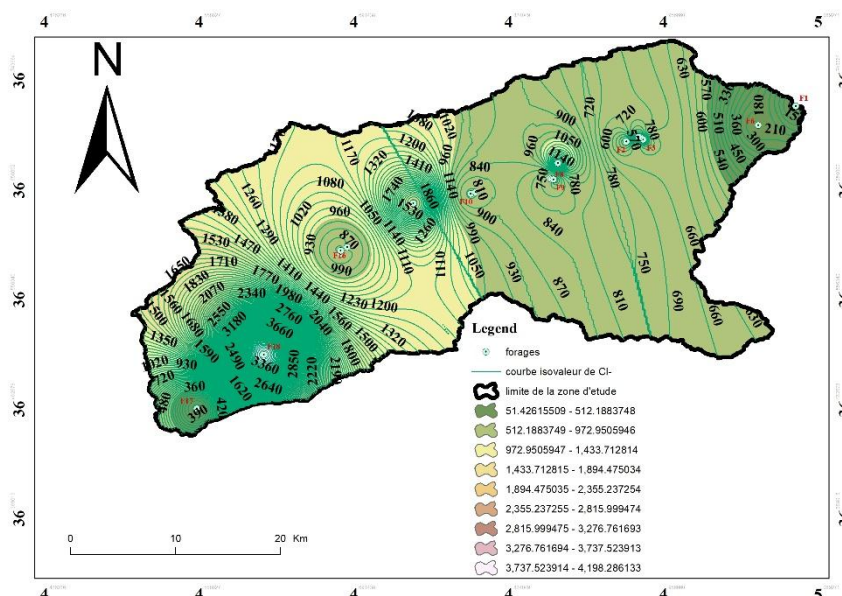


Figure III.13 : Carte iso-valeurs de Cl<sup>-</sup>

### III.5.13. Carte des bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Les bicarbonates (hydrogénocarbonates) proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Elles sont généralement le résultat de l'équilibre physico-chimique entre trois phases: une phase solide (la roche), une phase liquide (l'eau) et une phase gazeuse (le gaz carbonique CO<sub>2</sub>) selon la réaction suivante [9].



Ce système calco-carbonique intervient aussi bien dans la dissolution de la calcite ou de la magnésite que leur précipitation dans l'eau des nappes. Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées et gypsifère (Trias). Donc sa concentration dans l'eau est fonction de la concentration du CO<sub>2</sub> dissout, de la température de l'eau et du pH de l'eau.

La concentration élevée est enregistrée au niveau du Forage (F18 : 732 mg/L), et la concentration la plus faible est marquée au niveau du forage (F4: 183 mg/L).

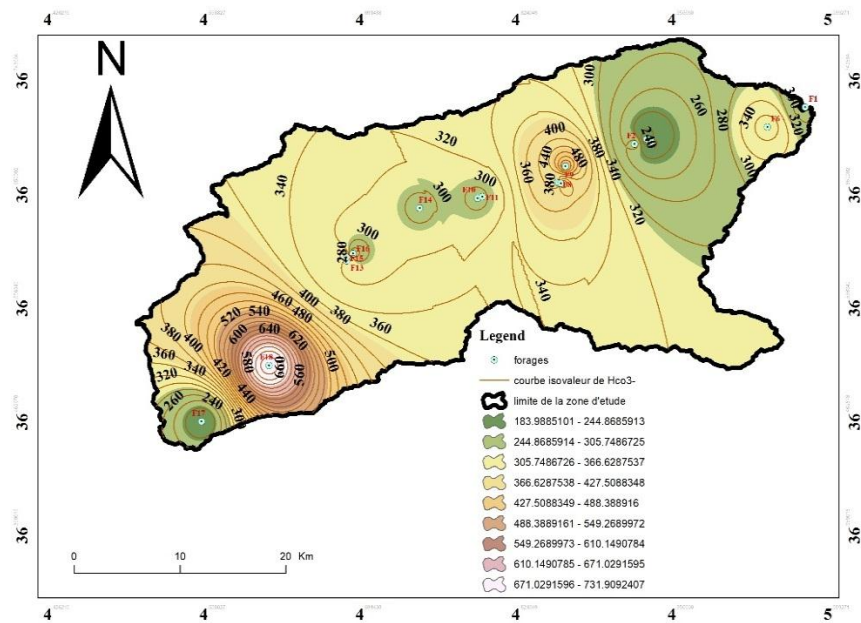


Figure III.14 : Carte iso-valeurs de  $\text{HCO}_3^-$

**III.5.14. Carte de la turbidité**

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

Les concentrations élevées dépassant la norme qui est de 5 NTU, sont enregistrées au niveau des forages F6 (8.64 NTU), F13 (19.68 NTU) et F4 (37.6 NTU). La concentration la plus faible est marquée au niveau du forage F3 (0.34 NTU).

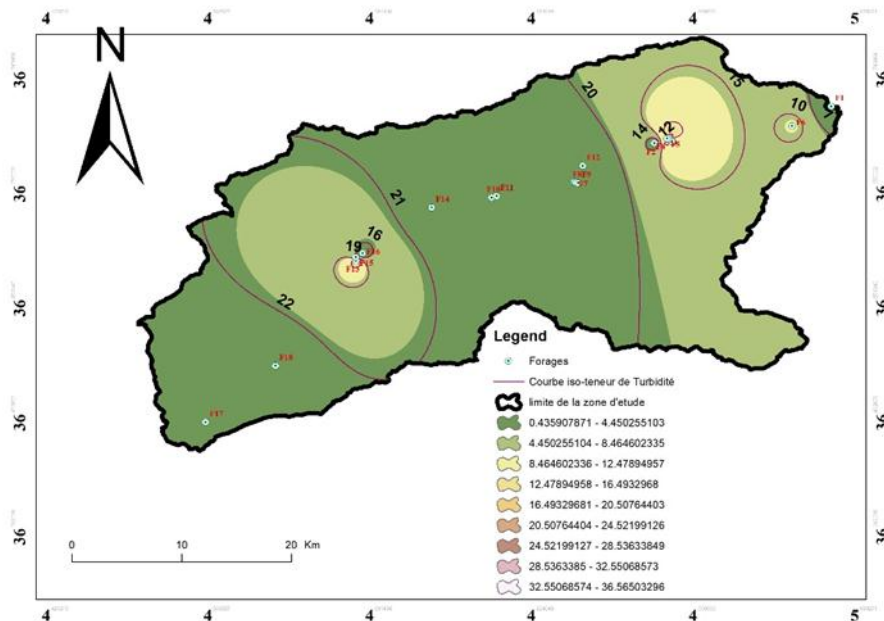


Figure III.15 : Carte iso-valeur de la turbidité

### III.6. 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 deux représentations graphiques ont été retenues et utilisées : le diagramme de Schöeller-Berkaloff et le diagramme de Piper. La réalisation de ces diagrammes a été faite à l'aide du logiciel "Diagrammes".

#### III.6.1. Classification de Schöeller-Berkaloff

Elle consiste à représenter les résultats des analyses chimiques sur un diagramme semi-logarithmique vertical mis au point par Schöeller et révisé par Berkaloff. Ce diagramme permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence [2,9,10].

L'analyse des diagrammes de Schöeller-Berkaloff (Fig.III.16) montre que la majorité des eaux de la zone d'étude présentent deux principaux faciès chimiques, à savoir, chloruré-sulfaté calcique et magnésien, et chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique.

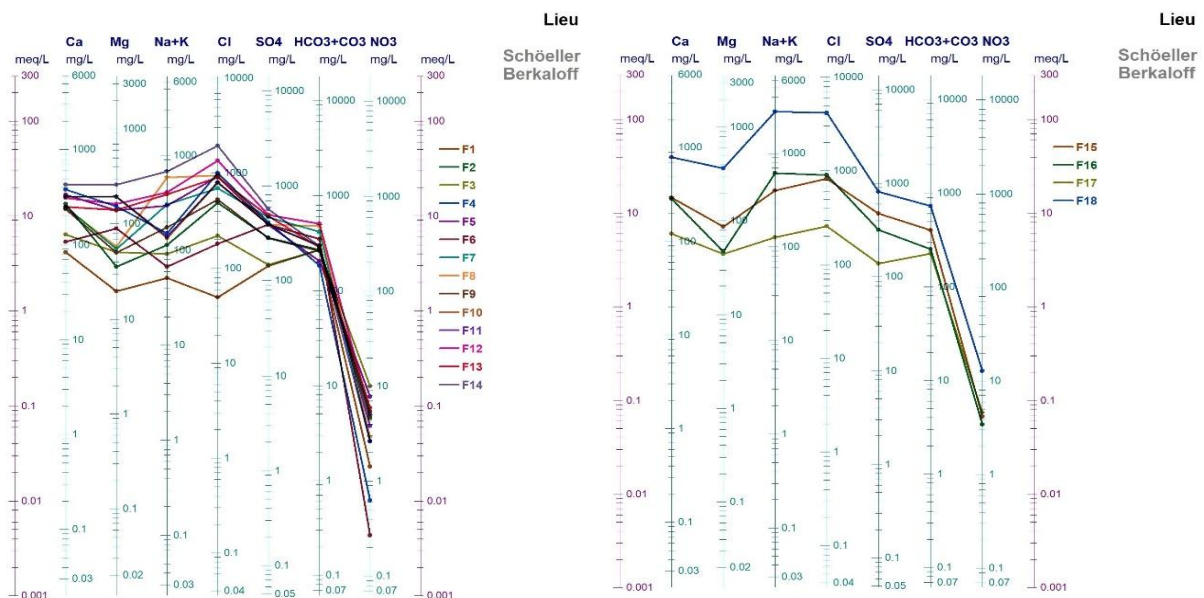


Figure III.16 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff

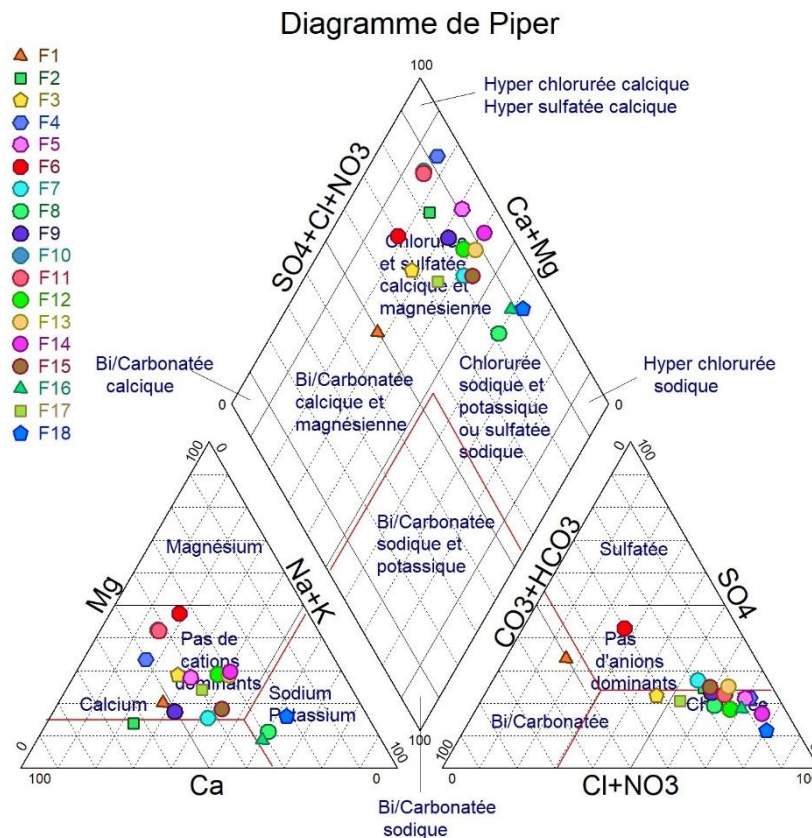
### III.6.2. Classification de Piper

La classification sur le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Ce diagramme 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 [2,9,10,15,16].

La projection des résultats des analyses des eaux prélevées sur le diagramme de Piper (Fig. III.17) montre que le chimisme des eaux analysées est caractérisé par deux principaux faciès chimiques :

- **Faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien** : La signature géochimique de ce type de faciès est caractéristique des eaux de la zone des intrusions granitiques. Ce faciès assez peu important se retrouve dispersé dans toute la vallée.
- **Faciès chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique** : Les eaux à faciès chimique chloruré sodique ou sulfaté sodique ne représentent que les eaux des trois forages de l'ensemble des eaux échantillonnées. Ce faciès se trouve particulièrement au Sud de Sidi-Aich, où les eaux l'acquièrent probablement par lessivage des semelles du Trias situées à la base des flysch [9].

Le forage (F18) présente un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.



**Figure III.17 : Diagramme de Piper**

### 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.

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

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	18	183.000	732.000	332.541	133.847
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	18	49.270	4199.000	947.748	927.670
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	18	0.270	12.820	4.596	3.131
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	18	137.920	820.000	388.637	164.922
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	18	83.200	800.000	287.258	159.650
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	18	19.390	363.000	119.327	91.434
Na <sup>+</sup> (mg/L)	18	50.000	2520.000	396.274	565.762
K <sup>+</sup> (mg/L)	18	1.150	257.500	21.758	60.016

Les résultats des coefficients de corrélation entre les variables sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau III.4 : Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux étudiées

Variables	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	<b>1</b>							
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	<b>0.729</b>	<b>1</b>						
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0.417	0.550	<b>1</b>					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	0.713	<b>0.867</b>	0.285	<b>1</b>				
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	0.597	<b>0.956</b>	0.507	<b>0.857</b>	<b>1</b>			
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0.497	<b>0.856</b>	0.404	<b>0.825</b>	<b>0.864</b>	<b>1</b>		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	<b>0.782</b>	<b>0.951</b>	0.603	<b>0.766</b>	<b>0.861</b>	<b>0.699</b>	<b>1</b>	
K <sup>+</sup> (mg/L)	<b>0.774</b>	<b>0.868</b>	0.617	0.689	<b>0.802</b>	0.641	<b>0.922</b>	<b>1</b>

Le tableau (III.4) relatif à la matrice de corrélation montre que :

- le calcium Ca<sup>2+</sup> possède une bonne corrélation avec Na<sup>+</sup> (R = 0.861) et Mg<sup>2+</sup> (R = 0.864). La présence des ions Ca<sup>2+</sup> dans l'eau est liée principalement à une origine naturelle : la dissolution des roches évaporitiques.
- le Sulfate SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> possède une bonne corrélation avec Mg<sup>2+</sup> (R = 0.825), ce qui indique l'origine d'existence d'epsomite (MgSO<sub>4</sub>) d'une roche évaporite.
- Le Cl<sup>-</sup> corrèle avec la plupart des paramètres : SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (R = 0.867), Ca<sup>2+</sup> (R = 0.956), Mg<sup>2+</sup> (R = 0.856), Na<sup>+</sup> (R = 0.951) et K<sup>+</sup> (R = 0.868).
- Le sodium Na<sup>+</sup> possède une bonne corrélation avec le potassium K<sup>+</sup> (R = 0.922).

### **III.7.2. Analyse en composantes principales (ACP)**

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique essentiellement descriptive. Son objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum des informations contenues dans un tableau de données. L'ACP sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles.

L'analyse en composantes principales tente à mettre en évidence des composantes tenant compte de la variance totale de toutes les variables à l'étude (ensemble des variables de la matrice de données) [17,18]. Comme l'indique si bien *Durand* [18], l'ACP "*cherche une solution où les composantes sont orthogonales (c'est-à-dire indépendantes) entre elles. Quel que soit la matrice de corrélations, il y a toujours une solution en ACP. L'ACP maximise la variance expliquée*".

#### **III.7.2.1. Principe de l'ACP**

L'ACP consiste à déterminer la corrélation des variables et de les regrouper en ensembles dans des familles de même origine. Ces ensembles des nouvelles variables, 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.

#### **III.7.2.2. Application de l'ACP**

L'ACP a été appliquée sur 18 échantillons d'eau et 8 variables ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ). Cette analyse a été réalisée par le logiciel (XLSTAT 2014).

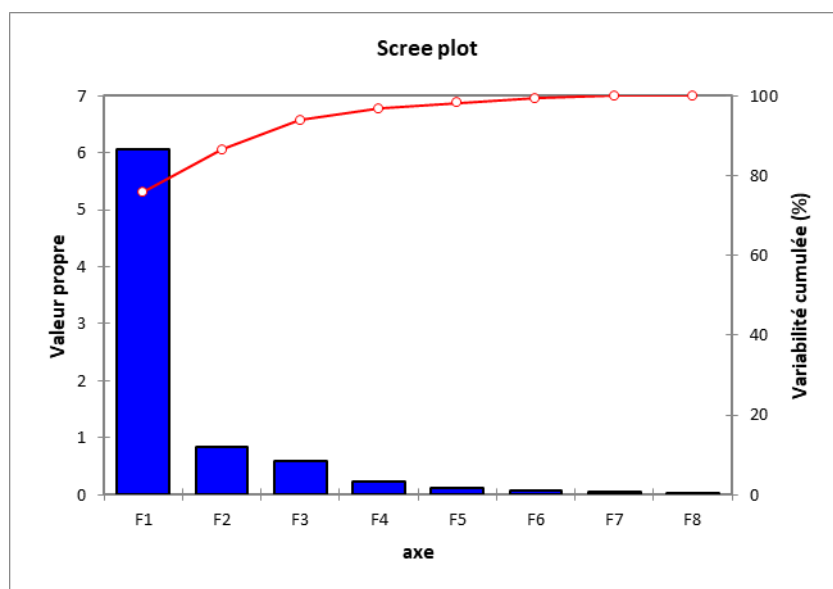
#### **1. Etude des valeurs propres**

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, on 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 **6.068**, il explique **75.848 %** de la variance totale. La seconde composante égale à **0.850** correspond à un pourcentage de **10.620 %**. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec **86.469 %** de la variance totale. Si on fait les deux 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 **86.469 %**. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus ([Tableau III.5](#) et [Fig. III.18](#)).

**Tableau III.5: Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>
<b>Valeur propre</b>	6.068	0.850
<b>Variabilité (%)</b>	75.848	10.620
<b>% Cumulé</b>	<b>75.848</b>	<b>86.469</b>



**Figure III.18 : 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 suivant.

**Tableau III.6 : Corrélations entre les variables et les facteurs**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	<b>0.794</b>	0.091
<b>Cl<sup>-</sup> (mg/L)</b>	<b>0.984</b>	-0.071
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	0.607	<b>0.706</b>
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</b>	<b>0.878</b>	-0.386
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg/L)</b>	<b>0.938</b>	-0.154
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/L)</b>	<b>0.842</b>	-0.319
<b>Na<sup>+</sup> (mg/L)</b>	<b>0.954</b>	0.126
<b>K<sup>+</sup> (mg/L)</b>	<b>0.911</b>	0.220

- **Le facteur F1** est corrélé positivement aux : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>. Une forte corrélation avec Cl<sup>-</sup> (R = 0.984).

- Le facteur F2 est corrélé positivement avec  $\text{NO}_3^-$  ( $R = 0.706$ ).

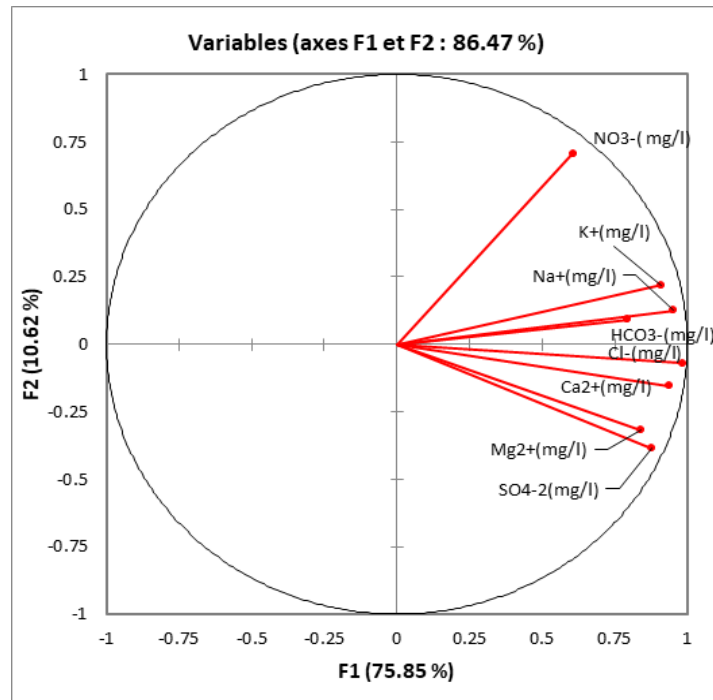


Figure III.19 : Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1-F2)

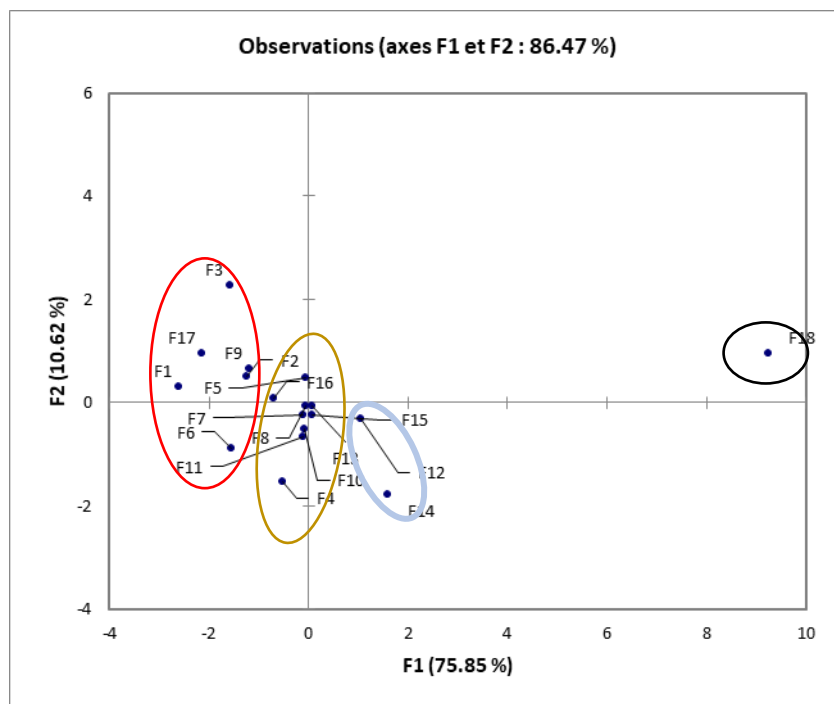


Figure III.20 : Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)

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). L'interprétation que l'on peut faire des deux premiers axes factoriels est :

- Le premier axe factoriel (**F1**) exprimé par 75.85% est corrélé positivement aux:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . Il caractérise une forte minéralisation des eaux dont l'origine pourrait être la dissolution (interaction eau-roche), d'une part, de la calcite et des formations évaporitiques gypso-salifères et d'autres part, des carbonates du massif des calcaires qui compose les montagnes du Gouraya-Aghbalou et de Timezrit.
- Le second axe factoriel (**F2**) exprimé par 10.62 % est corrélé positivement avec  $\text{NO}_3^-$ . Il est possible de pollution ponctuelle par les rejets d'eau usée domestique, agricole ou industrielle.

L'examen de l'espace factoriel de la [Figure \(III.20\)](#) montre des groupements d'individus formant ainsi différentes familles d'eaux, où nous remarquons que presque tous les points d'eau sont regroupés, à part le F18. Ainsi, il semble se dégager 4 groupes :

- **Groupe 1** : rassemble les points d'eau (F1, F2, F3, F6, F9, F17) caractérisé par des concentrations parfaites (toutes les valeurs sont inférieures aux normes de consommation).
- **Groupe 2** : rassemble les forages (F4, F5, F7, F8, F10, F11, F13, F15, F16) qui se caractérise par des teneurs élevées en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . C'est forages d'eau captent des eaux chlorurées calciques.
- **Groupe 3** : rassemble les deux forages (F12, F14), caractérisé par des fortes concentrations en  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .
- **Groupe 4** : s'individualise par le forage (F18) qui s'exprime par des teneurs très élevées (toutes les valeurs sont supérieures aux normes de consommation). Ce point d'eau capte des eaux carboniques et vraisemblablement de la pollution anthropique. Il présente une tendance à une dureté très élevée, la dissolution du gypse et des eaux chlorurées.

### III.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La classification ascendante hiérarchique 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 [2,10,15].

### **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.21), 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 [2,10,15].

### **III.7.3.2. Avantages de la classification ascendante hiérarchique**

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

### **III.7.3.3. 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 (2014), afin de regrouper les forages ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 18 (forages) et les variables de 8 (les ions majeurs). 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 [2,10,13,15,19].

Les résultats de cette méthode sont les suivants.

#### **a) Statistiques des nœuds**

Le tableau (III.7) regroupe les résultats concernant les nœuds successifs et les pertes d'inertie lors du passage d'une classe à une autre classe.

Tableau III.7 : Nœuds successifs du dendrogramme

Nœud	Niveau	Poids
35	16734086.408	18
34	2598742.410	17
33	1129150.270	11
32	242761.257	2
31	233382.011	9
30	188436.571	6
29	112688.781	5
28	56164.603	4
27	46096.257	4
26	40159.537	3
25	30893.953	2
24	27861.219	3
23	15968.092	2
22	12501.956	2
21	3593.114	2
20	2395.254	2
19	60.963	2

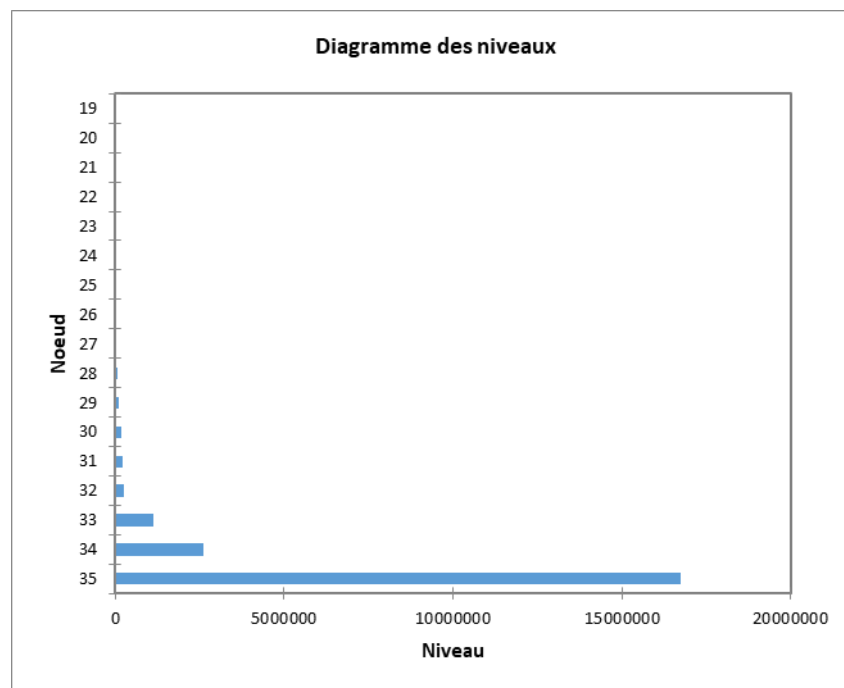


Figure III.21 : Diagramme des niveaux

### 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 4 classes (Figs. III.22 et III.23).

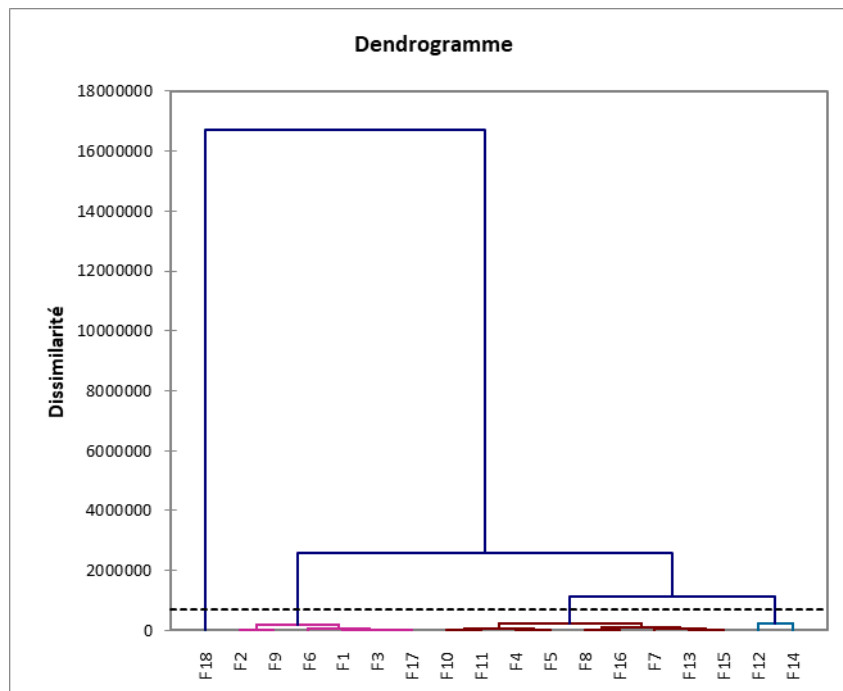


Figure III.22 : Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)

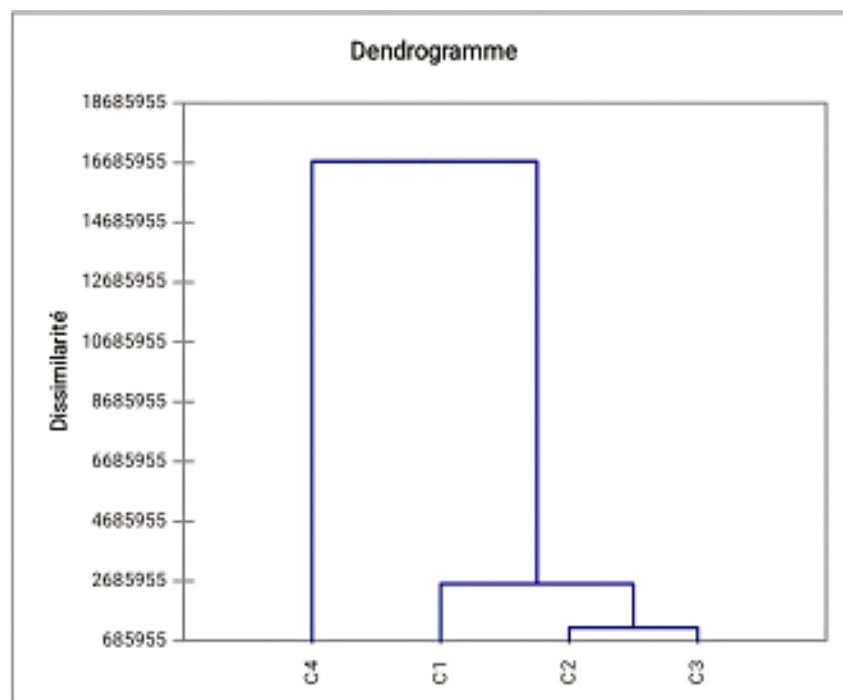


Figure III.23 : Hiérarchie des partitions (intra-classes et inter-classes) obtenues par CAH

Le tableur XLSTAT nous fournit en plus du dendrogramme les barycentres des classes (Tableau III.8).

Tableau III.8 : Barycentres des classes

Classe	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
1	273.628	288.007	4.413	231.253	157.167	48.263	101.463	2.777
2	312.329	870.437	3.965	413.604	298.182	118.828	324.517	11.527
3	400.500	1649.250	3.875	532.750	372.000	212.930	541.750	6.875
4	732.000	4199.000	12.820	820.000	800.000	363.000	2520.000	257.500

L'analyse du dendrogramme (Fig. III.22) nous permet de voir que les forages peuvent être groupés en quatre groupes :

- **Le groupe 1** : est composé des forages : F1, F2, F3, F6, F9 et F17. Il représente 33.33% des échantillons d'eau analysés. Il appartient au faciès chloruré-sulfaté.
- **Le groupe 2** : est composé des forages : F4, F5, F7, F8, F10, F11, F13, F15 et F16. Il représente 50 % des échantillons d'eau analysés. C'est forages captent des eaux du faciès chloruré-sulfaté calcique, chloruré-sodique et sulfaté sodique.
- **Le groupe 3** : est composé des forages : F12 et F14. Il représente 11.11 % des échantillons d'eau analysés. Il capte les eaux chloruré-sulfaté calcique, et chloruré-sodique et sulfaté sodique.
- **Le groupe 4** : est représenté par le forage F18. Les teneurs de tous les éléments sont élevées à part les nitrates.

#### III.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 [9,10,19]. 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 décarrelées 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.

### III.7.4.1. 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.

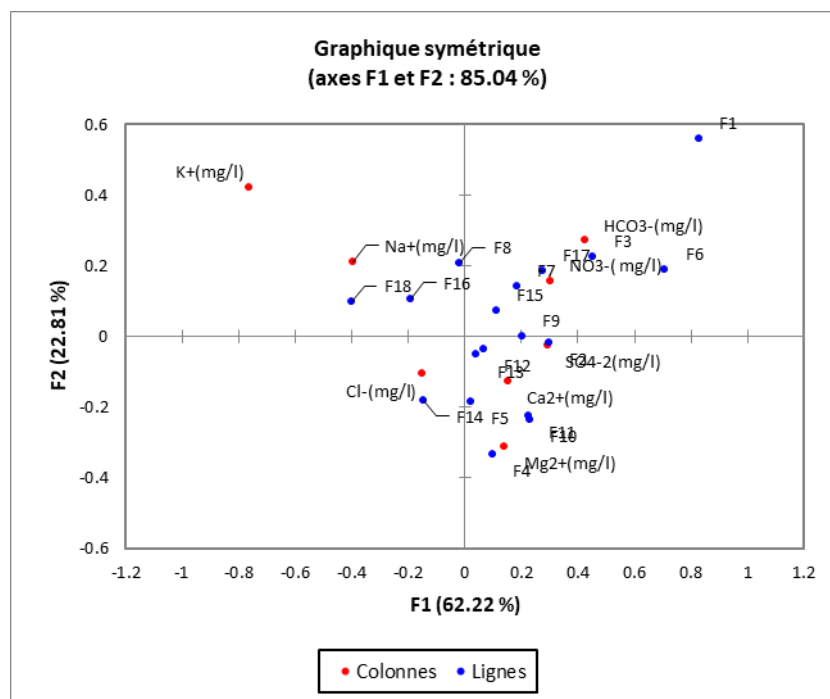


Figure III.24 : Graphique symétrique

L'utilisation de l'AFC permet de récapituler les échantillons d'eau comme suit :

- les forages F16, F18, F8 et F14 sont à conjonction avec les éléments  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{K}^+$ . Ils présentent la minéralisation d'eau provenant de l'interaction eau-roche, c'est-à-dire, de la dissolution de la halite liée à la présence de blocs salifères.
- les forages F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F10, F11, F12, F13, F15 et F17 sont à conjonction avec les éléments  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . Ils présentent la minéralisation d'eau, dont l'origine pourrait être la dissolution, d'une part, de la calcite et des formations évaporitiques gypso-salifères et d'autres part, des carbonates du massif des calcaires qui composent les montagnes de la zone d'étude.

### **III.8. Conclusion partielle**

Les résultats des analyses montrent que la majorité des forages ne sont pas de bonne qualité physicochimique. La qualité peut être classée comme médiocre.

Les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Schöeller-Berkaloff et Piper et ont mis en évidence que la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude est caractérisée par les faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien et chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique.

En outre, les méthodes statistiques multivariées ont été utilisées pour caractériser les systèmes d'eaux souterraines de la zone d'étude en fonction de leurs propriétés physico-chimiques. Ceci est utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans les eaux souterraines.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Ce mémoire de fin d'études nous a permis de connaître la situation actuelle des eaux souterraines du sous bassin versant Oued Soummam, du point de vue hydrochimique et qualité. Les principales conclusions sont :

- L'étude morphométrique du sous bassin nous a permis de dire qu'il présente une forme allongée et très irrégulière avec un relief assez fort. Sa superficie est de 1058.65 km<sup>2</sup> et son périmètre est de 192.08 km. Son climat est méditerranéen, avec une température moyenne de 11.1 °C en hiver et 24.5 °C en été. La pluie moyenne annuelle est de 761 mm/an.
- La vallée de la Soummam est une plaine de basses terrasses alluviales, allongée sous forme d'une étroite bande sinueuse orientée Sud-Ouest – Nord-Est de Tazmalt à Bejaia. La couverture alluviale de la vallée de la Soummam paraît largement épaisse. Déposée sous forme de terrasses Mio-plio-quaternaires superposées l'une sur l'autre, elle constitue, de sa lithologie formée essentiellement d'alluvions grossières: sables, galets, graviers du Miocène, susjacentes à un substratum marneux miocène, argileux oligocène, et même parfois crétacé plus ou moins profond, et de par sa porosité d'interstice un réservoir considérable pour l'emmagasinement de l'eau.
- La qualité chimique des eaux de la région d'étude montre que les eaux souterraines sont très dures (TH > 50 °F : excepté les forages F1 et F17) et d'une mauvaise qualité par rapport aux normes de potabilité.
- Le calcul de la balance ionique des eaux souterraines de la zone d'étude a montré que la fiabilité des analyses est acceptable pour les forages (F1, F3-F5, F8-F11, F13-F15, F17), acceptable pour les forages (F2, F6, F12) et douteuse pour les forages (F7, F16, F18).
- Les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schöeller-Berkaloff ont montré que la qualité des eaux souterraines est dominée par les faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien et chloruré sodique-potassique ou sulfaté sodique.
- L'interprétation des données par les méthodes statistiques multivariées a montré que la variation des éléments chimiques est très significative, et les résultats obtenus indiquent que les paramètres responsables des variations de la qualité de ces eaux sont principalement liés à la présence et à la dissolution de certains minéraux carbonatés et évaporitiques gypso-salifères dans l'aquifère, ainsi que par les activités anthropiques tout au long du bassin, correspondant à des apports d'engrais agricoles, de rejets domestiques et industriels.

A titre de recommandations, nous proposons :

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

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [1] T. Rachedi. Estimation et cartographie des surfaces forestières incendiées par télédétection durant l'été 2021 : cas de la Wilaya de Béjaia. *Mémoire de fin d'études*, Master en Protection des écosystèmes, Université de Constantine 1, 2021.
- [2] A. Azri, S. Dhailis. Evaluation de la qualité physicochimique des eaux Cas de Béjaia-Est. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ressources hydrauliques, Université de M'sila, 2021.
- [3] ANIREF (Agence nationale d'intermédiation et de régulation foncière) - Monographie de la Wilaya de Bejaia.
- [4] S. Kherzi. Etude Hydrochimique des eaux de l'Oued Djemaa, Wilaya de Béjaia. *Mémoire de Magister en Hydraulique générale*, Université de Béjaia, 2011.
- [5] N. Badjadj. Analyse du système de production d'eau potable ainsi que sa gestion et son exploitation au niveau de la wilaya de Bejaia. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ouvrages et Aménagement Hydraulique, Université de Bejaia, 2017.
- [6] M.-A. Zoreli. La wilaya de Bejaia, vers le développement durable et global par la construction d'une intelligence territoriale. *Days of Territorial Intelligence*, 24-26 mars 2010.
- [7] D. Sersoub. Aménagement et sauvegarde de la biodiversité de la vallée d'Oued Soummam (Sétif). *Mémoire de Magister*, Université de Sétif, 2012.
- [8] M. Smaili, A. Touati. Contribution à la caractérisation des eaux de cinq sources dans le bassin versant de Boussellam, Sud-est de Bejaia-Algérie. *Mémoire de fin d'études*, Master en Toxicologie Industrielle et Environnementale, Université de Béjaia, 2018.
- [9] 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.
- [10] A. Beyragued, A. Boudiaf. Contribution à la connaissance de la qualité des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam - Béjaia. *Mémoire de fin d'études*, Master en Hydraulique urbaine, Université de M'sila, 2017.
- [11] N. May, R. Boukoucha. Caractérisation de la qualité des eaux de la vallée de la Soummam - Wilaya de Béjaia. *Mémoire de fin d'études*, Master en Valorisation des Ressources Minérales, Université de M'sila, 2022.
- [12] B. Merzouk. Cours de traitement et dessalement des eaux. *Master 1 Hydraulique*, Université de M'sila, 2023.
- [13] 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).
- [14] S. Rahmani, S. Chaibi. Suivi de la qualité physico-chimique des eaux de surface d'Oued Soummam, *Mémoire de fin d'études*, Master en Biodiversité et environnement, Université de Bouira, 2020.
- [15] S. Aouina, N. Neguez. Etude de données physicochimiques des eaux souterraines de Hammam Dalaa - M'sila. *Mémoire de fin d'études*, Master en Ressources Hydrauliques, Université de M'sila (2023).
- [16] E.A.E.H. El Alaoui, Y. Hajhouji. L'hydrochimie et qualité des eaux de surface et souterraine du Haouz (Maroc). *Mémoire de fin d'études*, Licence en Eau et Environnement, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 2010.
- [17] K. Anazawa, H. Ohmori. The hydrochemistry of surface waters in Andesitic Volcanic area, Norikura volcano, central Japan. *Chemosphere*, 59 (2005) 605-615.
- [18] C. Durand. L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité : notes de cours et exemples. Université de Montréal, Département de sociologie (2005).
- [19] 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).