

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

Mémoire présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique

Par: Abdelatif Hanane

et

Khezzari Adila

Intitulé

**Etude de données physicochimiques des eaux de
Boussaâda**

Soutenu devant le jury composé de:

Guemache Abderezak

Université de M'sila

Président

Merzouk Belkacem

Université de M'sila

Rapporteur

Sahli Youcef

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020



Remerciements

*Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier **Allah** tout puissant de nous avoir donnés la force, la santé et la volonté afin de réaliser ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadreur, Monsieur le Professeur **MERZOUK Belkacem** pour sa disponibilité, ses conseils, sa générosité, ses encouragements et son aide précieuse.*

*Nous remercions également les **membres de jury** qui nous feront l'honneur de juger notre travail.*

Nos vifs remerciements vont également à :

*Tous nos **enseignants** du Département d'Hydraulique
Tout le **personnel** de l'ADE de M'sila.*

*Enfin, un grand merci à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, notamment l'étudiant **NOUARI Issam**.*

Hanane & Adila



Dédicace

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

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

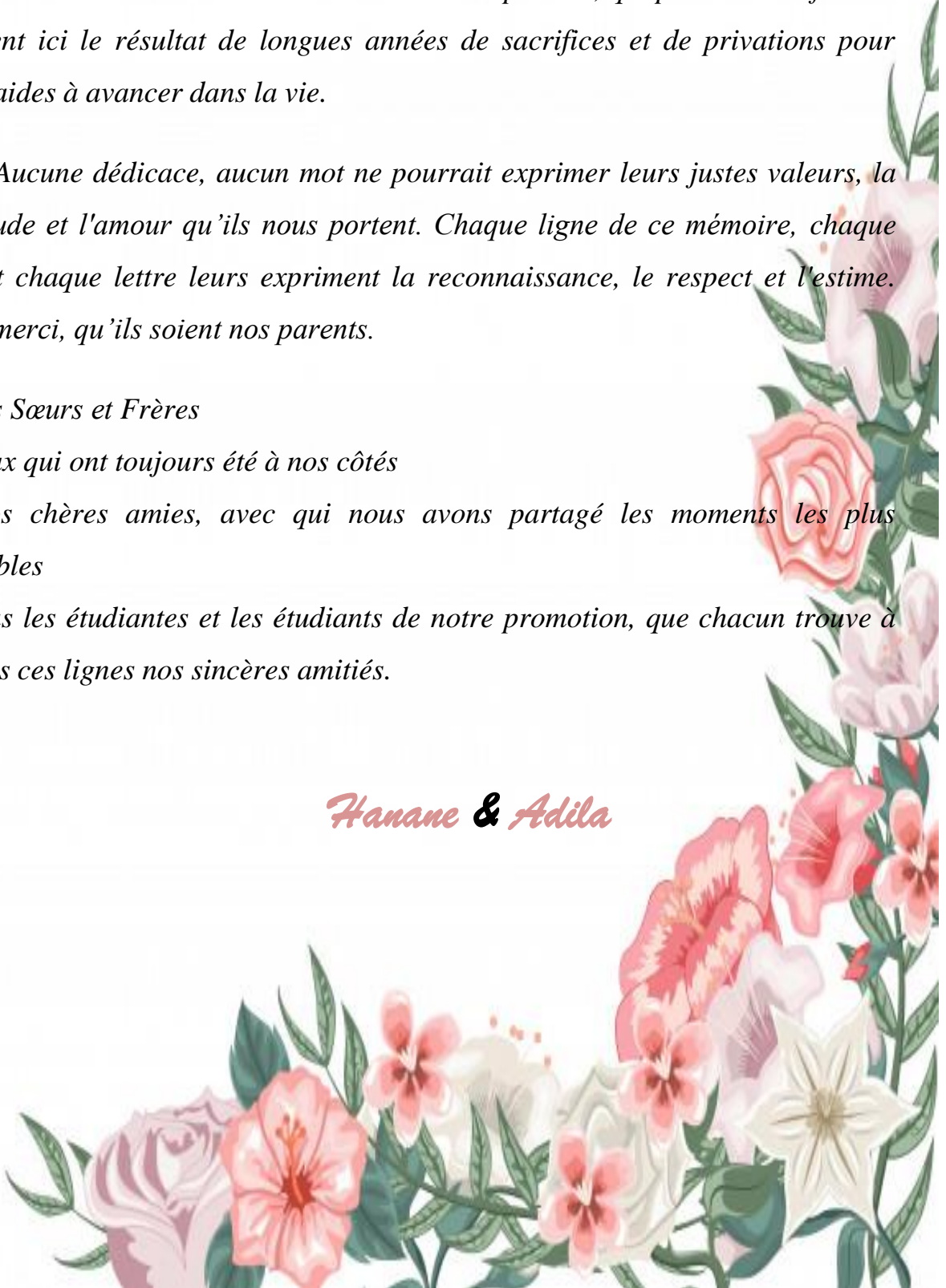
A` nos Sœurs et Frères

`A ceux qui ont toujours été à nos côtés

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

`A tous les étudiantes et les étudiants de notre promotion, que chacun trouve à travers ces lignes nos sincères amitiés.

Hanane & Adila



Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Chapitre I: Présentation de la zone d'étude	
I.1. Introduction	02
I.2. Aperçu géographique	02
I.2.1. Localisation géographique	02
I.2.2. Développement et économie	02
I.2.3. Habitats et activités.....	03
I.2.4. Relief	04
I.2.5. Démographie	04
I.2.6. Répartition administrative	05
I.2.7. Le climat	05
a) Températures	05
b) Précipitations	06
c) Vents	07
I.3. Caractéristiques morphométriques et physiques du B-V de Boussaâda	08
I.3.1. <i>Zone d'étude</i>	08
I.3.2. La surface	08
I.3.3. Le périmètre	09
I.3.4. Indice de compacité de Gravelius.....	09
I.3.5. Les dimensions du rectangle équivalent.....	10
I.3.6. Altimétrie et courbe hypsométrique.....	11
I.3.6.1. Hypsométrie du bassin.....	11
I.3.6. 2. Répartition des tranches d'altitudes et courbe hypsométrique.....	11
I.3.7. Altitudes caractéristiques.....	13
I.3. 8. L'indice de pente	14
I.3.8.1. Indice de pente globale (I _g).....	14
I.3.8.2. Indice de pente de roche (I _p).....	14
I.3.9. Dénivelée spécifique (DS)	15
I.4. Les caractéristiques du réseau hydrographique.....	15
I.4.1. Densité de drainage.....	15
I.4.2. Temps de concentration (T _C).....	16
I.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (v _C).....	16
I.4.4. Réseau hydrographique.....	16
I.5. Identification des sources de pollution	18
I.5.1. Définition.....	18

I.5.2. Origine de la pollution.....	18
I.5.2.1. Pollution d'origine urbaine	19
a) Eaux usées urbaines	19
b) Les rejets solides	20
c) Déchets hospitaliers	21
I.5.2.2. Pollution d'origine industrielle	21
a) Rejets liquides	21
b) Déchets solides	22
I.5.2.3. Pollution d'origine agricole	22
a) Les pesticides périmés	23
b) Les huileries.....	23
c) Les résidus d'abattoirs	23
I.6. Conclusion partielle	23

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

II.1. Introduction	24
II.2. Aperçu géologique	24
II.2.1. Historique de la zone de Boussaâda	24
II.2.2. Secondaire	25
a) Trias	25
b) Jurassique	25
c) Crétacé supérieur	25
II.2.3. Tertiaire	25
II.2.4. Quaternaire	25
a) Terrains du Chott.....	25
b) Dunes.....	25
c) Cônes de déjections.....	26
II.2.5. Interprétation de la colonne litho-stratigraphique	26
1) Les formations favorables de constituer des aquifères poreux	26
2) Les terrains favorables de constituer des aquifères karstiques	26
3) Les formations imperméables qui jouent le rôle des limites étanches entre les aquifères	27
II.3. Aperçu hydrogéologique	27
II.3.1. Zone de Boussaâda.	27
1) Les cartes structurales	28
2) Les cartes piézométriques.....	28
II.3.2. Inventaire des points d'eau	28
II.3.3. Etude piézométrique	29
1) Interprétation de carte piézométrique	29
II.4. Conclusion	30

Chapitre III : Etude hydrochimique des eaux

III.1. Introduction	31
III.2. Calcul de la balance ionique	31
III.3. Corrélation entre les cations et les anions	32
III.4. Interprétation des données	33
III.4.1. Mesures au laboratoire	33
III.5. Etude des paramètres physico-chimiques	34
III.5.1. Paramètres ayant fait l'objet de limite de qualité	34
III.5.2. Etude des paramètres physiques	34
III.5.2.1. Carte du titre hydrotimétrique (TH)	34
III.5.2.2. Carte du pH	35
III.5.2.3. Carte de conductivité (CE)	35
III.5.2.4. Carte du résidu sec (RS)	36
III.5.3. Etude des paramètres chimiques	37
III.5.3.1. Répartition et évolution des éléments majeurs	37
III.5.3.1.1. Carte iso-teneur de calcium (Ca^{2+})	37
III.5.3.1.2. Carte iso-teneur du magnésium (Mg^{2+})	38
III.5.3.1.3. Carte iso-teneur des Nitrates (NO_3^-)	39
III.5.3.1.4. Carte iso-teneur en bicarbonates (HCO_3^-)	40
III.5.3.1.5. Carte iso-teneur en sulfate (SO_4^{2-})	41
III.5.3.1.6. Carte iso-teneur en chlorure (Cl^-)	42
III.5.4. Représentation graphique des faciès chimiques	42
III.5.4. 1. Diagramme de Schöeller-Berkaloff.	43
III.5.4. 2. Diagramme de Piper	44
III.6. Qualité chimique des eaux	45
III.6.1. Potabilité des eaux	45
III.6.1.1. Titre hydrotimétrique total (TH)	45
III.6.2. Aptitude à l'irrigation	46
III.6.2.1. Salinité	46
III.7. Etude statistique des données hydrochimiques	47
III.7.1. Statistique descriptive	47
III.7.2. Analyse en composantes principales (ACP)	48
III.7.2.1. Etude des valeurs propres	48
III.7.2.2. Etude des variables	49
III.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique	53
III.7.3.1. Principe de la CAH	53
III.7.3.2. Application de CAH sur les résultats d'analyses des eaux de la région ...	54
III.7.4. Analyse factorielle des correspondances (AFC)	57
III.7.4.1. Le graphique symétrique	58
III.7.5. Comparaison de différentes méthodes statistiques	59
III.8. Conclusion partielle	59
Conclusion générale	61

LISTE DES TABLEAUX

N° du tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Evaluation de la population du Boussaâda	05
Tableau I.2	Répartition des températures moyennes mensuelles de Boussaâda	05
Tableau I.3	Précipitations moyennes mensuelles de Boussaâda (1994-2016)	06
Tableau I.4	Vitesses moyennes mensuelles des vents (1994-2016)	07
Tableau I.5	Paramètres géométriques du sous bassin versant	11
Tableau I.6	Répartition des différentes tranches d'altitude	12
Tableau I.7	Classification de l'ORSTOM	15
Tableau I.8	Principales caractéristiques morphométriques du B.V de Boussaâda	17-18
Tableau I.9	Quantité de déchets hospitaliers	21
Tableau I.10	Quantité de déchets solides	22
Tableau II.1	Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau	28
Tableau III.1	Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de Boussaâda	32
Tableau III.2	Résultats des mesures des paramètres physiques	33
Tableau III.3	Résultats d'analyse des eaux (2019)	37
Tableau III.4	Potabilité des eaux souterraines de Boussaâda	45
Tableau III.5	Dureté des eaux en °F	46
Tableau III.6	Classification de la conductivité (2019)	46
Tableau III.7	Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux souterraines de Boussaâda	47
Tableau III.8	Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux souterraines de Boussaâda	48
Tableau III.9	Valeurs propres des axes et leurs contributions	49
Tableau III.10	Corrélation entre les variables et les axes	49
Tableau III.11	Nœuds successifs du dendrogramme	54
Tableau III.12	Barycentres des classes	56

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Figure I.1	Carte de la situation géographique de la ville de Boussaâda	03
Figure I.2	Températures moyennes mensuelles de la région de Boussaâda (1994-2016)	06
Figure I.3	Précipitations moyennes mensuelles de la région de Boussaâda (1994-2016)	07
Figure I.4	Variation des vitesses moyennes mensuelles en (m/s) de la région de Boussaâda	08
Figure I.5	Bassin versant de Boussaâda par satellite	08
Figure I.6	Périmètre et surface du bassin versant de Boussaâda	09
Figure I.7	La courbe hypsométrique du sous bassin de Boussaâda	12
Figure I.8	Tranches d'altitudes du bassin versant	13
Figure I.9	Réseau hydrographique du sous bassin de Boussaâda	17
Figure II.1	Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie	24
Figure II.2	Carte géologique de la zone d'étude	26
Figure II.3	Coupe géologique de la zone de Boussaâda	27
Figure II.4	Carte de position des points d'eaux	29
Figure II.5	Carte piézométrique	30
Figure III.1	Corrélation entre les cations et les anions	33
Figure III.2	Carte du TH	34
Figure III.3	Carte du pH	35
Figure III.4	Carte de la conductivité	36
Figure III.5	Carte du RS	36
Figure III.6	Carte du Ca^{2+}	38
Figure III.7	Carte du Mg^{2+}	39
Figure III.8	Carte des NO_3^-	40
Figure III.9	Carte des HCO_3^-	40

Figure III.10	Carte des SO_4^{2-}	41
Figure III.11	Carte des Cl^-	42
Figure III.12	Diagramme de Schöeller-Berkaloff	43
Figure III.13	Diagramme de Piper	44
Figure III.14	Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1-F2)	50
Figure III.15	Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)	50
Figure III.16	Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1-F3)	52
Figure III.17	Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F3)	52
Figure III.18	Diagramme des niveaux	55
Figure III.19	Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)	55
Figure III.20	Hiérarchie des partitions (intra-classes et inter-classes) obtenues par CAH	56
Figure III.21	Graphique symétrique	58

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier la qualité des eaux souterraines de Boussaâda. Les données des analyses physicochimiques utilisées proviennent de l'Algérienne Des Eaux (ADE) de M'sila.

Globalement, les caractéristiques des eaux des huit (8) forages étudiés sont médiocres. L'utilisation des diagrammes chimiques (*Piper* et *Schöeller-Berkaloff*) et l'application des méthodes statistiques (ACP, CAH, AFC) à l'aide du logiciel statistique XLSTAT 2014 ont montré que les faciès sulfaté calcique et magnésien sont les plus dominants.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة نوعية المياه الجوفية لبوسعادة. تم الحصول على نتائج التحليلات الفيزيائية والكيميائية المستخدمة من وكالة الجزائرية للمياه (ADE) المسيلة. بشكل عام ، كانت خصائص المياه في ثمانية (8) آبار المدروسة ضعيفة. أظهر استخدام الرسوم البيانية الكيميائية (بايبر وشولر بيركالوف) وتطبيق التحليلات الإحصائية (ACP) ، (AFC ، CAH) باستخدام البرنامج الإحصائي (XLSTAT 2014) أن سحنات الكالسيوم والمغنيسيوم الكبريتية هي السائدة.

Abstract

The aim of this work is to study the quality of groundwater in Boussaâda. The data for the physicochemical analyses used come from Algerian of Water (ADE) – M'sila.

Overall, the water characteristics of the eight (8) studied drillings are poor. The use of chemical diagrams (*Piper* and *Schöeller-Berkaloff*) and the application of the statistical methods such as Principal Component Analysis (PCA), Hierarchical Ascending Classification (HAC) and Factor Analysis of Components (FAC) using the statistical software (XLSTAT 2014) showed that the sulphated calcium and magnesian facies are most dominant.

Introduction générale

Introduction générale

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. Elles jouent également un rôle important dans l'agriculture, que ce soit pour l'arrosage ou l'irrigation des cultures pendant les saisons sèches. L'exploitation non rationnelle de ces eaux, les rejets domestiques et industriels incontrôlés et l'utilisation excessive d'engrais chimiques ont un impact négatif sur leur qualité.

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 des eaux souterraines destinées à la consommation.

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

Cette étude est constituée de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre portera sur la présentation du site d'étude, son climat et les caractéristiques morphologiques du bassin versant de Boussaâda, et l'identification des sources de pollution.
- Le deuxième chapitre donnera un aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie de la région.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la qualité des eaux souterraines par l'utilisation des diagrammes (Piper et Schöeller-Berkaloff) et l'application des méthodes statistiques, telles que, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) pour une visualisation plus complète des résultats d'analyses, une classification plus aisée ainsi que la mise en évidence de l'apport des méthodes statistiques pour une meilleure interprétation dans le domaine de la chimie des eaux.

En fin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale récapitulant les principaux résultats obtenus et des perspectives de recherche.

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction

La connaissance de la zone à étudier est primordiale avant toute étude d'un projet. Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu géographique, démographique, climatique, administratif et morphométrique. Les différents types de pollution et leurs sources ont également été traités dans ce chapitre.

I.2. Aperçu géographique

I.2.1. Localisation géographique

La commune de Boussaâda est située sur la partie sud de la Wilaya de M'sila, au Sud-Est du nord algérien, à 250 km d'Alger et environ 200 km à vol d'oiseau de la mer (Fig. I.1). Elle est placée au point de rencontre des coordonnées spatiales suivantes : 4° 11' longitude et 35° 13' latitude nord, sur une altitude de 560m au-dessus du niveau de la mer. Elle couvre une superficie d'environ 250 km².

I.2.2. Développement et économie

Boussaâda possède un bon emplacement géographique pour être important dans l'avenir ; pétri par les fondamentaux économiques et naturelles qui affecte directement les municipalités environnantes. Cet emplacement à la croisée des routes nationales (RN8 : Alger- Biskra, RN46 : M'sila- Djelfa) constitue un important carrefour d'échange entre la méditerranée et le Sahara, mais aussi entre les Ziban et le littoral algérois, et entre le M'Zab et Constantine.

Boussaâda est une zone touristique riche des Oasis et des cascades d'ailleurs on dit "*Oasis Boussaâda*", connue de ses palmeraies et ses plaines cultivées, irriguées à partir de la nappe phréatique ainsi que les Oueds Maiter et Boussaâda.

Cette ville en pleine évolution spatiale, n'a pas répondu à un plan spécifique dans son tracé, bien au contraire elle a connu plusieurs plans, à savoir : le plan linéaire, le plan en damier, le plan radioconcentrique.

Son tissu urbain se structure autour de plusieurs axes qui sont principalement des axes routiers importants, le long desquels se répartissent les logements et les différents équipements (administratifs, scolaires ...).

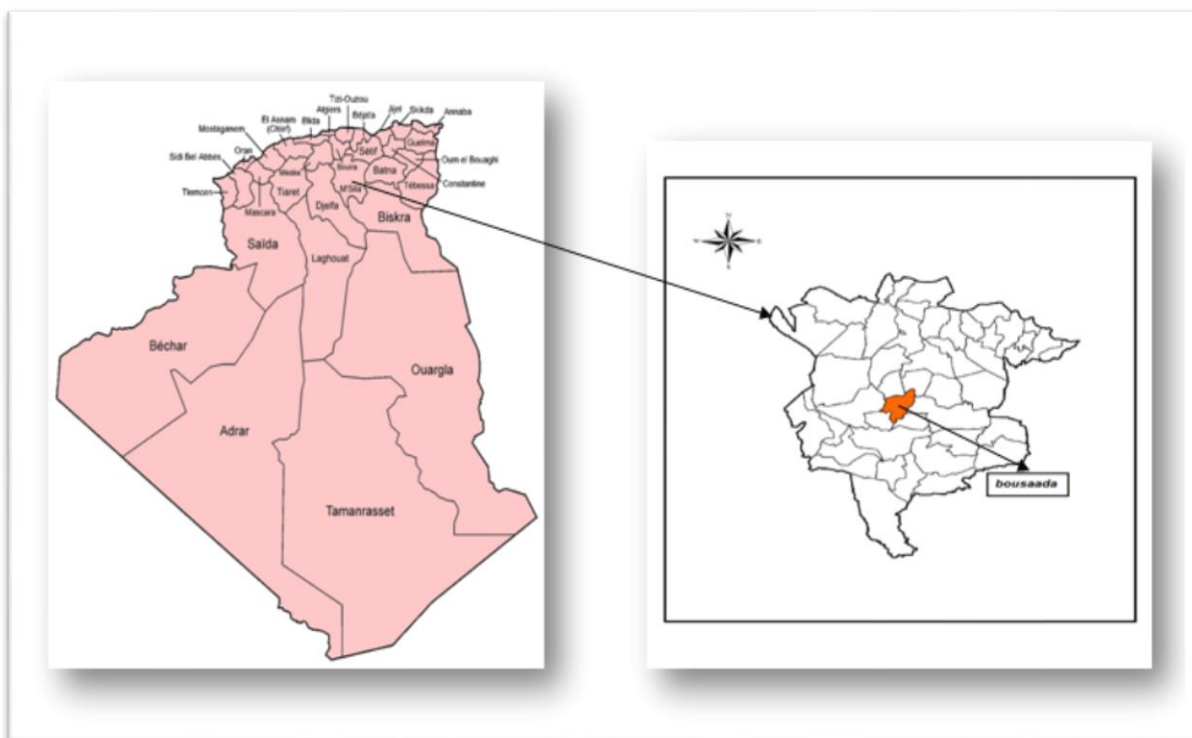


Figure I.1 : Carte de la situation géographique de la ville de Boussaâda

Les axes principaux de la ville de Boussaâda sont :

- ✓ L'axe Boussaâda –Alger sur la RN08 : il structure la ville de Boussaâda, notamment dans la partie Nord-Ouest, le long duquel s'allonge le pôle urbain (la ZHUN), qui contient certains équipements structurants.
- ✓ Axe Boussaâda- Biskra RN46 :c'est un axe structurant la partie Sud- Est le long duquel se localise la zone d'activité, ainsi certains équipements.
- ✓ Axe Boussaâda -Djelfa : représenté par la RN 46 qui traverse la structure du Nord- est vers le Sud-ouest.

D'autres éléments naturels contribuent à la restriction de la forme actuelle du tissu de la ville et orientent son extension:

- ✓ Les Oueds : Oued Boussaâda et notamment Oued Maiter
- ✓ Les terrains sableux sur les rives d'Oued Maiter, situés sur le côté Ouest et Nord-est de la ville.

1.2.3. Habitats et activités

La plupart des agriculteurs sont concentrés au village agricole El-Maadhar. Malgré que c'est une ville où l'eau jaillit abondamment grâce à la richesse de ses nappes phréatiques qui alimentent sans discontinuité les sources et les fontaines publiques, les terres sont fertiles et les potentialités agricoles de la ville sont énormes, mais peu de gens qui se mettent au travail et osent remuer à

cette terre généreuse, car les résultats se font sentir au niveau des EAC (Exploitation agricole collective) où de grandes superficies verdoyantes occupent la partie Sud-ouest de la ville.

1.2.4. Relief

Le relief de la région de Boussaâda se caractérise par la présence de chaînes de montagne d'orientation variée, surtout au niveau de la partie Sud et Sud-ouest. On trouve :

- ✓ Djebel Grigour, côté Nord-ouest de la ville
- ✓ Djebel Moubkhira, côté Sud-ouest du chef-lieu (772 m).
- ✓ Djebel Kerdada, côté Sud (947m).
- ✓ Mont de Menkeb Sidi Brahim (718 m), côté Sud-est de la ville et Djebel El Maalleg, côté Sud de la commune.
- ✓ Les terres agricoles du côté Nord-est (village agricole d'El Maadher) [1].

Pour les vallées traversant le périmètre de Boussaâda, on trouve :

- La vallée de l'Oued Boussaâda qui forme une sorte de couloir entre le Djebel Moubakhera et Djebel Kerdada et coule au pied de ce dernier en se jetant dans la plaine Nord.
- La vallée de l'Oued Maiter située à l'Ouest de la ville de Boussaâda avec une altitude de 587m à la limite Ouest de la commune et 547 m sur la RN 8, formant un couloir venteux animé par les vents Ouest et Nord, engendrant des champs de dunes orientés Ouest-Sud-Ouest-Est-Nord-est.

Les formes récentes ne sont généralement pas stabilisées, ce sont parfois des dunes au pied des reliefs comme celui du Djebel Kerdada.

Sur la rive Est de l'Oued Maiter, on trouve des champs de Sebkhass où les larges lits de l'Oued sont souvent à sec et sont soumis à la déflation des vents de l'Ouest.

1.2.5. Démographie

Boussaâda est la deuxième commune la plus peuplée de la wilaya de M'sila après la commune de M'sila. Selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008, le nombre d'habitants est estimé à 125573 habitants contre 104029 habitants en 1998. La population de la commune est évaluée à 168333 habitants en 2019 (Tableau I.1).

Tableau I.1 : Evaluation de la population du Boussaâda [2]

Année	2008	2015	2019
Population	125 573	152 306	168333

I.2.6.Répartition administrative

La commune de Boussaâda est limitée :

- ✓ Au Nord par la commune d'Ouled Sidi Brahim
- ✓ Au Nord-est par la commune deMaarif
- ✓ A l'Est par la commune d'Elhouamed
- ✓ A l'Ouest par la commune deTamza
- ✓ Au Sud-est par la commune d'Oueltem
- ✓ Au Sud-ouest par la commune d'Elhamel.[1]

I.2.7.Le climat

Dans chaque pays, chaque village, les caractéristiques moyennes des saisons déterminent le climat. On peut définir les climats à partir de deux phénomènes : la température et les précipitations, c'est à dire la pluie, la neige ou la grêle. Dans les grandes lignes, on décrit un type de climat, mais tant d'éléments le modifient.

Le climat régnant sur Boussaâda est de type semi-aride, avec un été sec et très chaud, et un hiver très froid [3].

La station d'observation météorologique la plus proche se situe à Boussaâda (Longitude : 4° 15' 0'' E – L'altitude : 35° 16' 60'') [3].

a) Températures

La température est un paramètre très important, elle est continentale avec une amplitude moyenne de 36 °C entre les mois de janvier et juillet. En hiver, la température la plus basse atteint 9.80°C (mois de Décembre), mais elle dépasse fréquemment 31.6°C au cours de mois de juillet et août [3].

Tableau I.2 : Répartition des températures moyennes mensuelles de Boussaâda

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Température moyenne (°C)	25,2	19,89	12,51	9,80	10,06	11,1	13,9	19,2	24,3	28,74	31,6	30,25

Source : Station météo de Boussaâda 2018

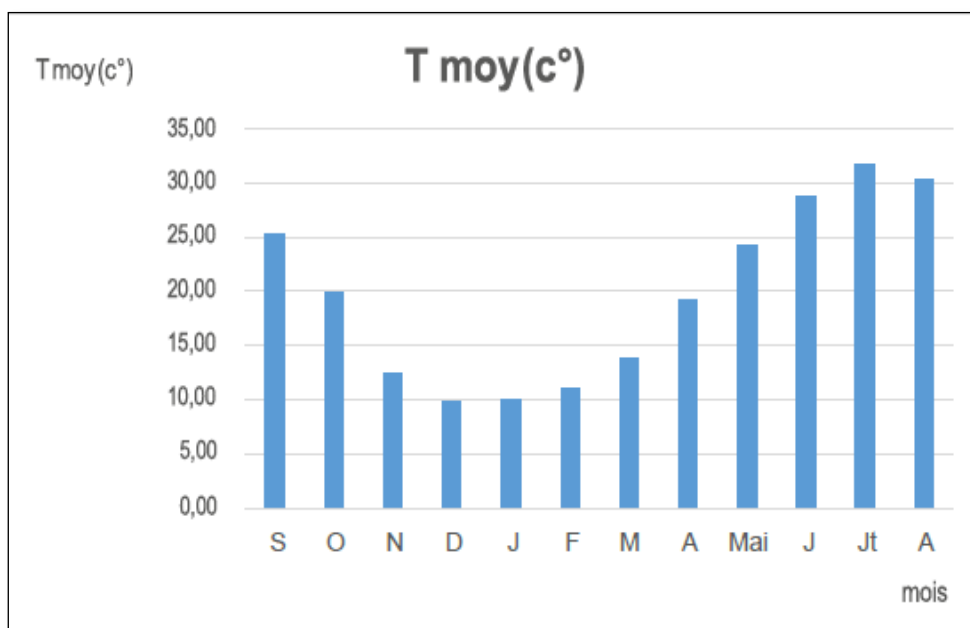


Figure I.2 : Températures moyennes mensuelles de la région de Boussaâda (1994-2016)

La figure (I.2) montre que le maximum de température a été enregistré en Juillet avec une valeur de 31,6 °C et le minimum en Décembre avec une valeur de 9.8 °C.

b) Précipitations

La pluie est un facteur essentiel qui caractérise le climat d'une région, elle joue un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eau et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines [3].

Tableau I.3 : Précipitations moyennes mensuelles de Boussaâda (1994-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Précipitations (mm)	20,03	8,8	14,45	24,93	8,9	9,1	11,53	16,28	12,38	11,6	9,68	10

Source : Station météo de Boussaâda 2018

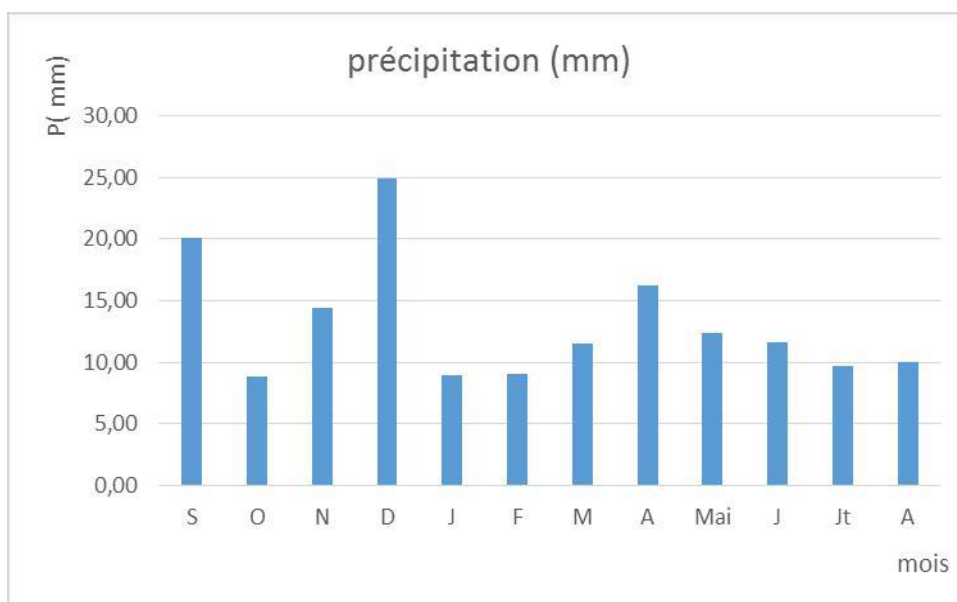


Figure I.3 : Précipitations moyennes mensuelles de la région de Boussaâda (1994-2016)

L'examen de la répartition mensuelle des précipitations au niveau de la station de Boussaâda montre que la valeur maximale des précipitations est enregistrée dans le mois de Décembre (24.93 mm), alors que la valeur minimale est observée dans le mois d'Octobre (8.8 mm).

c) Vents

Le vent est aussi un facteur important du climat. La connaissance de sa direction, son intensité et sa fréquence est nécessaire pour la mise en valeur agricole d'une région notamment l'orientation des brises de vents. Le vent assure le remplacement de l'air plus ou moins saturé au contact de la surface évaporant par des nouvelles couches ayant une température et une humidité généralement plus faibles. Il favorise donc l'évaporation, d'autant plus que sa vitesse et sa turbulence sont grandes [3].

Le vent (direction et vitesse) est un paramètre essentiel pour la mise en place des asperseurs car la région de Boussaâda est basée beaucoup plus sur l'irrigation par aspersion.

Tableau I.4 : Vitesses moyennes mensuelles des vents (1994-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Vent(m/s)	1,75	1,5	1,73	2,68	2,78	4,2	3,98	3,03	2,98	2,63	2,45	2,03

Source : Station météo de Boussaâda 2018

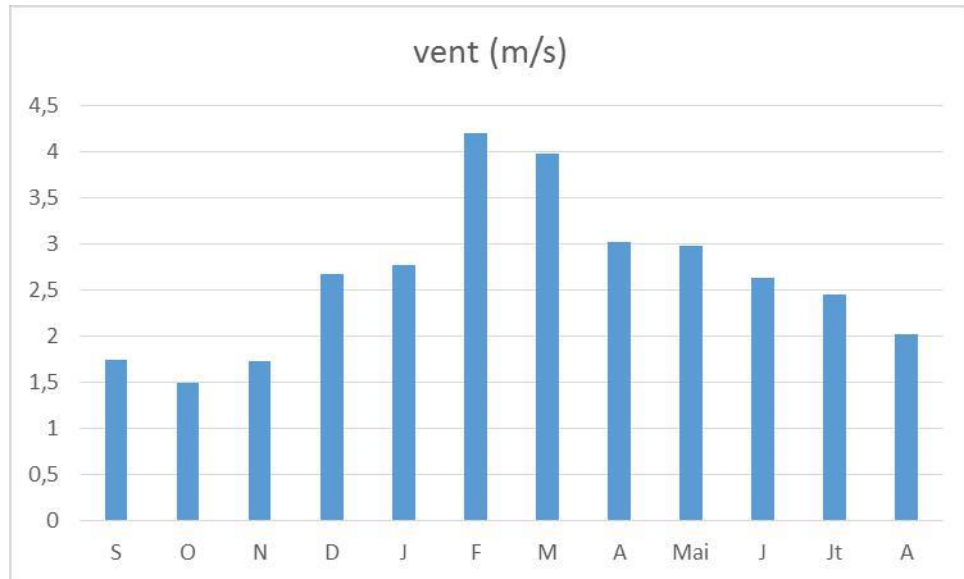


Figure I.4 : Variation des vitesses moyennes mensuelles en (m/s) de la région de Boussaâda

I.3. Caractéristiques morphométriques et physiques du bassin versant de Boussaâda

I.3.1. Zone d'étude

Une projection par satellite nous donne l'aperçu ci-après.



Figure I.5 : Bassin versant de Boussaâda par satellite [4]

I.3.2. La surface

Le bassin versant (B.V) est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont donc être en partie reliés à sa surface, correspondant à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. Sa surface (A)

exprimée en km^2 , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou par les techniques de digitalisation (Global Mapper – Map Info, Arc Gis...). La surface du bassin versant de Boussaâda a été mesurée grâce au logiciel Arc Gis, elle est de l'ordre 249.48 km^2 .

1.3.3. Le périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant. Il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre du B.V du Boussaâda mesuré par "ArcGis" est de 88.75km.

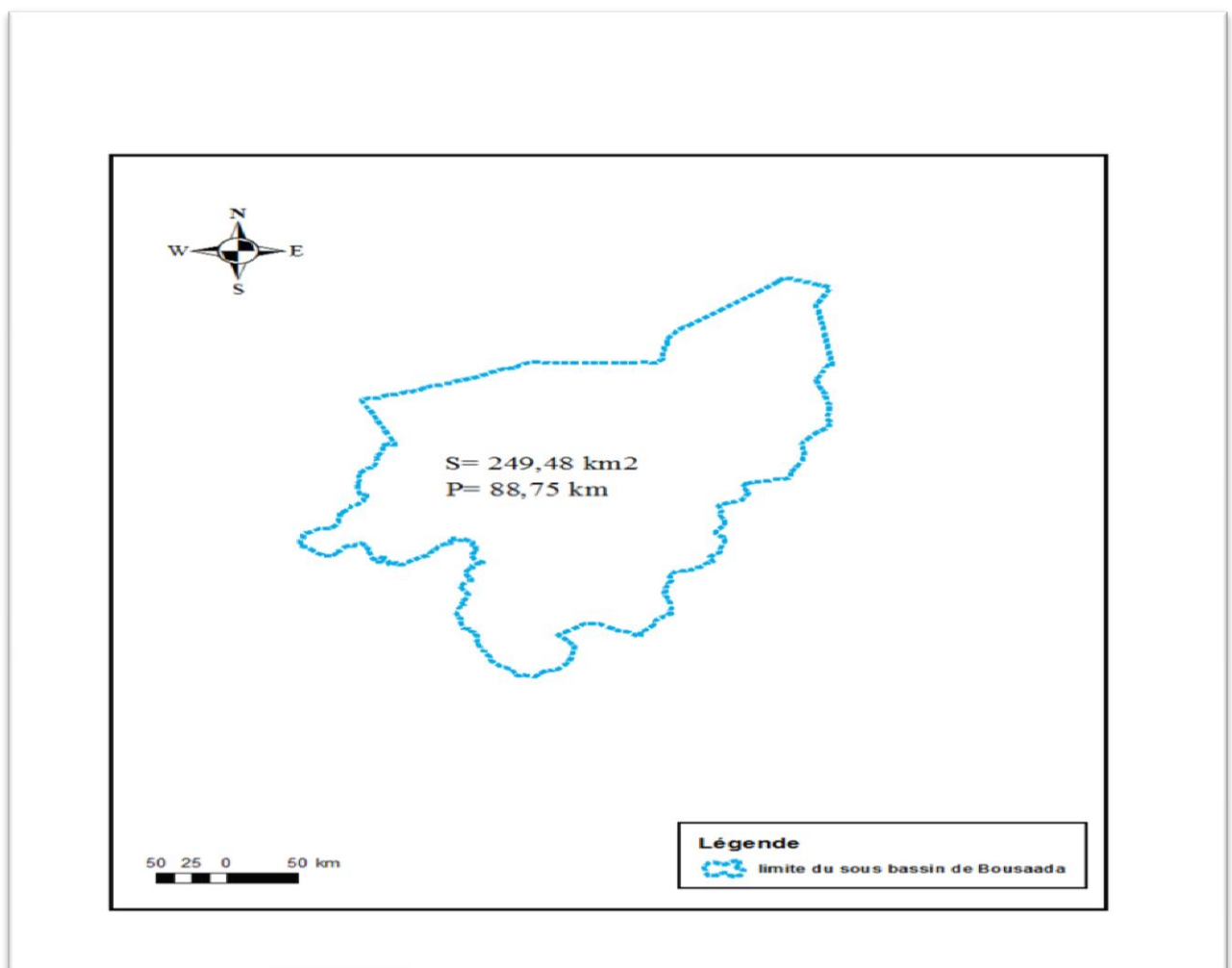


Figure I.6 : Périmètre et surface du bassin versant de Boussaâda

1.3.4. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin versant qui 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 à celui

d'un cercle qui aurait la même surface.

Il s'exprime par la formule suivante (Roche, 1963) :

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

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km².

Le coefficient de Gravelius du B.V du Boussaâda est de 1,57.

* Lorsque K_G est proche de **1**, le bassin versant est de forme quasiment circulaire

* Lorsque K_G supérieur à **1**, le bassin versant est de forme allongée.

Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

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

D'après K_G obtenu, le bassin versant du Boussaâda est de forme allongée. [5]

1.3.5. Les dimensions du rectangle équivalent

Afin de comparer les bassins versant entre eux, *Roche* a établi en 1963 deux relations relatives aux dimensions du rectangle équivalent, dont les dimensions sont données par les relations suivantes :

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)} \right]$$

$$\ell = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)} \right]$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en km ;

ℓ : Largeur du rectangle équivalent en km ;

k_c : Indice de compacité

A : Superficie du bassin versant en km².

Nous obtenons :

$$L = 34.08 \text{ km} \quad \ell = 10.27 \text{ km [6]}$$

I.3.6. Altimétrie et courbe hypsométrique

I.3.6.1. Hypsométrie du bassin

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

Les résultats d'une telle application sont donnés dans les tableaux suivants.

Tableau I.5 : Paramètres géométriques du sous bassin versant

Paramètre	Unité	Valeur
A	km ²	249.48
P	km	88.75
K_c	/	1.57
L	km	34.08
ℓ	km	10.27

I.3.6.2. Répartition des tranches d'altitudes et courbe hypsométrique

Les fréquences altimétriques sont présentées au tableau (I.6) et par la courbe hypsométrique (Fig. I.7). Ces représentations montrent que l'altitude supérieure à **512 m** du secteur d'étude ne représente que **184.648 Km²**, soit environ **74.012%** de la surface totale. La tranche d'altitude comprise entre **1124m** et **1226m**ne représentent que **2.73km²**, soit environ **1.09 %**de la surface totale du bassin versant. Par contre la tranche d'altitude comprise entre **443 m** et **512 m**, couvre presque la totalité du bassin versant, avec **64.834 km²** soit environ **25.99%** de la superficie totale.

Tableau I.6 : Répartition des différentes tranches d'altitude

Tranches d'altitude (m)	Altitude moyenne H_i en (m)	Surface partielle		Surface cumulée A_i		$A_i H_i$
		A_i en Km^2	A_i en %	A_i en Km^2	A_i en %	
1124-1327	1226	2.73	1.09	2.73	1.094	3346.98
965-1124	1055	5.548	2.22	8.278	3.318	5853.14
880-965	933	11.28	4.52	19.558	7.839	10524.24
793-880	810	17.12	6.86	36.678	14.702	13867.2
712-793	753	25.863	10.37	62.541	25.068	19474.839
643-712	678	37.569	15.06	100.11	40.127	25471.782
576-643	610	41.75	16.73	141.86	56.869	25467.5
512-576	544	42.788	17.15	184.648	74.012	23276.672
443-512	473	64.834	25.99	249.482	100	30666.482
/	/	249.482	100	/	/	157948.84

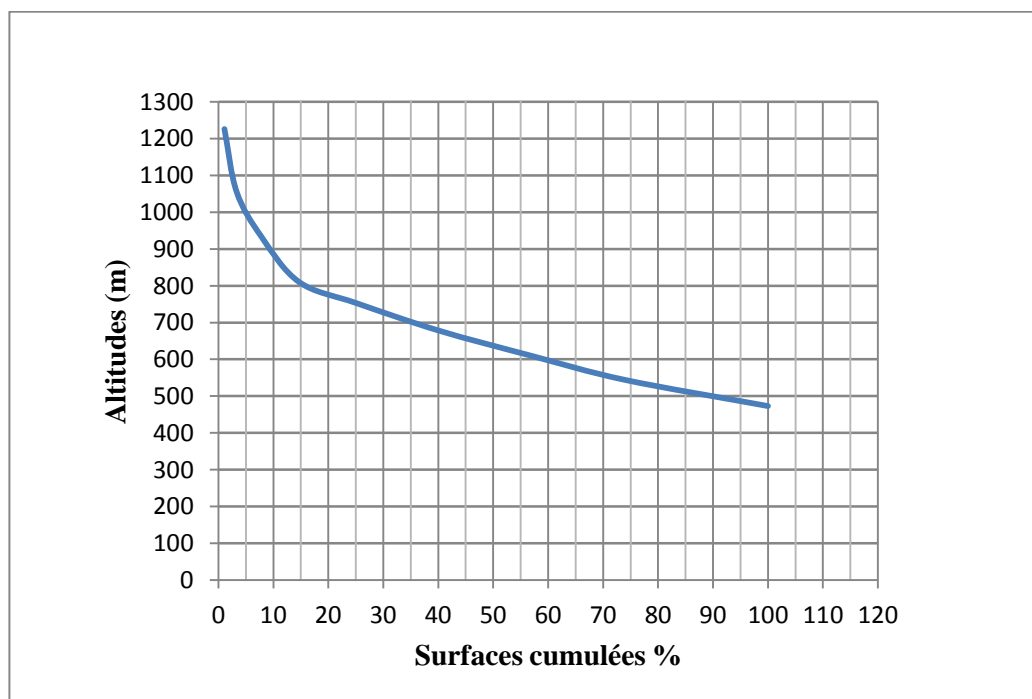


Figure I.7 : La courbe hypsométrique du sous bassin de Boussaâda

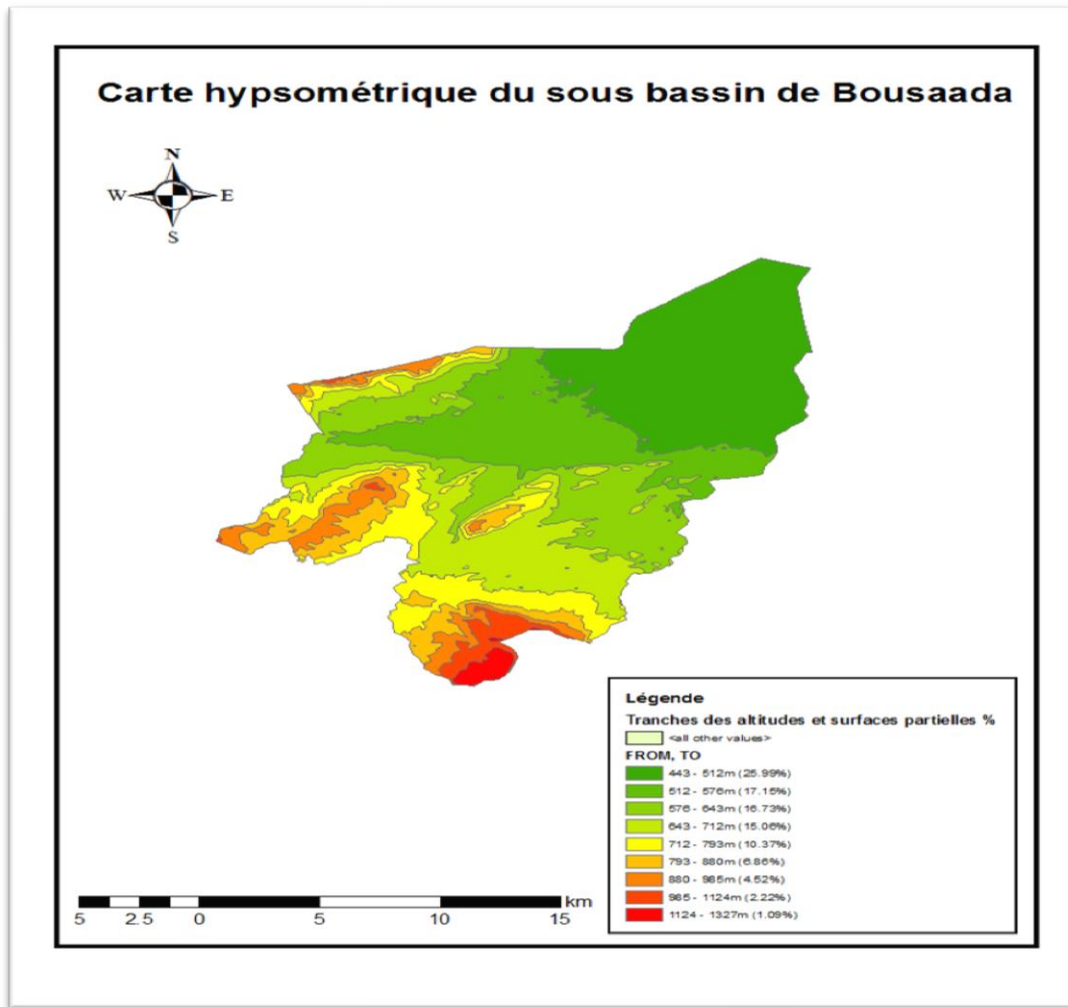


Figure I.8 : Tranches d'altitudes du bassin versant

I.3.7. Altitudes caractéristiques

La courbe hypsométrique permet de déterminer les valeurs caractéristiques suivantes :

-**Altitude maximale (H_{max})** : l'altitude la plus élevée est de l'ordre de $H_{max} = 1327 m$

- **Altitude minimale (H_{min})** : altitude minimale est de l'ordre de $H_{min} = 443 m$

-**Altitude de fréquence ($H_{1/2}$)** : l'altitude de fréquence 1/2 est de **884m**

-**Altitude moyenne (H_{moy})** : la valeur de l'altitude moyenne du sous bassin versant peut être calculée par la formule suivant :

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

Avec

H_i : Altitude moyenne de chaque classe en mètre

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

A_t : Surface totale du sous bassin en Km^2

Soit : $H_{\text{moy}} = 633.10\text{m}$

Remarque : l'altitude moyenne est supérieure à l'altitude de fréquence 1/2, ce qui montre une dissymétrie des altitudes à l'échelle du sous bassin versant.

Dénivelée simple (D) : sur la courbe hypsométrique tracée, on prend la distance verticale en (m), qui sépare les altitudes ayant 5% et 95% de la surface totale du sous bassin versant, la dénivelée simple est donc égale à : $D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1000 - 486.5 = 513.5 \text{ m}$

1.3.8. L'indice de pente

Le but de cet indice est de caractériser les pentes d'un bassin versant.

1.3.8.1. 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 :

$$I_g = D / L$$

Avec :

D : Dénivelée simple en m

L : Longueur du rectangle équivalent (km) ;

I_g : Indice de pente globale ;

Donc : $I_g = 15.06 \text{ m/km} = 0.015$

{	$I_g < 0.002$ relief très faible	}
	$0.002 < I_g < 0.005$ relief faible	
	$0.005 < I_g < 0.010$ relief assez faible	
	$0.010 < I_g < 0.020$ relief modéré	
	$0.020 < I_g < 0.050$ relief assez fort	

D'après la classification du relief par L'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), I_g étant compris entre 10 et 20 m/km, le sous bassin versant présente un relief modéré.[7]

1.3.8.2. Indice de pente de roche (I_P)

L'indice de pente de roche est calculé par l'une des deux formules suivantes :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i} (H_i - H_{i-1})$$

Avec :

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

S_i : Surface partielle correspondante(%).

Soit, **I_p=0.136**

I.3.9. Dénivelée spécifique (DS)

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'introduction le paramètre (DS).

$$D_s = I_t \sqrt{A} D_s = \frac{D}{L} \sqrt{A}$$

Donc : **D_s = 237.71m**

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM, la dénivelée spécifique du bassin de Bousaâda se trouve dans la classe R5 : caractérisée par un relief fort

Tableau I.7 : Classification de l'ORSTOM [1]

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

Puisque étant compris entre **100 < D_s < 250m**, le sous bassin versant présente donc un relief assez fort.

I.4. Les caractéristiques du réseau hydrographique

I.4.1. Densité de drainage

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

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

L_i : Longueur des talwegs en km.

$$\text{Donc : } D_d = \frac{201.31}{249.48} = \mathbf{0.80}$$

1.4.2. Temps de concentration (T_c)

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

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

Avec :

A : Superficie du sous bassin = **249.48 km²**

H_{moy}: Altitude moyenne = **1327 m**

H_{min} : Altitude minimale = **433m**

Nous obtenons : **T_c=5.867 heures=21121.2 s**

1.4.3. Vitesse d'écoulement de l'eau (v_c)

Elle est donnée par l'expression suivante.

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

Avec :

L_p: Longueur du talweg principal = 22.194 km

T_c : Temps de concentration en (s).

$$\text{Donc : } V_c = \frac{22.194}{21121.2} = \mathbf{1.05 \text{ m/s}}$$

1.4.4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de Boussaâda est marqué par deux Oueds. Oued Maitar issu du versant sud de Djebel Mobakhria, et l'Oued Boussaâda issu du Djebel Kardada (Fig. I.9).[1]

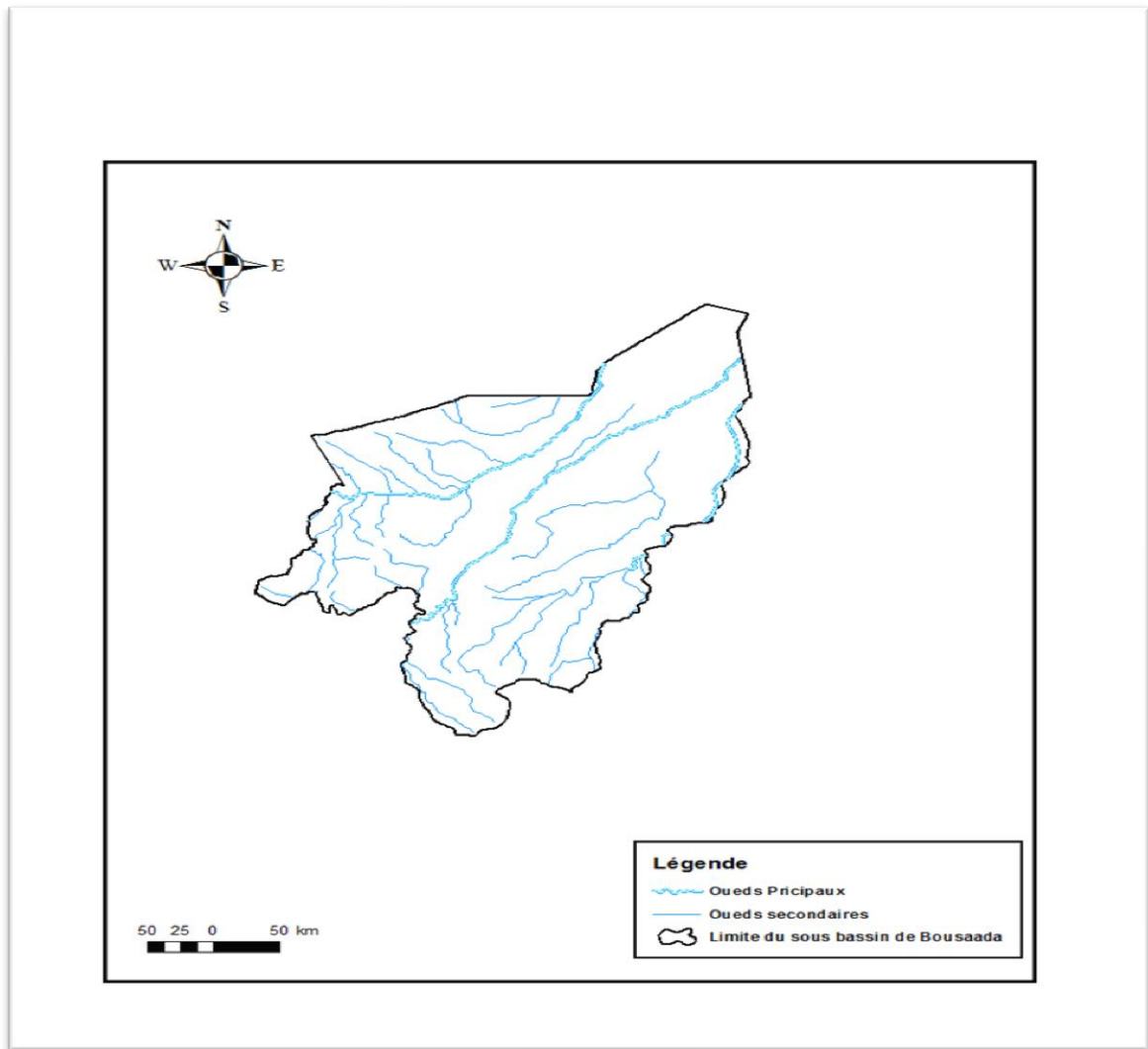


Figure I.9 : Réseau hydrographique du sous bassin de Boussaâda

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales du bassin versant de Boussaâda.

Tableau I.8: Principales caractéristiques morphométriques du B.V de Boussaâda

Caractéristiques morphométriques	Résultats	Unité	Observation
Surface	249.48	Km ²	-----
Périmètre	88.75	Km	-----
Altitude max	1327	m	-----
Altitude moyenne	633.10	m	-----
Altitude min	433	m	-----

Indice de Gravelius	1,57	-----	Forme allongée
Indice de pente globale	0.015	m/Km	Relief modéré
Longueur du rectangle équivalent	34.08	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	10.27	Km	-----
Longueur du cours d'eau principal	22.19	Km	-----
Dénivelée spécifique	237.71	m	-----
Densité de drainage	0.80	Km ⁻¹	-----
Temps de concentration	5.867	heures	-----
Vitesse d'écoulement d'eau	1.05	(m/s)	-----

1.5. Identification des sources de pollution

1.5.1. Définition

Le terme pollution peut être défini comme étant une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directs ou indirects des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel, et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives des milieux ou encore en altérant la nature [8].

1.5.2. Origine de la pollution

Polluer l'eau d'une réserve superficielle ou profonde c'est modifier ses caractéristiques naturelles (physique, chimique, biologique et bactériologique), en y rejetant certaines substances soit à l'état solides (matières en suspension) soit à l'état dissous, susceptibles de rendre l'eau impropre à toute réutilisation ultérieure.

Si l'on peut espérer arrêter la progression de la pollution industrielle, voire la diminuer dans l'absolu, la pollution domestique augmentera sans doute aussi vite que la population et les concentrations urbaines... à moins que nous ne prenions conscience du danger et acceptions de modifier notre comportement, même par de petits gestes (par exemple, éviter l'abus de détergents).

Même l'agriculture, qui est pourtant indiscutablement la gardienne de la nature, est à l'origine de

certaines pollutions. C'est le cas des gros élevages de porcs et de bovins notamment, mais surtout des engrais chimiques, des pesticides et autres produits qui protègent les cultures ou facilitent la vie des agriculteurs. Ces produits peuvent polluer les nappes d'eau par infiltration, et les rivières par lessivage et ruissellement en période de pluie.

La pollution des eaux est variable; elle peut se manifester généralement sous deux formes principales : urbaine et industrielle.

1.5.2.1. Pollution d'origine urbaine

a) Eaux usées urbaines

Les eaux domestiques, elles même divisées en eaux de vannes qui comprennent les eaux des diverses toilettes, et eaux ménagères qui englobent les autres eaux, notamment celles qui résultent des lavages.

Les matières directement liées aux excréctions humaines sont en nature et en qualité relativement constantes. Elles changent peu vis-à-vis des différents états de développement des populations concernées, avec cependant une tendance vers un enrichissement en matières azotées, et en graisses pour les niveaux de vie les plus élevés.

Les eaux usées de nature et d'origine diverses, produites dans l'espace vital de l'homme, doivent, à partir d'une certaine densité de population, être collectées et évacuées, du fait qu'elles répondent à une nécessité absolue aux plans de l'hygiène et de santé, les mesures prises dans ces domaines contribuent à élever le niveau et la qualité de vie des usagers.

L'assainissement dans le bassin de l'Oued de Boussaâda, accuse un retard notable; et le traitement des eaux usées est loin d'être satisfaisant. On note l'inexistence d'une nouvelle station d'épuration le long de la vallée.

La quantité d'eau usée domestique déversée dans l'Oued de Boussaâda et ses affluents est importante et dépasse les 16793 m³/j. Par contre le débit de l'Oued atteint les 1500 m³/s avec une vitesse considérable [8].

D'après les données du service d'hydraulique de la ville de Boussaâda, le taux de la population agglomérée raccordée au réseau d'égouts publics est de 85 % dans toute la commune.

Le réseau d'assainissement est de type unitaire et couvre la totalité du périmètre de l'ancienne ville. Les quartiers nouvellement urbanisés ne sont pas encore assainis.

Cependant il est à signaler que l'ancien réseau posé pendant la période coloniale, dimensionné pour collecter les rejets d'une population moindre à celle que compte actuellement la ville de Boussaâda est dépassé et n'arrive plus à prendre en charge les eaux usées et de ruissellement en provenance des périmètres d'extension amont qui dépassent l'aire de l'ancien périmètre urbain.

A cet effet, il est nécessaire de reprendre le dimensionnement du réseau primaire en tenant

compte des apports des nouveaux sites.

Le périmètre urbain actuel se trouve répartie sur quatre 04 bassins ayant quatre 04 rejets principaux pour se déverser dans l'Oued Boussaâda. La nouvelle zone d'habitat rejette ses eaux sur Oued Maitar.

Le site de la zone des parcs dépourvus de réseau aura comme exutoire l'Oued Boussaâda, moyennant un collecteur qui rejoint le rejet principal de la ville.

La zone urbaine est dotée de trois collecteurs principaux qui aboutissent dans l'Oued Boussaâda après la traversée de la route Nationale RN46.

Les nouveaux lotissements qui rejettent au moyen d'une conduite leurs eaux usées à l'air libre à l'Est de la zone d'activité.

Tous ces rejets qui se font dans les cours d'eau important de la ville de Boussaâda portent atteinte à l'environnement. Les risques de contamination de la nappe ne sont pas à écarter.

En plus de ces rejets, participent les rejets industriels qui sont aussi importants et dont l'exutoire principal n'est que l'Oued Boussaâda.

D'après la subdivision de Boussaâda, les capacités des réseaux actuels sont considérées insuffisantes pour prendre en charge l'ensemble des rejets d'eaux usées et pluviales suite aux extensions urbaines.

Certaines endroits de la ville subissent le problème de stagnation des eaux de ruissellement qui apparemment est dû à une mauvaise évacuation des eaux dans le réseau d'assainissement causée par probablement par le sous dimensionnements du réseau ou par les pentes de réalisation insuffisantes attribuées aux buses d'évacuation des eaux de ruissellement.

b) Les rejets solides

La quantité globale de déchets ménagers dans la vallée de Boussaâda est estimée à plus de 16431.95 t/j en 2012 et 24114.66 t/j en 2013, et un habitant de la vallée produit quotidiennement en moyenne de 0.8 Kg de déchets solides [8].

En fait, les ordures ménagères rejetées anarchiquement dans l'environnement sans études au préalable du site et de techniques de mises en décharge peuvent engendrer de graves problèmes de pollution portant atteinte même à l'esthétique du milieu, à la qualité de l'air, des eaux superficielles et souterraines. Les décharges de déchets solides se sont multipliées avec le développement urbain et industriel. Un contrôle strict des conditions d'utilisation de ces décharges sur le plan de la circulation possible des eaux est nécessaire, si l'on veut éviter la contamination des eaux surtout souterraines, à la suite d'infiltration liée à la lixiviation des dépôts.

Au niveau de la vallée de la Boussaâda, la collecte des déchets ménagers est relativement bien assurée dans la plupart des centres urbains et s'effectue dans des conditions plus ou moins acceptables. Par contre leur élimination pose le problème de protection de l'environnement dans la mesure où la mise en décharge de ces déchets s'effectue dans des conditions de précarité absolue. La commune rencontre d'énormes difficultés (absence de moyens de transport, de terrain et de financement). Des décharges non contrôlées existent un peu partout le long de l'Oued de Boussaâda.

c) Déchets hospitaliers

Les déchets ménagers de l'hôpital Rezigue El Bachir à Boussaâda et la clinique privée Sidi Thameur sont représentés dans le tableau suivant [8].

Tableau I.9 : Quantité de déchets hospitaliers

Hôpital	N de Rotation	Quantité de déchets (tonne)
Rezigue El Bachir	340	182.37
Sidi Thameur	123	37.55
Total	463	219.92

1.5.2.2. Pollution d'origine industrielle

a) Rejets liquides

Pour la plupart des industries, l'eau est un facteur de production. Elle peut être utilisée comme matière première, et être incorporée au produit fini, ou intervenir comme auxiliaire au cours du processus de fabrication. Les utilisations industrielles de l'eau sont extrêmement diversifiées.

Les établissements industriels ont des productions très diverses (aliment, vêtements, pâtes à papier, produits chimiques, matériaux etc.) et rejettent plusieurs types d'eaux usées, dont le volume et le degré de contamination sont très variables. En règle générale, on distingue les eaux de procédé, qui sont le plus souvent contaminées puisqu'elles entrent dans le processus de fabrication ; les eaux de refroidissement, plus ou moins contaminées ; les eaux sanitaires et, dans certains cas, les eaux pluviales.

Les caractéristiques des eaux de procédé sont directement fonction du type d'industrie : certaines industries n'en génèrent carrément pas ou très peu, alors que d'autres en produisent des volumes considérables, comme les fabriques de pâtes à papiers.

Parmi les polluants rejetés par les industries ou établissements assimilés, une partie non

négligeable est proche de la composition d'une eau domestique. En effet, les effluents industriels comprennent les eaux utilisées par le personnel ont pratiquement la même composition que les eaux domestiques.

L'industrie dans la vallée de Boussaâda a connu un développement remarqué tant dans sa diversité que dans sa capacité. Toutefois sur une dizaine d'unités industrielles publiques et surtout privées implantées sur le territoire de la ville, aucune industrie ne possède son propre station d'épuration.

Parmi les unités industrielles qui se trouvent au niveau de bassin versant de Boussaâda, on cite : Usine de fabrication de carrelage, usine de fabrication de cuir, usine des produits laitiers, une briqueterie ATLAS, usine de fabrication de pâte feuilletée (Dioul), usine de COMEGAZ.

b) Déchets solides

Le recensement des déchets solides générés par les unités industrielles notamment ATLAS Briqueterie et COMIGAZ selon la loi n 01-19 du 12/12/2001 qui sont situées en aval de l'Oued Boussaâda est résumé dans le tableau ci-après [8].

Tableau I.10 : Quantité de déchets solides

Etablissement	SARL Briqueterie ATLAS	SARL COMIGAZ
Types de déchets	Ménagers et assimilés	Ménagers et assimilés
Quantité générée (t/an)	10	03
Mode de traitement	Elimination + valorisation	Elimination
Entreprise chargée	Déchetterie	APC

1.5.2.3. Pollution d'origine agricole

L'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation active, il ne semble pas que cette évolution se ralentisse et l'on observe chez les autres pays une tendance croissante à la spécialisation des cultures ; une recherche des hauts rendements, une mécanisation croissante et une modification profonde des mentalités paysannes.

Parmi les inconvénients qui en résultent pour le milieu aquatique, on peut mentionner :

- L'érosion des sols par suite de monocultures trop étendues. Un article de la revue américaine "*Drinking Water Supplies*", daté de 1983, évalue les sédiments arrachés à la terre entre 1 et 3 tonnes par hectare et par an.
- L'usage des engrais chimiques au lieu des engrais naturels dont le recyclage est assuré par la nature.

Un recensement de pesticides périmés et engrais utilisés ainsi que les huileries tout le long de l'Oued de Boussaâda a été fait [8].

a) Les pesticides périmés

Dans le cadre de la protection de l'Oued contre la pollution, un recensement des pesticides a été effectué. Plus de 10 tonnes ont été recensés. Afin d'éviter toute pollution des Oueds ou des nappes phréatiques, ces pesticides périmés ont été récupérés et stockés et ce, en collaboration avec l'IPV (Institut de la protection des végétaux).

b) Les huileries

Le nombre d'huileries installées le long de la vallée de la Boussaâda est environ 14 dont 08 sont à l'arrêt (d'après les récentes données de la direction des services agricoles). Ces huileries concourent à la dégradation de l'environnement en polluant l'Oued de Boussaâda [8].

c) Les résidus d'abattoirs

Les eaux résiduaires d'abattoirs sont constituées par les effluents des salles d'abattage, de la triperie, des salles de nettoyage et des écuries. Elles sont produites lors de la saignée et du dépeçage des animaux abattus, du nettoyage des corps ou partie du corps des animaux. La charge polluante des effluents d'abattoirs dépend principalement du taux de récupération du sang, ainsi que de l'importance de la triperie [8].

Le sang est une matière organique putrescible et à ce titre, il est très polluant car il absorbe lors de sa décomposition une forte quantité d'oxygène de l'eau ; oxygène indispensable à la faune et la flore de nos cours d'eau. La vallée de Boussaâda compte quatre (04) abattoirs (dont 03 privés et 01 étatique).

I.6. Conclusion partielle

L'étude morphométrique nous a permis de déterminer un certain nombre de paramètres relatifs au bassin de Boussaâda. On peut dire qu'on est en présence d'un sous bassin allongé et de relief modéré, ayant un réseau endoréique permettant une réalimentation des nappes par infiltration. Le climat de Boussaâda est caractérisé par un climat semi-aride, sec et très chaud en été et très froid hiver.

L'analyse des quantités rejetées par les diverses sources de pollution sans un traitement préalable nous donne une idée sur les risques de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines de bassin versant de Boussaâda.

Chapitre II

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

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

II.1. Introduction

L'étude géologique et hydrogéologique nous permet d'identifier les formations perméables détritiques et les formations résistantes fissurées ou karstiques susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméables qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces formations; leurs épaisseurs, et leurs étendues. L'étude tectonique nous renseigne sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles entraînant la formation de fossés d'effondrement ou de soulèvement modifient ainsi la géométrie des couches qui va caractériser chaque type de nappe et permettent la communication probable entre les aquifères.

La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser la fonction du réservoir et son comportement hydrodynamique [9].

II.2. Aperçu géologique

II.2.1. Historique de la zone de Boussaâda

L'étymologie du mot "Boussaâda" veut dire cité du bonheur (Saada en arabe). Sa position de nœud routier a contribué à la promotion de l'oasis, mais l'histoire de la cité nous montre que sa fondation est liée à l'eau, à l'agriculture et à la croyance.

Dans cette région, l'hydraulique et la culture y étaient solidaires. À partir de là, l'oasis se développa. L'excellente position géographique de Boussaâda a permis au site depuis toujours de se présenter comme un relais routier important entre le Tell et le Sahara.[1]



Figure II.1 :Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie[1]

En se basant sur l'étude géologique qui a été faite par [Guiraud \(1975\)](#) dans le bassin du Hodna, les séries sont presque complètes [3].

II.2.2. Secondaire

a) Trias

Il se manifeste sous forme de masses plus ou moins étendues remplissant de grandes cassures. Il n'affleure que par diapirisme (DjebelKerdada). Il est formé par des argiles lie-de-vin et violettes légèrement gypseuses.

b) Jurassique

Les formations du jurassique ont une tendance carbonatée. On trouve des dolomies, des calcaires gréseux et de marnes.

c) Crétacé supérieur

Ce système a été érodé de la région, sauf le cénomanien qui est faiblement représenté sur quelques sommets des reliefs.

c.1. Cénomanien

Entre le Djebel Dalaat Ezzdin et Djebel Moubakrera à 2 Km à l'Ouest de Boussaâda, le Cénomanien est constitué par des calcaires à débris, parfois lumachelliques avec de rares interstratifications de marnes, des calcaires argileux, des marnes gypseuses et Ostréa (Exogyra) et des calcaires. L'épaisseur du Cénomanien est de l'ordre de 120 m.

II.2.3. Tertiaire

Les formations continentales du Tertiaire reposant en discordance sur les séries du Crétacé inférieure et moyen. Ce matériel provient de l'érosion des formations crétacées supérieures de l'Atlas Saharien. Elles sont constituées de conglomérats, des sables, des galets, des graviers et des passées marneuses. La puissance du tertiaire est de 200 m environ. Cette description a été faite à partir du forage implanté dans la partie Sud d'Ain Diss aux coordonnées Lambert : X= 643.500 et Y=220.600.

II.2.4. Quaternaire

Constitue de galets des sables des graviers, des marnes, des limons, des argiles et des gypses. L'épaisseur du Quaternaire est croissante du Sud au Nord de 14 à 123 m proche du Chott.

a) Terrains du Chott

Ce sont des limons de couleur gris à cristaux à l'association de cristaux de gypse type (roses des sables).

b) Dunes

N'existant que dans la partie Nord de la région. Strictement limités à la cuvette des Oueds Temsa- Maiter et à la plaine bordière du Chott El-Hodna. Ce sont des sables quartzeux fins de

couleur ocre relativement chargés en matériel argileux. Ils proviennent de l'érosion des grès Barrémiens et Albiens qui affleurent largement.

c) Cônes de déjections

Les plus importants sont situés sur le flanc Nord du Djebel Tsegna et sur le versant SE du Djebel Fenane, constituants de large glacis caillouteux qui, à leur base, s'inter-stratifient dans les limons des nappes alluviales anciennes.

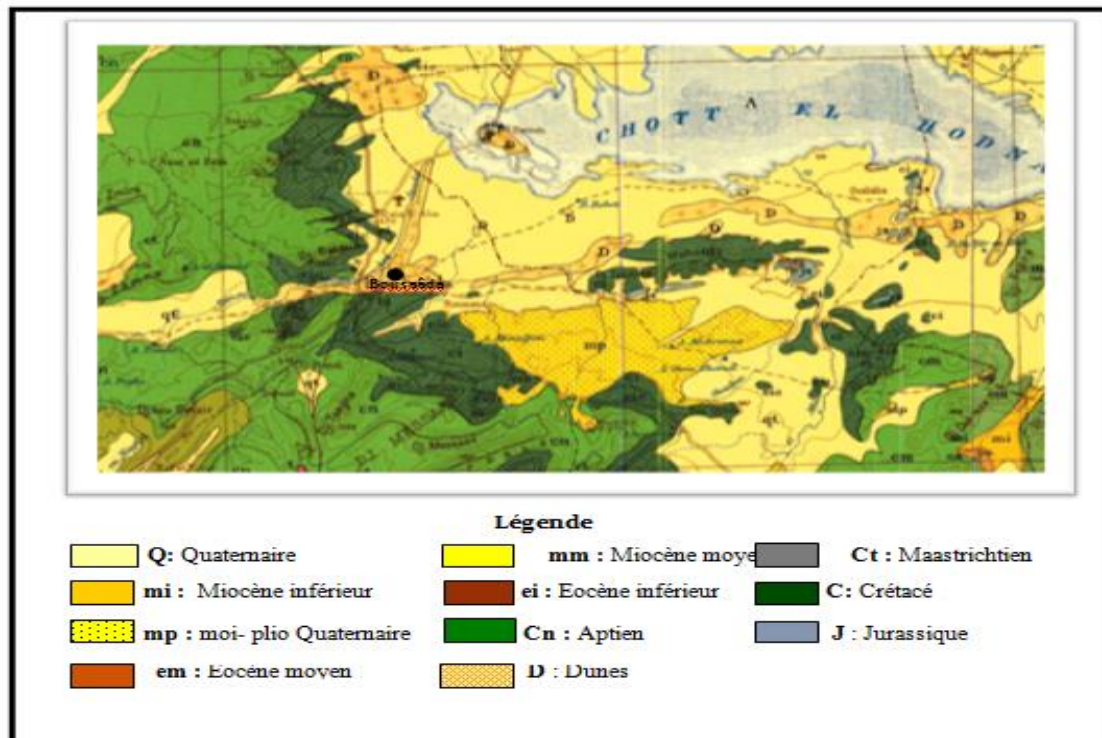


Figure II.2 : Carte géologique de la zone d'étude (Extrait de la carte géologique de l'Algérie. D'après M.J. Flandrin) [3].

II.2.5. Interprétation de la colonne litho-stratigraphique

La lithologie et les caractères hydrodynamiques (perméabilité) constituent les points les plus importants qui peuvent nous aider à tirer les formations susceptibles de renfermer des nappes aquifères, et à partir de ces paramètres on peut classer les formations en trois catégories :

- 1- Les formations favorables de constituer des aquifères poreux.
- 2- Les formations favorables de constituer des aquifères karstiques.
- 3- Les formations imperméables qui jouent le rôle des limites étanches entre les aquifères.

1) Les formations favorables de constituer des aquifères poreux

- a) Les alluvions récents et anciennes du Quaternaire.
- b) Les conglomérats et argiles sableuse du Tertiaire continental.
- c) Les grès et les dolomies du Barrémo-Bedoulien.

2) Les terrains favorables de constituer des aquifères karstiques

- a) Les calcaires à débris du Cénomanien.
- b) L'Albien supérieure avec les calcaires et les calcaires dolomitiques.
- c) Les calcaires du Gargasien.
- d) Les calcaires dolomitiques et les dolomies du Valanginien-Hautérvien et les calcaires Zoogènes du Rhétien.
- e) Les calcaires du Jurassique .

3) Les formations imperméables qui jouent le rôle des limites étanches entre les aquifères

Le système hydraulique de la région de la plaine est formé par des nappes superposées (séparées entre-elles par des horizons imperméables et semi-perméables). Ce sont essentiellement les argiles, les marnes et les marnes gypseuses, les gypses et les argiles versicolores gypseuses qui forment ces horizons (*Amroune et al, 2000*).[3]

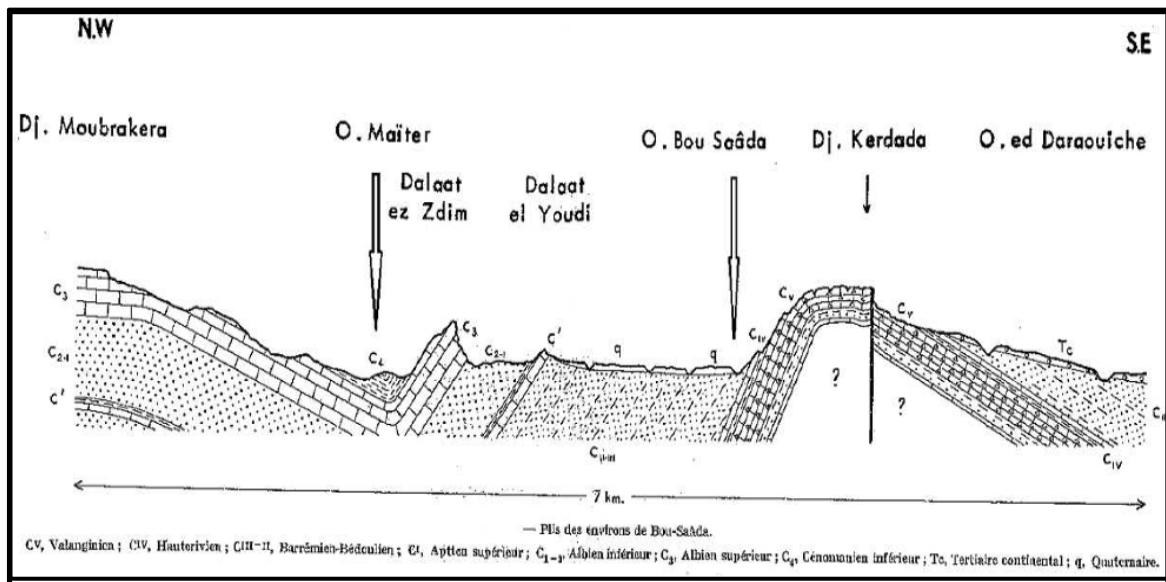


Figure II.3 : Coupe géologique de la zone de Boussaâda[1]

II.3. Aperçu hydrogéologique

La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure et de schématiser la fonction du réservoir et son comportement hydrodynamique. Ces cartes sont de deux types : structurales et piézométriques.

II.3.1. Zone de Boussaâda

Les principaux aquifères de ce secteur sont les formations conglomératiques et sableuses du Miopliocène continental, qui drainent l'ensemble des formations perméables crétacées encaissantes, dont la plus importante est l'Albien. Ce dernier possède un vaste impluvium qui s'étend à l'Ouest, où il affleure à des altitudes plus élevées où s'effectue la recharge de l'aquifère. L'Albien renferme une nappe qui s'écoule dans les formations tertiaires, mais

également en profondeur vers le Chott, pour alimenter des sources artésiennes, dont l'Ain Zira (20 L/s) au NE de Beniane, située dans un îlot de grès Albien. Les eaux de l'Albien s'écoulent aussi au pied de falaises par des sources de débordement, telles Ain Koucha et Ain Diss [10].

I.3.1.1. Les cartes structurales

- ✓ Les cartes en courbes isohypses ou isobathes représentent la morphologie et la position des surfaces limites.
- ✓ Les cartes en courbes isopaches donnent les épaisseurs, elles constituent la base du calcul de la réserve en eau souterraine.

Compte tenu de l'indisponibilité d'une étude géophysique de la région, l'évaluation des épaisseurs et des surfaces limites des aquifères sera estimée à partir de la carte géologique.

Dans le même contexte, il est nécessaire de signaler qu'aucune analyse granulométrique relative au recouvrement quaternaire n'a été effectuée, par conséquent, le coefficient d'emmagasinement ne sera déterminé qu'à partir des essais de débits.[11]

II.3.1.2. Les cartes piézométriques

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

II.3.2. Inventaire des points d'eau

Pour tracer les cartes piézométriques et cerner du fonctionnement de la nappe dans la zone d'étude, nous avons effectué une campagne de mesure en 2019, pour 8 points d'eau (Tableau II.1 et Fig. II.4).

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

N°	Point d'eau	X(UTM)	Y(UTM)	Z(m)	Niveau piézométrique
1	F.Maïter3	601048	3897844	626	18
2	F.Maadhher232	612366	3900254	510	14.82
3	F.Maadhher233	613031	3901145	508	47.35
4	F.Maadhher2	613723	3902057	499	50.44
5	F.Maadhher.Kariat	613898	3904707	486	49
6	F.Maadhher1.F1	616038	3904122	512	50.44
7	F.R.Biskra	611250	3898314	527	19
8	F.R.D'Alger	605520	3902873	628	52.08

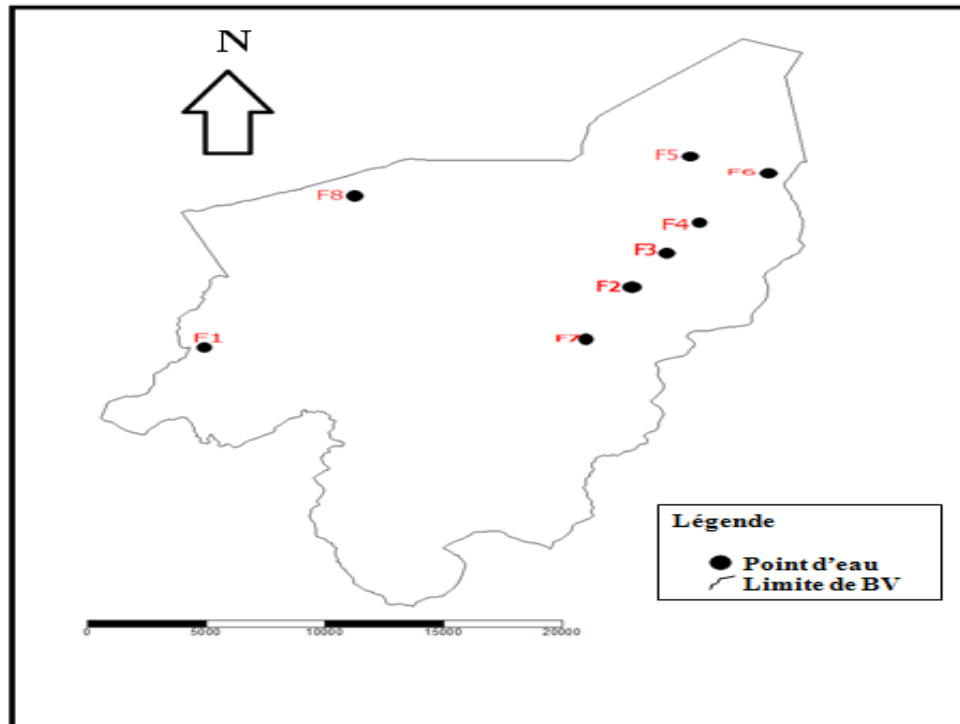


Figure II.4 : Carte de position des points d'eaux

II.3.3. Etude piézométrique

Afin d'étudier le comportement de la nappe superficielle du Quaternaire de la plaine de Boussaâda, on a effectué une campagne de mesures. Les niveaux piézométriques mesurés ont permis de tracer la carte piézométrique de 2019 (Fig. II.5).

II.3.3.1. Interprétation de carte piézométrique

L'établissement des cartes piézométriques est effectué par le logiciel surfer.10. L'analyse morphologique de la surface piézométrique d'une carte doit obligatoirement passer par l'habillage de carte piézométrique qui consiste à tracer les lignes de courant, le fléchage de ces lignes de courant, repérer les axes principaux des flux et les lignes de partage des eaux souterraines délimitant les bassins hydrogéologiques [1].

L'examen de la carte piézométrique nous permet de dire que la nappe a gardé la même structure et l'écoulement, et orienté suivant trois directions vers la dépression (Chott-El-Hodna) et à partir de trois parties, durant la période de mesure.

- *La première partie* : est caractérisée par des courbes divergentes se dirigeant vers la dépression (Chott-El-Hodna) et s'écoulant dans la direction (Ouest à Nord- Est).
- *La Deuxième partie* (centre de zone d'étude) est caractérisée par des courbes serrées, ce qui correspond à un gradient hydraulique fort et l'écoulement est de direction (Sud- Ouest à Nord-Est).

- La Troisième partie est caractérisée par des courbes à espacement croissant de plus en plus en allant vers la (Nord- Est), et l'écoulement se fait de l'Est au Nord -Est.

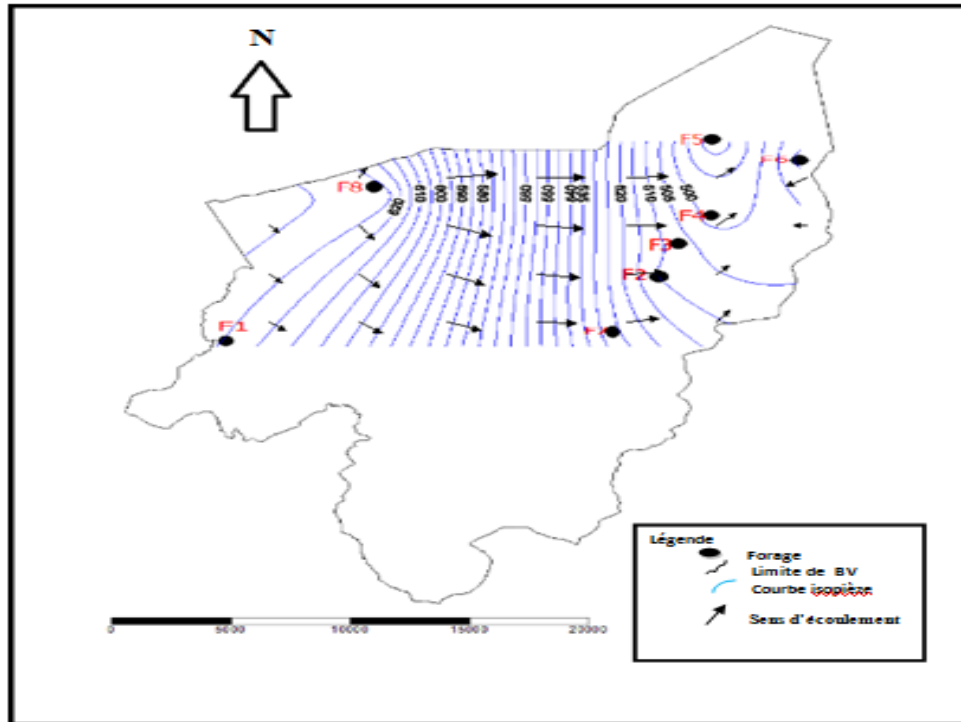


Figure II.5 : Carte piézométrique

II.4. Conclusion

La détermination des différents endroits favorable à l'implantation des forages est basée sur une bonne connaissance de la géologie locale et des formations géologiques susceptibles d'être aquifères de la zone d'étude. Le sous bassin présente des conditions favorables pour l'accumulation des eaux souterraines, à partir des bords de la plaine ouaffleurent des barres carbonatées, tels que les calcaires et les dolomites. Les formations prédominantes sont celles du Quaternaire et celles du Crétacé représentées par l'Aptien et le Barrémien. Cependant les argiles et les marnes gréseuses localisées dans la partie Sud de la zone d'étude et les formations de calcaires sont assez peu représentées à Djebel Kerdada[1].

L'analyse des cartes piézométriques de notre zone d'étude montre que:

- Les zones correspondantes à des horizons à fort écoulement avec les directions de l'écoulement, Ouest à Nord -Est, Sud- Ouest à Nord - Est et Est –Nord-Est.
- L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent la plaine de Boussaâda, où les axes d'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sont orientés vers la dépression Chott-El-Hodna.

Chapitre III

Etude hydrochimique des eaux

Chapitre III: Etude hydrochimique des eaux

III.1. Introduction

L'étude de l'hydrochimie des eaux souterraines fournit beaucoup d'informations utiles pour comprendre les phénomènes qui se produisent dans les systèmes aquifères. Cela signifie des échanges potentiels entre l'eau et les roches, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition d'éléments chimiques par dissolution et altération des minéraux dans le réservoir.

L'étude de la chimie des eaux souterraines permet également de suivre le développement spatial de divers éléments dissous, d'estimer leur source, d'estimer la profondeur de circulation de l'eau et d'évaluer la qualité de l'eau en relation avec l'eau potable et l'irrigation.

Pour pouvoir analyser ces données et en ressortir le plus d'information en peu de temps, nous avons utilisé des outils et méthodes efficaces et rapides.

Le principal outil utilisé est le logiciel "DIAGRAMMES" (*Piper, Schöeller-Berkaloff, ...*) créé par Roland Simler du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (France). C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau [12].

Nous avons donc entrepris d'étudier les résultats des analyses chimiques de la campagne d'échantillonnage de l'eau au cours de l'année 2019 au niveau de huit (8) forages situés à Boussaâda. Pour ce fait, une étude statistique a été menée par les méthodes d'Analyse en Composantes Principales (ACP), de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et d'Analyse Factorielle de Correspondance (AFC) pour la détermination et la classification de la qualité chimique de l'eau de la région.

III.2. Calcul de la balance ionique

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

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

Avec

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

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

Cette relation permet de définir trois classes :

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

Le calcul de cet indice ([Tableau III.1](#)) nous a donné les résultats qui se résument comme suit : 2 bonnes analyses et 6mauvaises analyses.

Tableau III.1 : Résultats du calcul de la balance ionique des eaux souterraines de Boussaâda

Nom des points d'eau	Somme des cations (meq/L)	Somme des anions (meq/L)	Balance ionique (%)	Résultat d'analyse
F1	19.135	25.330	14	Mauvaise
F2	35.966	34.370	2	Bonne
F3	19.958	26.444	14	Mauvaise
F4	18.142	22.757	11	Mauvaise
F5	19.937	19.437	1	Bonne
F6	19.946	24.312	10	Mauvaise
F7	17.938	15.671	7	Mauvaise
F8	9.575	15.457	23	Mauvaise

III.3. Corrélation entre les cations et les anions

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

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

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 : $y = 0.735x + 8.2$ et un coefficient de corrélation $R^2 = 0.741$. Les pourcentages obtenus sont : 25% de bonnes analyses, 75% qualifié de mauvaise analyse). Les 8 échantillons seront utilisés dans cette étude.

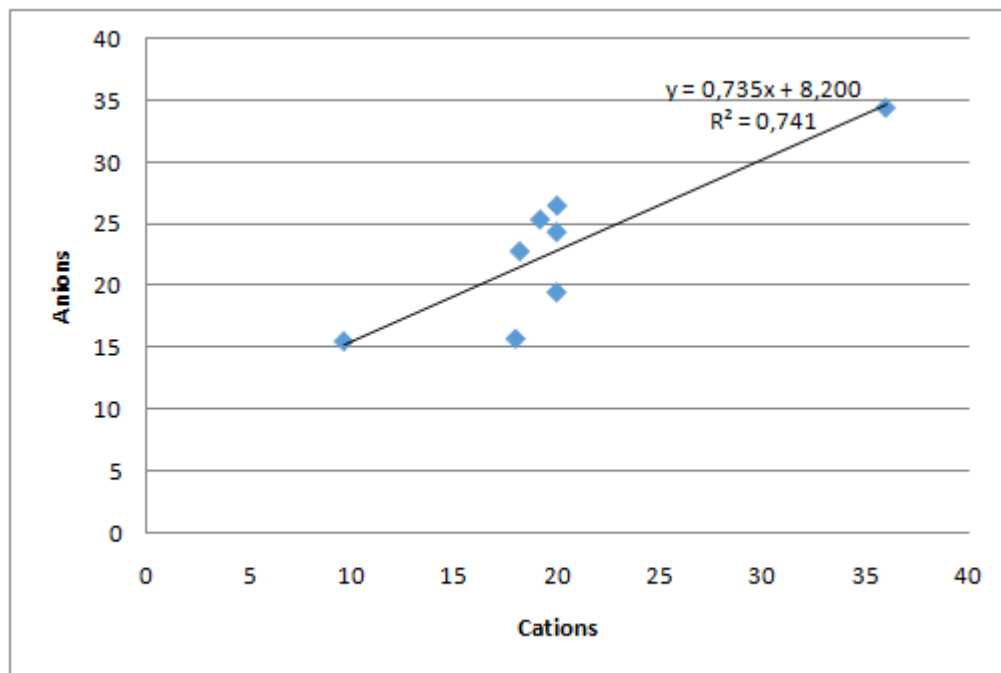


Figure III.1 : Corrélation entre les cations et les anions

III.4. Interprétation des données

III.4.1. Mesures au laboratoire

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

Tableau III.2: Résultats des mesures des paramètres physiques

Point d'eau	T (°C)	Cond (µs/cm)	TDS (mg/L)	Sal (%)	pH	RS(mg/L)	TAC (°F)	TH (°F)
Norme	/	<2800	/	/	6.5-9.2	<2000	20-35	10-50
F1	23	1790	746	0.9	7.29	1356	32	96
F2	21	2110	920	1.2	7.31	1600	25	180
F3	9.2	1569	/	1.1	7.24	1188	30	100
F4	17.3	1575	/	0.9	7.09	1193	30	84
F5	13.8	1273	659	0.8	7.4	965	18	100
F6	17.3	1986	/	1.2	7.19	1505	23	100
F7	16.3	1820	/	1.1	7.62	1379	25	89
F8	30.5	981	351	0.4	7.91	743	30	48

III.5. Etude des paramètres physico-chimiques

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

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

Deux méthodes ont été utilisées pour ces analyses :

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

Pour les éléments Na^+ et K^+ l'analyse n'a pas été effectuée par la méthode de la spectrophotométrie d'absorption atomique à cause de l'absence des produits de dosage de ces derniers.

III.5.2. Etude des paramètres physiques

III.5.2.1. Carte du titre hydrotimétrique (TH)

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

L'analyse de la carte de teneur en TH montre que la forte concentration est enregistrée au Centre-Est de la plaine au niveau du forage (F2 : 180°F). La concentration la plus faible est marquée dans la partie Nord-Ouest de la zone d'étude (F8 : 48°F). Les parties Nord et Sud sont caractérisées par des teneurs moyennes variées de 80°F à 200°F.

Les teneurs sont élevées et dépassent la norme de l'OMS (50 °F) sauf celle enregistrée à la partie Nord-ouest au niveau du forage N° 8.

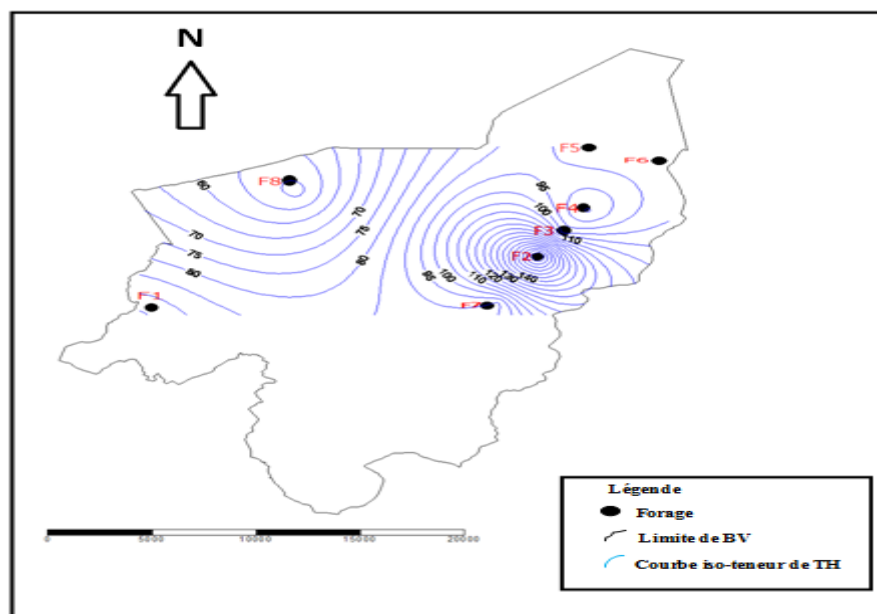


Figure III.2 : Carte du TH

III.5.2.2. Carte du pH

Le potentiel hydrogène (pH) est une mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+) en solution. Il représente l'acidité ou l'alcalinité du milieu.

L'analyse de la carte montre que les valeurs élevées du pH se trouvent au Centre –Sud au niveau du forage (F7 : 7.62) et à l'Est au niveau du forage (F 8 : 7.91) de la zone d'étude. Toutes les teneurs du pH sont dans la norme de la potabilité (6.5 – 9.2).

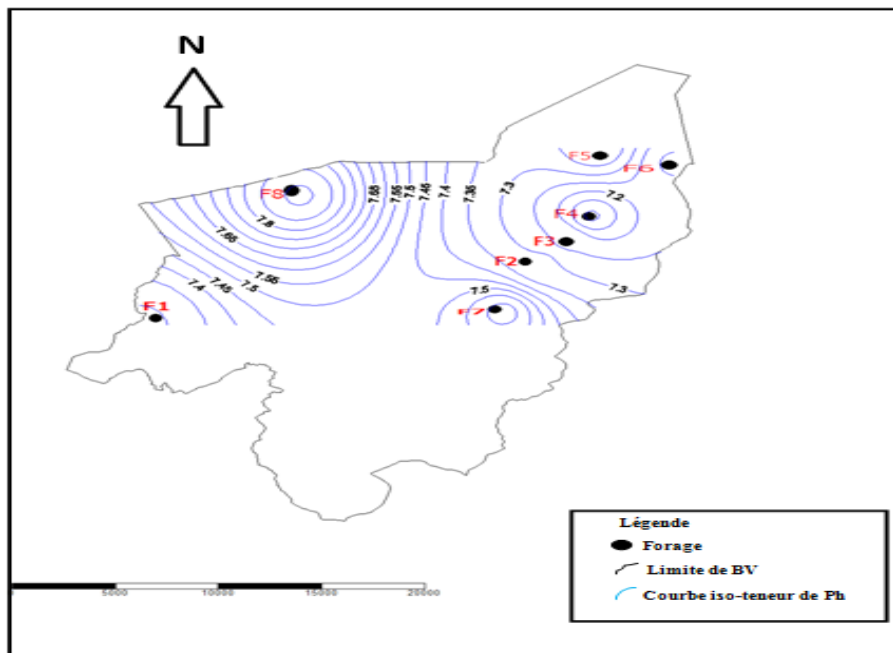


Figure III.3 : Carte du pH

III.5.2.3. Carte de conductivité (CE)

La conductivité d'une eau augmente avec sa teneur en sels dissous, elle permet donc une estimation de la minéralisation. Elle est considérée comme étant la propriété que possède l'eau à permettre au courant électrique de passer.[1]

Les conductivités enregistrées au niveau des eaux souterraines sont relativement moyennes (entre 981 $\mu S/cm$ et 2110 $\mu S/cm$). La valeur la plus élevée a été enregistrée au niveau du forage (F2 : 2110 $\mu S/cm$), mais elle est dans la norme de potabilité (2800 $\mu S/cm$).

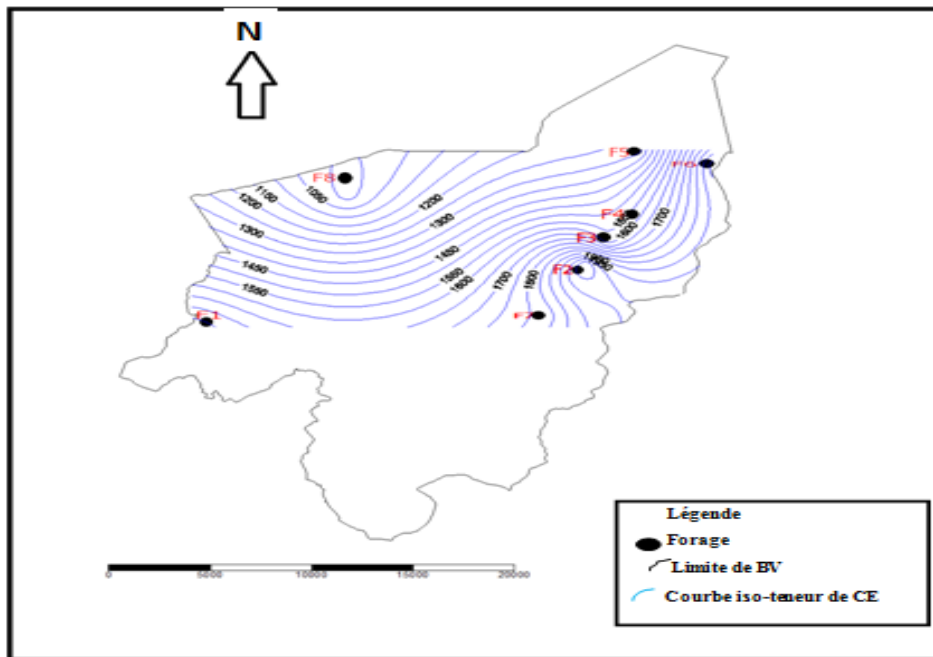


Figure III.4 : Carte de la conductivité

III.5.2.4. Carte du résidu sec (RS)

Le résidu sec (RS) est mesuré après évaporation de l'eau filtrée et étuvée (séchage) à 180°C- permet d'évaluer la teneur en matières dissoutes. Il permet donc d'approcher la valeur de la minéralisation.

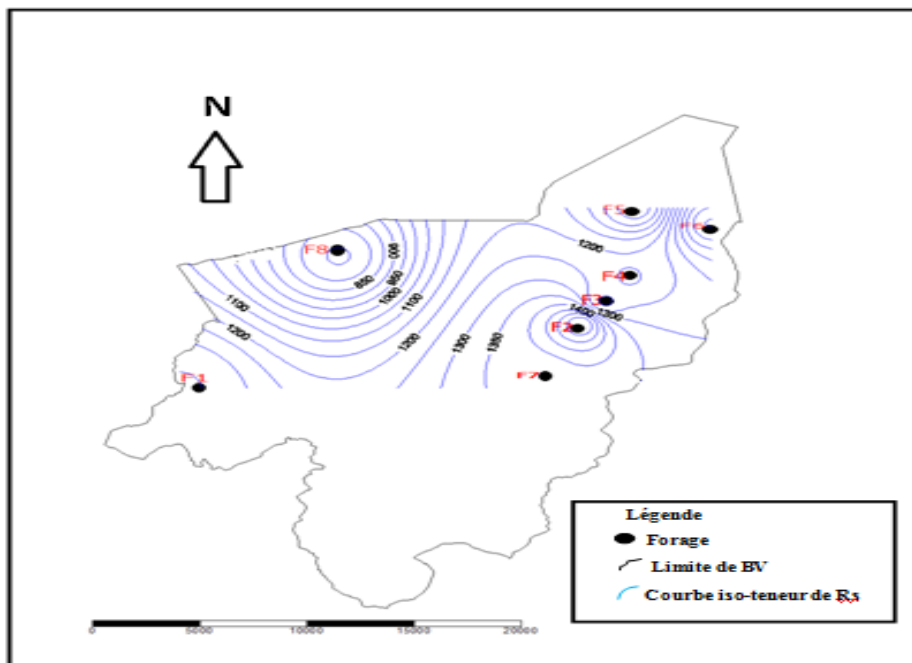


Figure III.5 : Carte du RS

D'après le carte des résidus secs, on remarque que les fortes concentrations sont localisées au niveau d'El-Maadhar (Nord-est et Centre -Est). Elles diminuent au niveau de Route d'Alger (Ouest). Les valeurs sont comprises entre 743 et 1600 mg/L (<2000 mg/L).

III.5.3. Etude des paramètres chimiques

III.5.3.1. Répartition et évolution des éléments majeurs

Les concentrations des principaux éléments chimiques sont reportées dans le tableau suivant.

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

Tableau III.3: Résultats d'analyse des eaux (2019)

Point d'eau	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
F1	601048	3897844	626	240	87	390	118	680	90
F2	612366	3900254	510	480	146	305	442	760	67
F3	613031	3901145	508	240	97	366	59	830	93
F4	613723	3902057	499	230	81	366	88	640	59
F5	613898	3904707	486	200	212	220	135	500	100
F6	616038	3904122	512	248	92	280	77	750	120
F7	611250	3898314	527	216	87	305	88	350	56
F8	605520	3902873	628	88	63	366	70	350	12.2
Norme	/	/	/	200	150	/	200	200	50

III.5.3.1.1. Carte iso-teneur de calcium (Ca²⁺)

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 (CaSO₄, 2H₂O) 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.[14]

L'examen de carte (Figure III.6) montrent que les concentrations en Ca^{++} présentent des valeurs supérieures à la norme de potabilité (200 mg/L) sauf en deux points (Route Alger au niveau du forage 8 et Madher1 au niveau du forage 5) d'origine possible de la dissolution des formations minérales et des eaux d'irrigation et usées (terrains agricoles, Oueds Boussaâda et Maitar) .

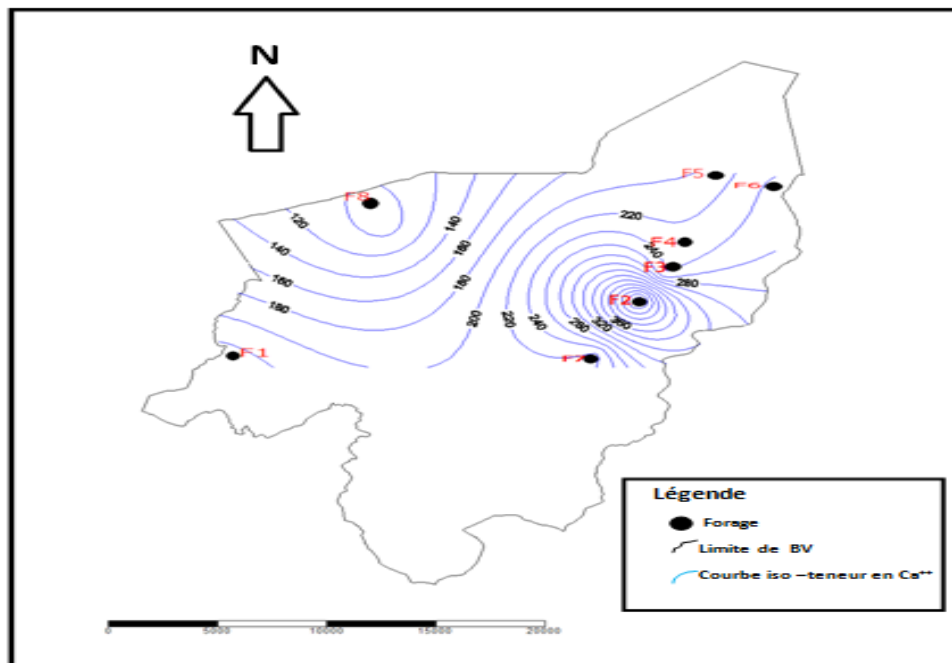
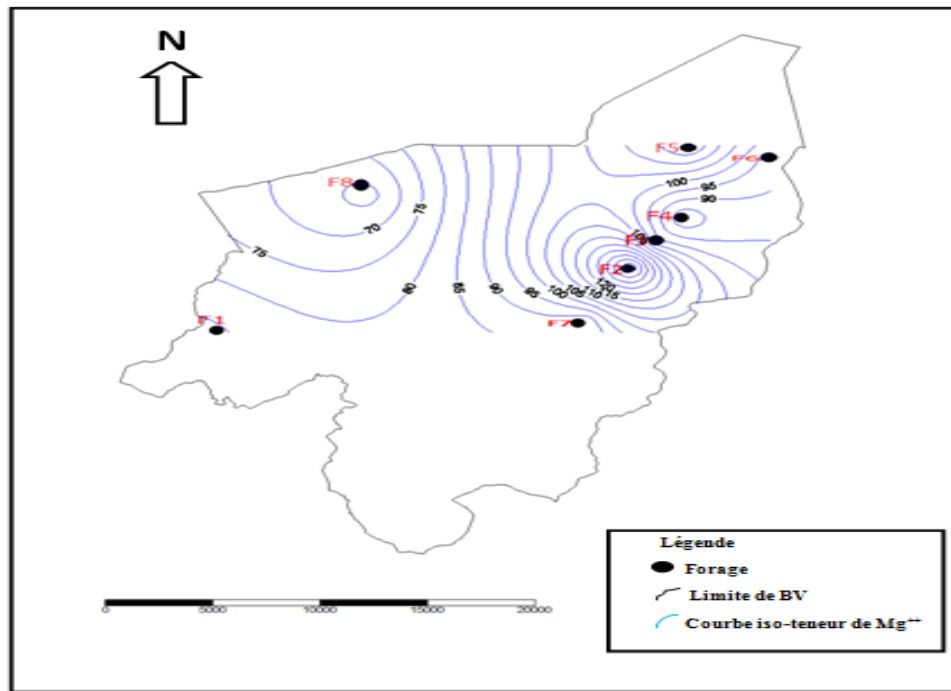


Figure III.6 : Carte du Ca^{2+}

III.5.3.1.2. Carte iso-teneur du magnésium (Mg^{2+})

La majorité des eaux souterraines dans les régions arides et semi-arides présentent des teneurs en magnésium assez importantes. La teneur en magnésium dépend, comme celle du calcium, de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Le magnésium dans l'eau provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution de magnésium sous forme de carbonate, de bicarbonate et de magnésite.[15]

L'analyse de la carte montre que les valeurs des teneurs en magnésium sont dans la norme de potabilité, sauf la teneur enregistrée au Nord-Est au niveau de forage (F5 : 212 mg/L). Les données montrent que les valeurs des concentrations élevées sont enregistrées au Centre - Est et au Nord - Est de la zone d'étude. Cela est dû vraisemblablement à la solubilité des roches silicatées et d'origine calcaire.

Figure III.7 : Carte du Mg^{2+}

III.5.3.1.3. Carte iso-teneur des Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates sont essentiels aux végétaux et améliorent le rendement agricole. Ils entrent aussi dans la composition des engrais chimiques et naturels (fumiers). Comme ils peuvent devenir néfastes pour les plantes et les êtres vivants s'ils sont trop abondants. Ils sont hydrosolubles et la partie non assimilée par les plantes se diffuse et s'infiltré dans les sols pour atteindre les eaux souterraines. La présence d'un excès de nitrates dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole (engrais), urbaine (dysfonctionnement des réseaux d'assainissement) ou industrielle.[14]

Les concentrations en nitrates sont de **(12.2 mg/L)** au Nord-Ouest de la zone d'étude (Route d'Alger), de **90 mg/L** au Sud-ouest (zone de Maïtar), et de **56 mg/L** au Sud -Est (Route Biskra). Les teneurs en nitrates varient de **50 à 150 mg/L** du centre au Nord-Est (la zone d'El-Maadhar).

Les teneurs élevées des nitrates au Nord-Est (zone d'El-Maadhar) sont en liaison avec la répartition des terrains agricoles d'où l'utilisation des engrais et le rejet des eaux usées de l'agglomération dans des fosses septiques ; ce qui influence la qualité des eaux souterraines. La diminution de la teneur en nitrates dans le sens de l'écoulement dû à la dilution de ces dernières. En gros, toutes les teneurs dépassent la norme de l'OMS (50 mg/L) hormis la valeur enregistrée au niveau du forage N° 8.

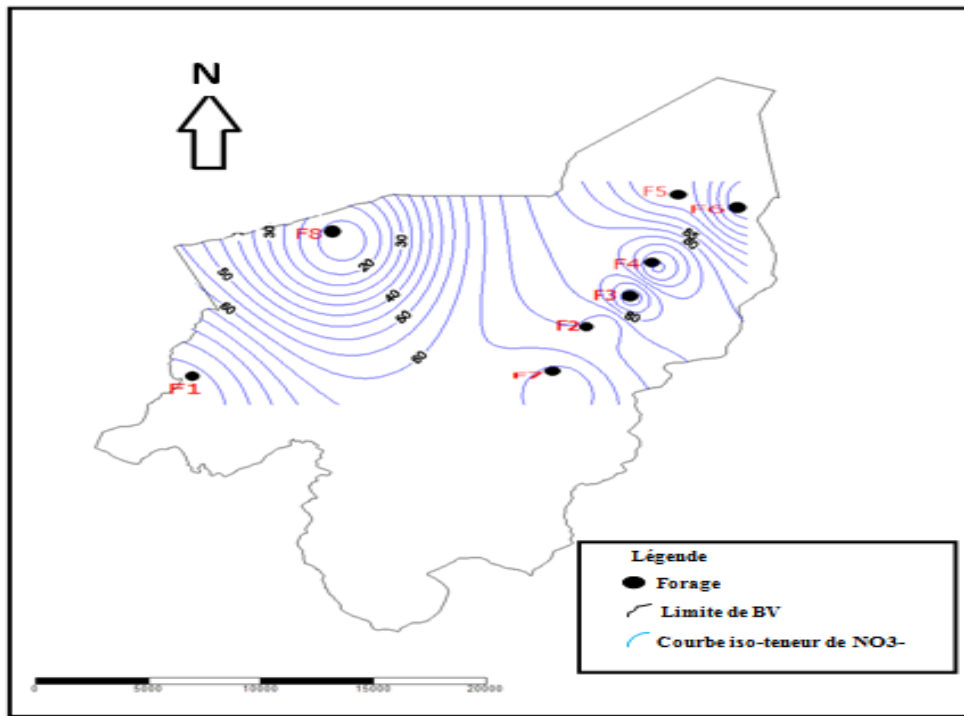


Figure III.8 :Carte des NO_3^-

III.5.3.1.4.Carte iso-teneur en bicarbonates (HCO_3^-)

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

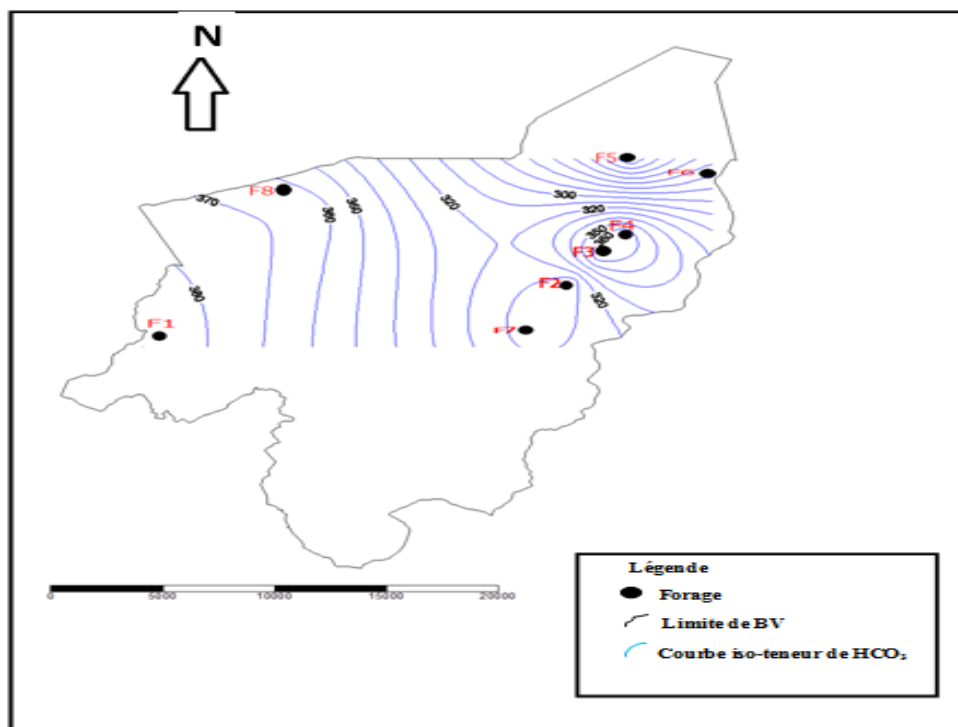


Figure III.9 :Carte des HCO_3^-

La concentration élevée est enregistrées au niveau de Maitar (F1 : 390mg/L) dans le sens d'écoulement. Cela renseigne sur la dissolution des formations carbonatées, représentées par l'Aptien calcaire.

III.5.3.1.5. Carte iso-teneur en sulfate (SO_4^{2-})

Les sulfates contenus dans l'eau souterraine résultent de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'utilisation des engrais chimiques, le lessivage des terrains argileux et marneux.

Elles proviennent également des eaux usées industrielles. De plus l'oxydation de H_2S et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère entraîne lors de précipitation l'acidification des lacs et des rivières, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sulfates. La forte concentration en sulfates provoque de troubles gastro-intestinaux; aussi elles peuvent donner un goût désagréable à l'eau et créer des dépôts tenaces dans les chaudières [16].

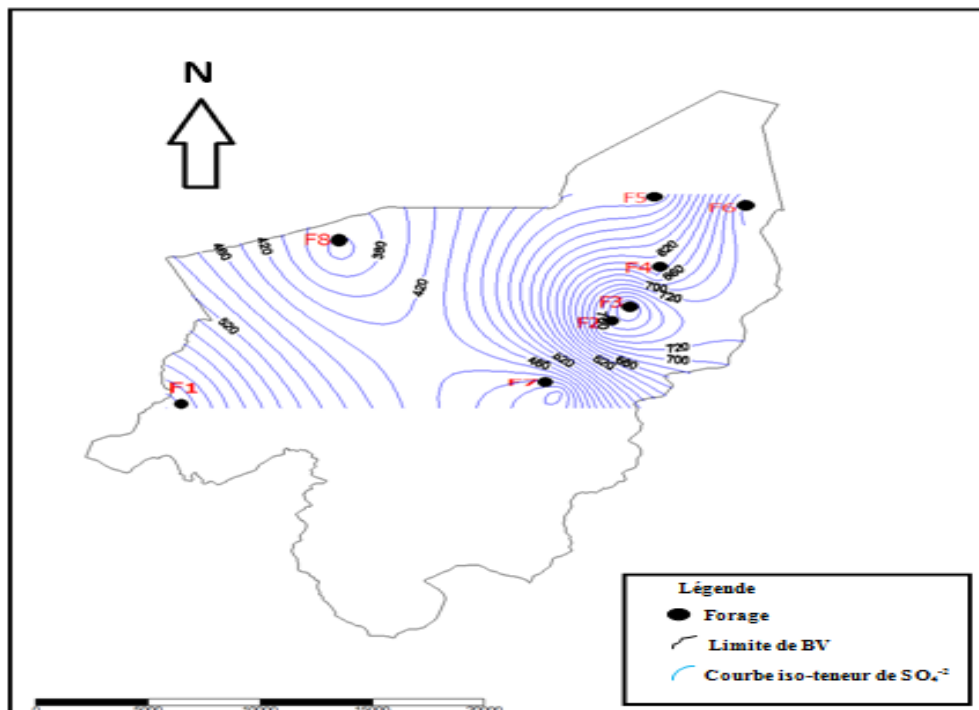


Figure III.10 : Carte des SO_4^{2-}

Les fortes concentrations en sulfaté sont localisées au Nord-est (Nord d'El-Maadhar) et Sud-ouest (Maitar). Elles varient de **350 à 830 mg/L**. Ces concentrations sont le résultat de la dissolution des marnes et des argiles appartenant à la série des alternances calcaires et marnes de la zone d'étude ainsi en présence des terrains agricoles d'où l'utilisation des engrais et les fumiers. Tous les points d'eau ont des teneurs en sulfates dépassant la norme de potabilisation.

III.5.3.1.6. Carte iso-teneur en chlorure (Cl^-)

Les chlorures peuvent provenir d'une intrusion d'eau marine, ou suite à l'action humaine à partir du soulage des routes, ou par contamination des eaux usées. Ils peuvent provenir également de la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion dans les canalisations et les réservoirs. L'éloignement de la mer, et l'absence des rejets d'origine industrielle laissent supposer une origine géologique en relation avec les formations argileuses, marneuses et salifères triasiques.[14]

Les fortes concentrations apparaissent dans la partie Nord-est de la zone d'étude (El- Maadhar) et la partie Sud-Ouest (Maiter), suite possiblement à la dissolution des formations carbonatés, et lessivage des terrains argileux et les marneux. Globalement, toutes les teneurs sont au-dessous de la norme de l'OMS, à part le forage 2 (F2 : 442 mg/L).

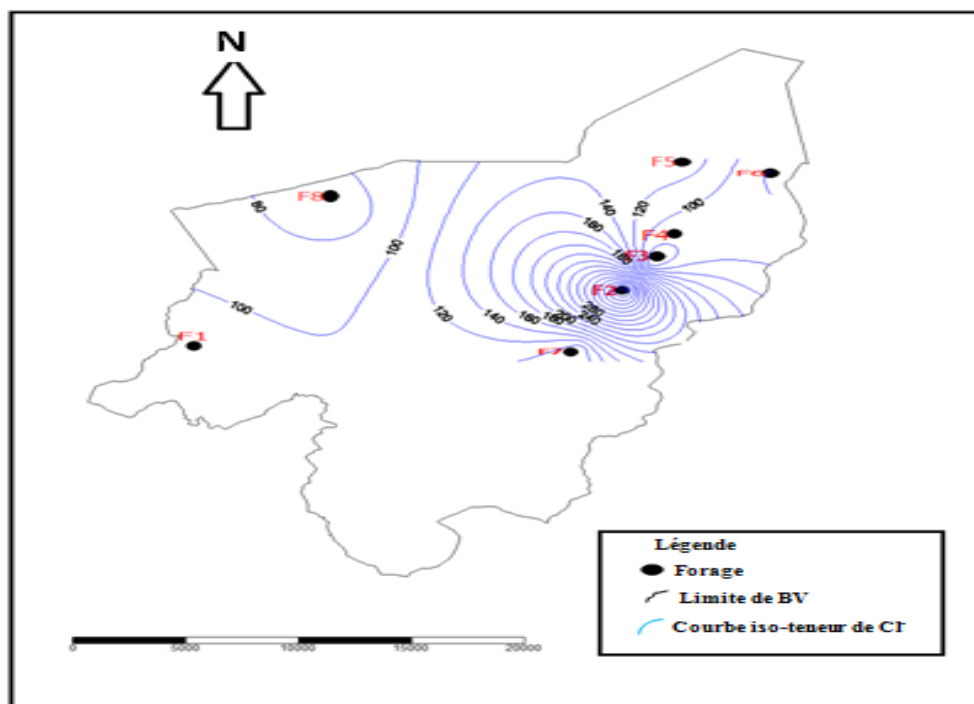


Figure III.11 : Carte des Cl^-

III.5.4. Représentation graphique des faciès chimiques

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

- le diagramme de Piper,

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

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

III.5.4.1. Diagramme de Schöeller-Berkaloff

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

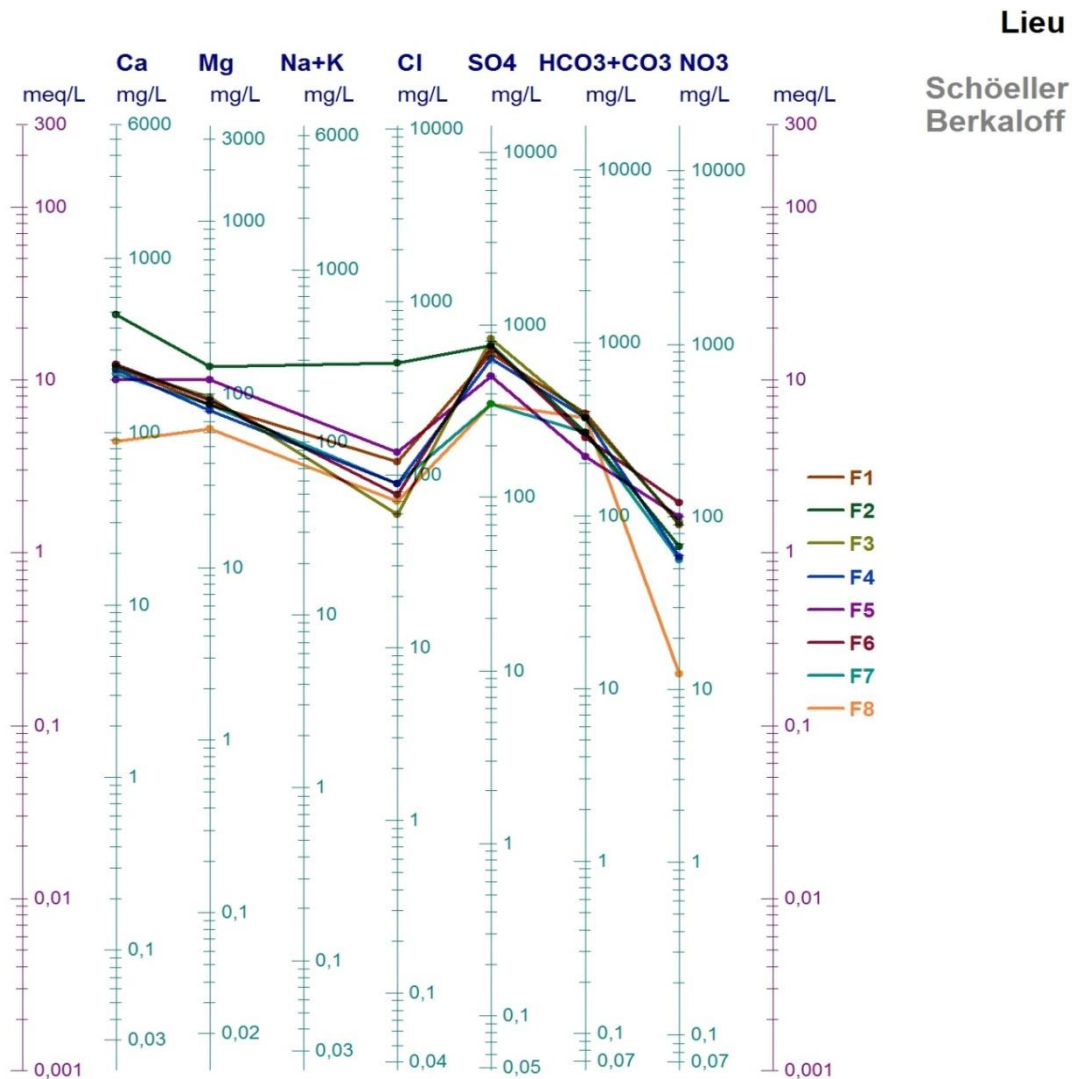


Figure III.12: Diagramme de Schöeller-Berkaloff

L'analyse des diagrammes de Schöeller – Berkaloff (Fig. III.12) montre que la majorité des eaux de la zone d'étude donne des faciès chimiquesulfaté calcique et magnésien.

III.5.4.2. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

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

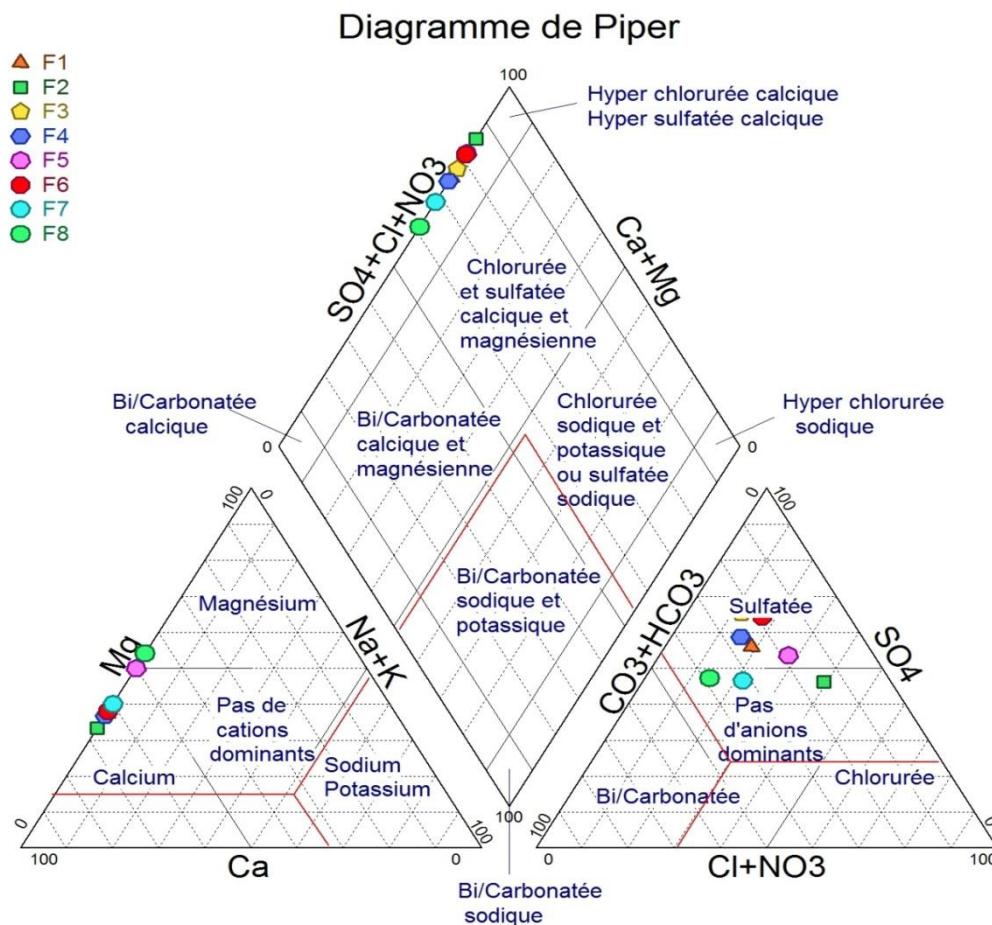


Figure III.13 : Diagramme de Piper

III.6. Qualité chimique des eaux

III.6.1. 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 physico-chimiques, bactériologiques et organoleptiques. 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 chimique a été prise comme critère de potabilité tout en se référant aux normes algériennes.

Le tableau ci-après montre qu'un seul forage (F8) est considéré de bonne qualité et les autres sont signalés comme non potables ou d'une qualité médiocre (certaines concentrations en éléments physicochimiques sont élevées et dépassent les normes), ce qui impose un traitement antérieur avant leur utilisation. [17]

Tableau III.4 : Potabilité des eaux souterraines de Boussaâda

Point d'eau	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	pH	TH (°F)	Cond (µS/cm)	RS (mg/L)	Remarque
Norme	200	150	/	200	200	50	6,5 - 9,2	50	2800	2000	Potable
F1	240	87	390	118	680	90	7,29	96	1790	1356	Non potable
F2	480	146	305	442	760	67	7,31	180	2110	1600	Non potable
F3	240	97	366	59	830	93	7,24	100	1569	1188	Non potable
F4	230	81	366	88	640	59	7,09	84	1575	1193	Non potable
F5	200	212	220	135	500	100	7,4	100	1273	965	Non potable
F6	248	92	280	77	750	120	7,19	100	1986	1505	Non potable
F7	216	87	305	88	350	56	7,62	89	1820	1379	Non potable
F8	88	63	366	70	350	12,2	7,91	48	981	743	Potable

III.6.1.1. Titre hydrotimétrique total (TH)

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

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

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

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

Tableau III.5 : Dureté des eaux en °F (Theobald et Gama, 1969)[9]

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

III.6.2. Aptitude à l'irrigation

III.6.2.1. Salinité

Selon Ayerset Westcot(1988) [9] quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation montrent que :

- Si la salinité exprimée par la conductivité électrique en ($\mu\text{S}/\text{cm}$) est inférieure à 700, il n'y a aucune restriction pour l'irrigation.
- Si la conductivité électrique varie entre 700 et 3000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne.
- Si elle est supérieure à 3000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la restriction pour l'irrigation est forte.

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

Classe de salinité	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Pourcentage (%)
C1	< 250	0
C2	250-750	0
C3	750-2250	100
C4	2250-5000	0
C5	5000-10000	0

III.7. Etude statistique des données hydrochimiques

III.7.1. Statistique descriptive

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

- **Le minimum et le maximum**

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

- **La moyenne arithmétique**

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

- **L'écart-type**

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

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

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

Les résultats statistiques des variables chimiques des eaux souterraines de Boussaâda sont reportés dans le ci-après et comparés aux normes algériennes.

Tableau III.7 : Résultats statistiques des variables physicochimiques des eaux souterraines de Boussaâda

Variable	Norme algérienne	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	CV (%)
Ca ²⁺	75-200 mg/L	88	480	242.750	108.880	0.44
Mg ²⁺	<150 mg/L	63	146	96.750	25.672	0.26
Cl ⁻	200-500mg/L	59	442	134.625	126.672	0.94
SO ₄ ²⁻	200-400mg/L	350	830	607.500	186.528	0.30
NO ₃ ⁻	<50mg/L	220	390	324.750	57.467	0.17
HCO ₃ ⁻	<350 mg/L	12	120	74.650	33.430	0.44
κ à 25°C	<2800 μS/cm	981	2110	1638	372.965	0.22
RS	< 2000 mg/L	743	1600	1241.125	282.878	0.22
TH	10-50 F°	48	180	99.625	36.831	0.36
pH	6.5 - 8.5	7.09	7.910	7.381	0.265	0.035

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

Tableau III.8: Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux souterraines de Boussaâda

Variable	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃	NO ₃ ⁻	CE 25°C	Rs	TH	Ph
Ca ⁺⁺	1									
Mg ⁺⁺	0.835	1								
Cl ⁻	0.877	0.832	1							
SO ₄ ⁻⁻	0.612	0.426	0.298	1						
HCO ₃	-0.162	-0.559	-0.224	0.154	1					
NO ₃ ⁻	0.299	0.402	-0.032	0.645	-0.419	1				
CE 25°C	0.798	0.487	0.497	0.568	-0.086	0.488	1			
Rs	0.799	0.488	0.499	0.568	-0.087	0.488	1.000	1		
TH	0.981	0.921	0.896	0.574	-0.299	0.352	0.731	0.732	1	
Ph	-0.508	-0.354	-0.129	-0.824	0.012	-0.718	-0.573	-0.573	-0.451	1

Très bonne corrélation Bonne corrélation Corrélation moyenne Corrélation faible

III.7.2. Analyse en composantes principales (ACP)

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses physicochimiques). Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation.

Le principe de l'ACP consiste à déterminer la corrélation des variables et de regrouper ces variables en ensembles dans des familles de même origine. Ces ensembles des variables nouvelles, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales [9].

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT (2014). Les données portent sur l'ensemble des analyses relatives aux huit forages. Les 10 variables traitées, concernent les paramètres physico-chimiques suivants : Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, Conductivité, pH, TH, RS. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le tableau (III.8).

1. Etude des valeurs propres

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, met en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de variance totale ainsi que leur cumul.

Le premier axe principal a une valeur propre égale à **5.88**, il explique **58.8 %** de la variance totale. La seconde composante égale à **1.851** correspond à un pourcentage de **18.508%**. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec **77.307%** de la variance totale. Si on fait les trois facteurs (axes), ils traduisent l'essentiel des informations recherchées et permettent de représenter de manière significative le nuage de points car la somme de la variance exprimée par ces facteurs est de l'ordre de **90.432 %**. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus (**Tableau III.9**).

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

	F1	F2	F3
Valeur propre	5,880	1,851	1,312
Variabilité (%)	58,800	18,508	13,125
% cumulé	58,800	77,307	90,432

2. Etude des variables

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le Tableau (**III.10**).

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

	F1	F2	F3
Ca²⁺	0,949	0,222	0,211
Mg²⁺	0,828	0,424	-0,262
Cl⁻	0,730	0,616	0,215
SO₄²⁻	0,727	-0,521	0,121
HCO₃⁻	-0,277	-0,372	0,857
NO₃⁻	0,580	-0,547	-0,565
CE	0,856	-0,166	0,193
RS	0,857	-0,165	0,193
TH	0,945	0,302	0,063
pH	-0,676	0,622	0,079

- Le facteur **F1** est corrélé positivement aux **Ca²⁺, Mg²⁺, CE, RS, TH**
- Le facteur **F2** est corrélé positivement aux **Cl⁻, pH**
- Le facteur **F3** est corrélé positivement au **HCO₃⁻**.

La projection des variables et des individus sur le plan factoriel F1-F2 permet d'extraire les figures (III.14) et (III.15).

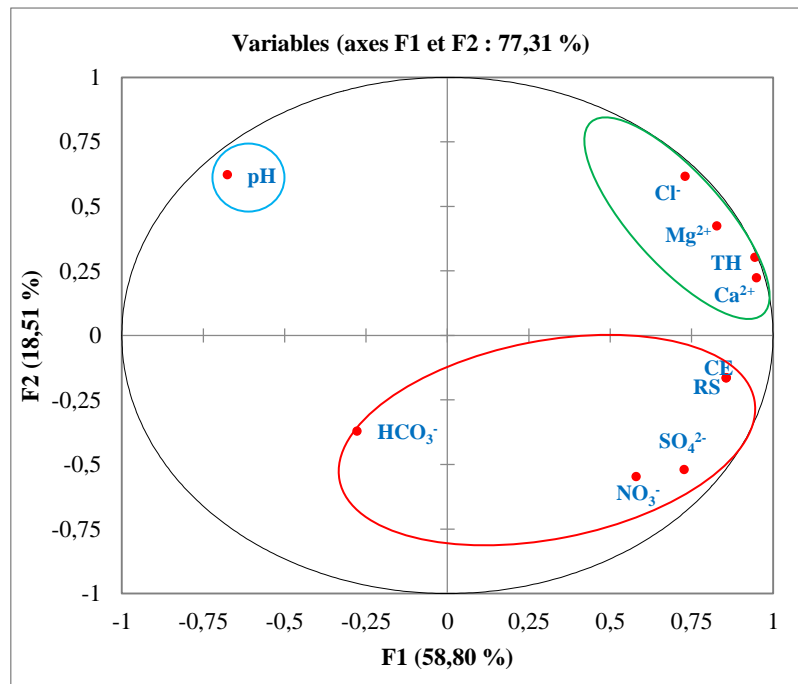


Figure III.14 : Cercle de corrélation des variables sur le plan factoriel (F1 et F2)

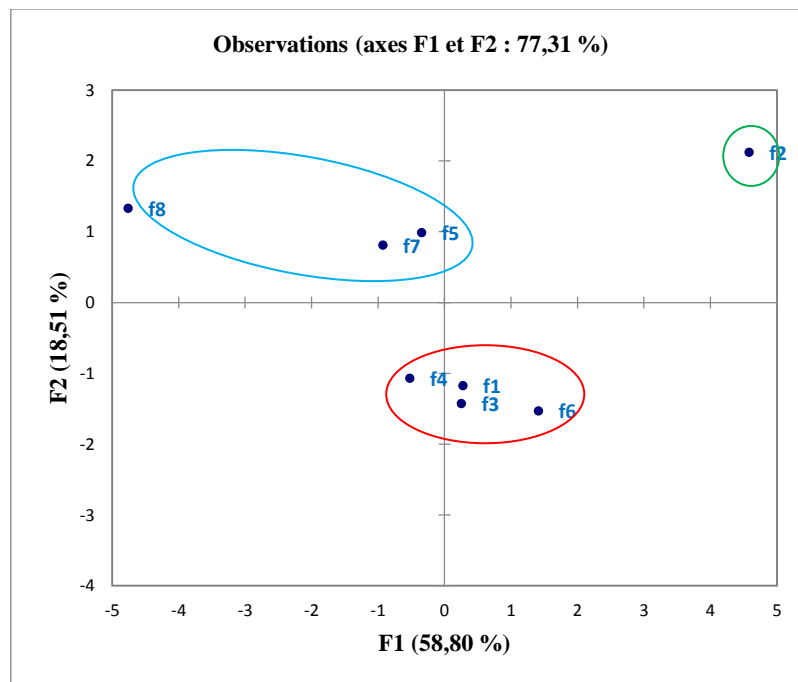


Figure III.15 : Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F2)

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

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

- Le premier axe factoriel exprimé par 58.80% est corrélé positivement aux: Ca^{2+} , Mg^{2+} , CE, RS, TH et d'un degré moindre aux Cl^- , pH, SO_4^{2-} . C'est le pôle des minéralisations, il est en bonne partie issue de l'interaction eau-roche.
- Le second axe factoriel F2 exprimé par 18.51% est corrélé positivement aux Cl^- , pH.

L'examen de cet espace factoriel (Fig. III.15) montre des groupements d'individus formant ainsi différentes familles d'eaux, où nous remarquons que presque tous les points d'eau sont regroupés excepté un point qui s'écarte clairement. Aussi, il semble se dégager 3 groupes :

Groupe 1 : rassemble les points d'eau (F8, F5, F7) sont des points d'eau qui se caractérisent par les plus fortes teneurs en pH.

Groupe 2 : rassemble les points d'eau (F1, F3, F4, F6) caractérisé par une forte minéralisation surtout en HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , RS, CE. Ces forages captent des eaux carboniques et la pollution anthropique des nitrates. La conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées.

Groupe 3 : s'individualise par le point F2 qui se caractérise par des teneurs élevées en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , TH. Il présente une tendance Mg^{2+} et Ca^{2+} , influencé par les formations carbonatées contenant du magnésium et la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et des eaux chlorurées calciques et présente une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée, cela peut être dû au rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées.

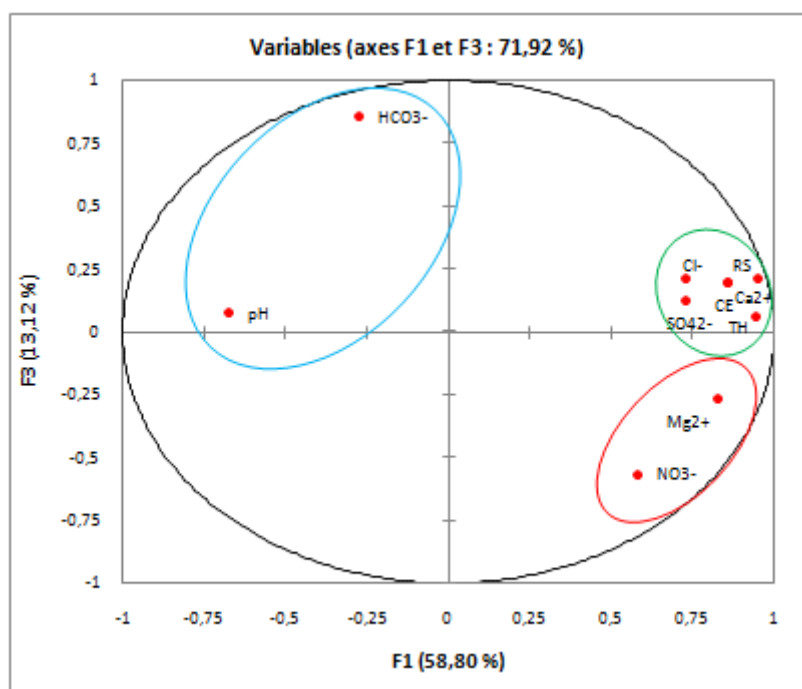


Figure III.16: Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1-F3)

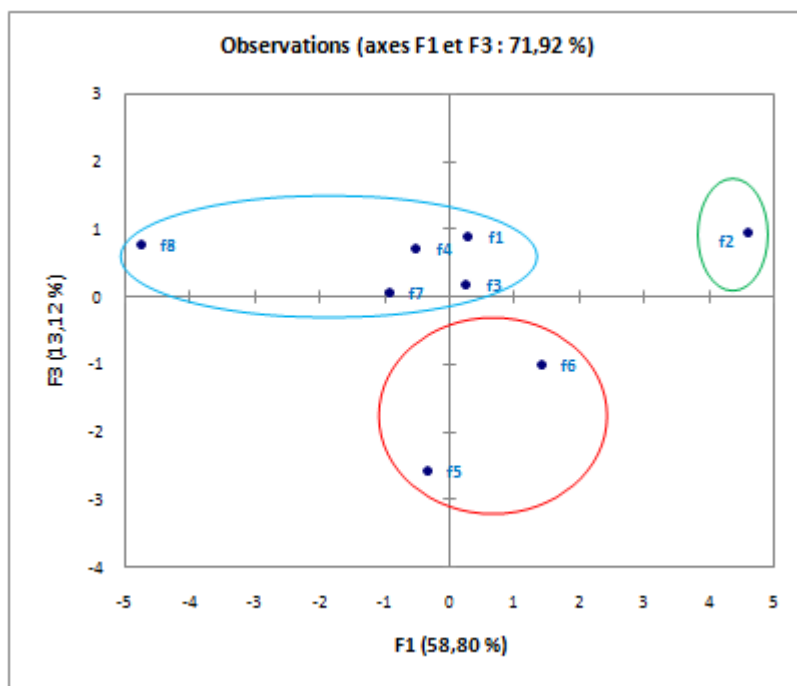


Figure III.17 : Projection des individus sur le plan factoriel (F1-F3)

La projection sur un plan F1-F3 montre les mêmes corrélations que celles dégagées du plan précédent :

- Le premier axe factoriel exprimé par **58,80 %** est corrélé positivement aux: Ca²⁺, Mg²⁺, CE, RS, TH et d'un degré moindre aux Cl⁻, pH, SO₄²⁻.
- Le deuxième axe factoriel F3 exprimé par **13,12 %** est corrélé positivement au HCO₃⁻.

Donc on peut déterminer les trois groupes suivants :

Groupe 1: rassemble les points d'eau F1, F3, F4, F7, F8 se caractérise par les teneurs les plus élevées du HCO_3^- , pH. Ces forages captent des eaux carboniques.

Groupe 2 : rassemble les points d'eau F5, F6 sont des points d'eau qui se caractérisent par les plus fortes teneurs en Mg^{2+} , NO_3^- . Présente une tendance magnésienne, influencé par les formations carbonatées contenant du magnésium et la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), et pollution anthropique des nitrates.

Groupe 3 : s'individualise par le point F2 qui se caractérise par des teneurs élevées en Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , TH, CE, RS. Il présente une eau minéralisée de faciès chimique Sulfaté calcique cela s'explique possiblement de la dissolution des formations carbonatées et gypsifères ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et des eaux chlorurées calciques, et présente une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée, cela s'explique vraisemblablement du rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées.

III.7.3. Classification Ascendante Hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a pour objectif de constituer des groupes homogènes d'objets (classes) sur la base de leur description par un ensemble de variables, ou à partir d'une matrice décrivant la similarité ou la dis-similarité entre les objets.

La CAH permet de construire une hiérarchie entière des objets sous la forme d'un "arbre" dans un ordre ascendant. L'un des résultats est le dendrogramme qui permet de visualiser le regroupement progressif des données. On peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est lente. Par ailleurs, le dendrogramme peut devenir illisible si on l'utilise avec trop de données.

La CAH permet donc d'obtenir une représentation schématique simple d'un tableau de données complexe à partir d'une typologie (segmentation), c'est à dire d'une partition des n individus dans des classes, définies par l'observation de p variables [17].

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.19), 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.[17]

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

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

- L'homogénéisation dans chaque classe et disparité entre les classes.
- Classes non prédéfinies mais découvertes au cours de l'opération.

Nous avons utilisé le code de calcul XLSTAT (2014), afin de regrouper les forages ayant des profils chimiques similaires. Le nombre d'individus est de 8 (puits) et les variables de 10.

La méthode du lien complet a été choisie pour cerner la plus grande distance entre deux groupes. Pour la distance entre ces groupes c'est la distance euclidienne qui a été prise en considération vu sa fréquente utilisation dans ce genre de données.[17]

Les résultats de cette méthode sont les suivants.

a) Statistiques des nœuds

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

Tableau III.11 : Nœuds successifs du dendrogramme

Nœud	Niveau	Poids
15	26,515	8
14	21,011	7
13	9,807	6
12	5,776	2
11	4,384	4
10	1,532	3
9	0,975	2

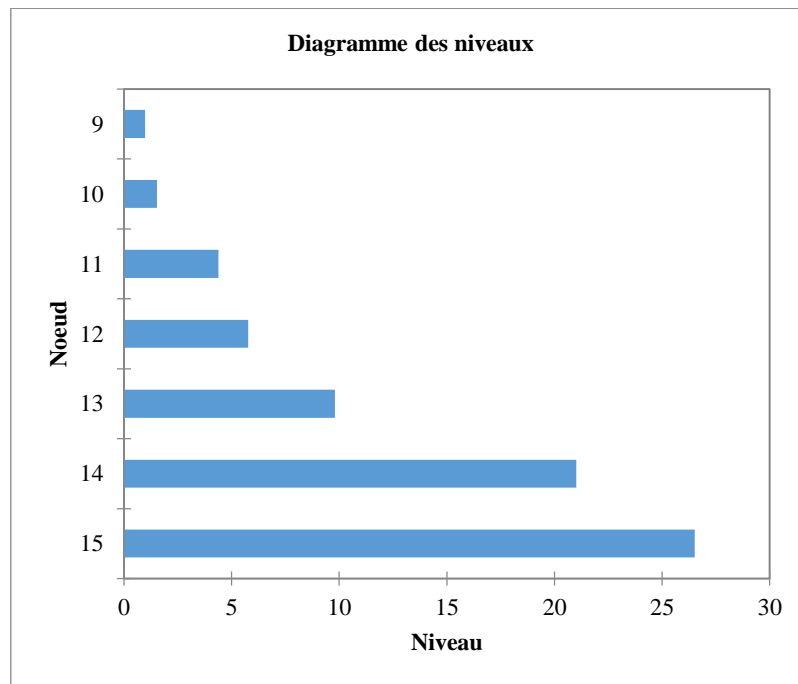


Figure III.18 : Diagramme des niveaux

b) Dendrogramme

Le dendrogramme permet de visualiser le regroupement progressif des forages. Si une troncature a été demandée, un trait en pointillé marque le niveau auquel est effectuée la troncature, cette dernière permet de visualiser les classes.

Dans notre cas, nous distinguons 5 classes (Figs. III.19 et III.20)

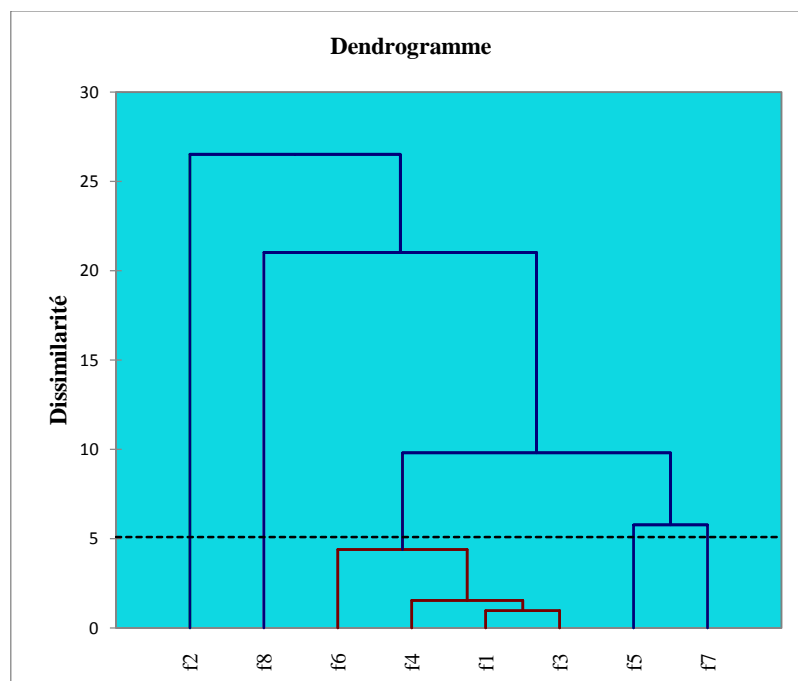


Figure III.19 : Hiérarchie des partitions obtenues par CAH (dendrogramme)

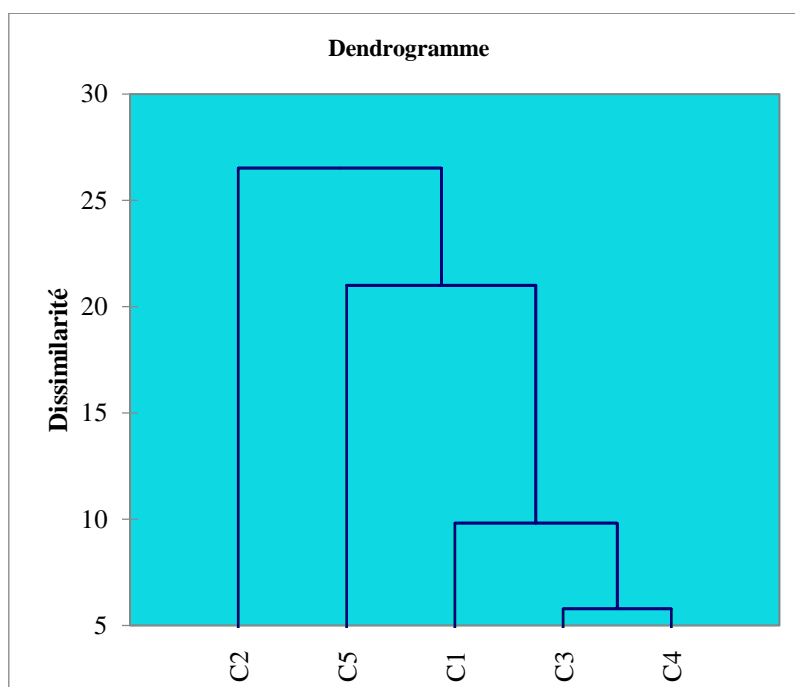


Figure III.20 : Hiérarchie des partitions (intra-classes et inter-classes) obtenues par CAH

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

Tableau III.12 : Barycentres des classes

Classe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	CE	RS	TH	pH
1	239,5	89,250	85,5	725	350,5	90,5	1730	1310,5	95	7,203
2	480	146	442	760	305	67	2110	1600	180	7,310
3	200	121	135	500	220	100	1273	965	100	7,400
4	216	87	88	350	305	56	1820	1379	89	7,620
5	88	63	70	350	366	12,2	981	743	48	7,910

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

La conductivité électrique semble être un facteur distinctif majeur avec des concentrations croissantes dans tous les principaux ions des groupes 1, 2, 3, et 4 (Tableau III.12).

Le groupe 1 : est composé des forages : **F1**, **F3**, **F4** et **F6**. La conductivité électrique est de **1730**(μ S/cm), influencée par la salinité de la dépression de Chott El Hodna. D'autre part, nous

avons une augmentation des proportions du composé (Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}), présente une eau minéralisée de faciès chimique sulfaté calcique ; cela s'explique probablement par la dissolution des formations carbonatées et gypsifère ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

Le groupe 2 : est représenté par le forage **2**. La conductivité électrique est **2110**($\mu\text{S}/\text{cm}$) qui est la caractéristique de l'eau mélangée des éléments minéraux et alcalino-terreux (Mg^{2+} - Ca^{2+} - Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-}). Ce type d'eau peut être interprété comme la première étape des interactions d'eau-roche se produisant dans les solutions diluées, et s'explique par l'abondance des formations carbonatées et évaporitiques dans la couche aquifère.

Le groupe 3 : est représenté par le forage **5**. La conductivité électrique est **1273**($\mu\text{S}/\text{cm}$) et les teneurs des sulfates et les nitrates sont élevées, ceci est dû à l'évacuation des eaux usées (Oued Maiter), lessivage des terrains limons sableux, sableux argileux de grande perméabilité (centre de la plaine) lors des précipitations (infiltration des eaux chargées des sulfates et les engrais agricoles) et la dissolution des formations évaporitiques (Trias ; roches carbonatées).

Le groupe 4 : est représenté par le forage **7**. La conductivité électrique est **1820**($\mu\text{S}/\text{cm}$). L'évolution des teneurs de (Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}) indique la caractéristique de l'eau composée, indique également que l'eau contient des éléments minéraux et formations carbonatées et gypsifères ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

Le groupe 5 : il comprend un seul forage, qui est le **F8**. Avec une conductivité électrique moyenne de **981** ($\mu\text{S}/\text{cm}$) qui est la caractéristique de l'eau moins salée. Ce groupe est fondamentalement dominé par les bicarbonates et les sulfates.

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]. Des techniques similaires ont été développées indépendamment dans différents pays, où elles sont plus connues sous les noms de graduation optimale, de moyennes réciproques, de scoring optimal, de méthode de quantification ou d'analyse d'homogénéité.

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

Les deux buts principaux d'une analyse factorielle sont d'une part de détecter des proximités, et d'autre part de faire apparaître quelques variables synthétiques abstraites décorrélées entre elles

(réduction de dimensionnalité). Ce second attrait ne constitue toutefois pas le but majeur de l'AFC.

Le principe de l'AFC est l'étude de l'inertie du nuage de points ayant pour coordonnées les valeurs présentes sur les lignes du tableau de données. Les objectifs de l'AFC sont similaires à ceux de l'ACP : obtenir une typologie des lignes et des colonnes et étudier le lien entre ces deux typologies. Cependant, le concept de similarité entre les lignes et les colonnes est différent. Ici, la similarité entre deux lignes ou deux colonnes est complètement symétrique. Deux lignes (resp. colonnes) sont proches l'une de l'autre si elles s'associent aux colonnes (resp. lignes) de la même façon.

On recherche les lignes (resp. colonnes) dont la distribution est la plus différente de celle de la population. Celles qui semblent le plus ou le moins semblable. Chaque groupe de lignes (resp. colonnes) est caractérisé par les colonnes (resp. lignes) auxquelles il est complètement ou peu associé.

1 - Le graphique symétrique

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

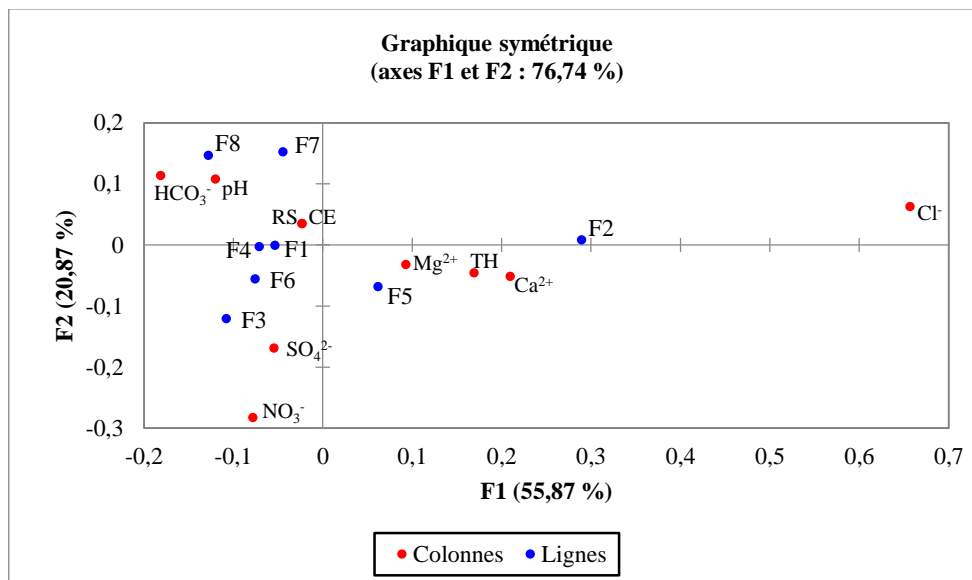


Figure III.21 : Graphique symétrique

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

- les forages F1, F3, F4, F6, F7 et F8 sont à conjonction avec les éléments HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-

, pH, RS et CE. Ces forages captent des eaux carboniques de la dissolution des roches carbonatées, et présentent une minéralisation élevée traduite par la conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées.

- les forages F2 et F5 sont à conjonction avec les éléments Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- et TH, présentent la dissolution des roches évaporitiques et gypsifères ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

III.7.5. Comparaison de différentes méthodes statistiques

- L'analyse en composant principale (ACP) permet de représenter les échantillons d'eau par 90.43% des informations à trois plans. L'ACP a donné trois groupes d'éléments physico-chimiques (carbonatés et évaporitiques).
- La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de classer les eaux en cinq groupes, le premier carbonaté et caractérise une eau minéralisée de faciès chimique sulfaté calcique. Le second groupe est celui de la minéralisation d'origine évaporitiques. Le troisième groupe est présenté par les eaux profondes en contact avec les roches carbonatées, marqué par la pollution des nitrates d'origine anthropique. Le quatrième groupe caractérisé par les eaux composées (éléments minéraux). Le cinquième groupe présente les eaux moins salées.
- Cependant, l'analyse factorielle de correspondance (AFC) a permis de représenter les échantillons d'eau sur deux plans F1 et F2 par une signification de 76.74%. Elle a donné deux groupes, le premier groupe présente une minéralisation élevée traduite par la conductivité élevée. Le second groupe présente la dissolution des roches évaporitiques et gypsifères ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Le choix d'utilisation d'une méthode dépend du cas à étudier, par conséquent les deux méthodes CAH et ACP montrent plus la qualité des eaux pour les principaux ensembles et donnent toutefois les mêmes groupes. Par contre l'AFC détient les mêmes objectifs que l'ACP, mais ne forme pas le but majeur de l'AFC et fait apparaître quelques variables synthétiques abstraites décorrélées entre elles (*réduction de dimensionnalité*), comme elle appuie sur la symétrie entre lignes (observations) et colonnes (variables).

III.8. Conclusion partielle

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

- L'analyse cartographique résulte que le calcium, le magnésium les sulfates et les nitrates ont des concentrations élevées du centre au lac salé (Chott el Hodna) de la zone d'étude. Cette

augmentation est due à l'influence des formations carbonatées, tels que, les calcaires, les calcaires dolomitiques d'une part, dissolution et lessivage des formations argileuses, marneuses et salifères provenant du lac salé d'autre part. Par contre les bicarbonates sont caractérisées par des teneurs élevées à Ouest-sud de la zone d'étude, cela est dû probablement à la dissolution des roches carbonatées. Tandis que les teneurs élevées des nitrates sont en liaison avec la répartition des terrains agricoles (El-Maadher) d'où l'utilisation des engrais, fumiers et aux rejets des eaux usées (Oued Boussaâda et Oued Maiter).

- Globalement, les caractéristiques de ces eaux sont médiocres avec des valeurs non-conformes aux normes de potabilité (dureté et sulfates).
- Les méthodes statistiques multivariées ont été utilisées pour caractériser les systèmes d'eaux souterraines de la zone d'étude en fonction de leurs propriétés physicochimiques. Ceci est utilisé pour comprendre les processus géochimiques qui dépendent des réactions chimiques qui ont lieu dans les eaux souterraines de la zone d'étude. En outre, les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schöeller-Berkaloff ont mis en évidence que la qualité des eaux souterraines est caractérisée par deux faciès chimiques dominants (sulfaté calcique et magnésien).
- La qualité des eaux de Boussaâda est influencée directement par la géologie locale et l'interaction eau-roche pendant le séjour et les écoulements souterrains, et par la vulnérabilité à la pollution en présence des points de contact avec les eaux de surface (lessivage des terrains argileux et marneux et terrains salés -Chott el Hodna).

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude qui a porté sur la connaissance de la situation actuelle des eaux souterraines de la région de Boussaâda, de point de vue hydrochimique et qualité a abouti aux conclusions suivantes :

- La qualité chimique des eaux de la région montre que les eaux souterraines sont d'une mauvaise qualité par rapport aux normes de qualité (calcium, dureté, sulfates et nitrates).
- L'étude hydrogéochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines. Les facteurs naturels et anthropiques influent sur cette qualité. Plusieurs outils d'interprétation ont été utilisés (cartographie, diagrammes, statistiques, etc.).
- Les représentations des analyses chimiques des eaux sur les diagrammes de Piper et Schöeller-Berkaloff ont mis en évidence que la qualité des eaux souterraines est caractérisée par deux faciès chimiques dominants (sulfaté calcique et magnésien).
- L'analyse en composant principale (ACP) a donné trois groupes d'éléments physico-chimiques (carbonatés et évaporitiques).
- La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de classer les eaux en cinq groupes, le premier carbonaté et caractérise une eau minéralisée de faciès chimique sulfaté calcique. Le second groupe est celui de la minéralisation d'origine évaporitiques. Le troisième groupe est présenté par les eaux profondes en contact avec les roches carbonatées, marqué par la pollution des nitrates d'origine anthropique. Le quatrième groupe caractérisé par les eaux composées (éléments minéraux). Le cinquième groupe présente les eaux moins salées.
- L'analyse factorielle de correspondance (AFC) a permis de représenter les échantillons d'eau sur deux plans par une signification de 76.74 %. Elle a donné deux groupes, le premier groupe présente une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée. Le second groupe présente la dissolution des roches évaporitiques et gypsifères ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

L'interprétation des données par les méthodes statistiques multi-variées a montré que la variation des éléments chimiques est très significative. Les résultats obtenus indiquent que les paramètres responsables des variations de la qualité des eaux souterraines sont principalement liés à la présence et à la dissolution de certains minéraux carbonatés et évaporitiques dans l'aquifère, ainsi que par les activités anthropiques tout au long du bassin, correspondant à des apports d'engrais agricoles, de rejets domestiques et industriels.

Les connaissances acquises sur la plaine de Boussaâda montrent que la région présente une eau de mauvaise qualité pour l'alimentation en eau potable de la population et pour couvrir les besoins d'une demande croissante, en égard à l'expansion de la ville et aux perspectives de développement économique dans la région.

De même la rareté des ressources en eau douce à l'échelle du bassin nécessite :

- la lutte contre la pollution ;
- la recharge de la nappe ;
- des suivis saisonniers de la qualité chimiques des eaux pour pouvoir éviter tout type de pollution naturelle ou accidentelle ;
- d'éviter l'implantation des ouvrages d'AEP au niveau des berges des oueds ;
- d'installer un réseau de piézomètres à hautes fréquences à travers la nappe pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique ;
- de convaincre les responsables des services de l'environnement d'instaurer dans la conception des forages d'eau la notion des périmètres de protection ;
- de conseiller les agriculteurs à limiter l'utilisation intensive des engrais chimiques et des pesticides dans les sols à forte perméabilité, afin de limiter l'infiltration des éléments chimiques vers la nappe, et de modérer les pompages en utilisant les nouvelles techniques d'irrigation (gouttes à gouttes) ;
- tout creusement de nouveau forage doit être effectué après une étude sérieuse ;
- l'implémentation d'une gestion intégrée des ressources en eau à même d'assurer un développement durable.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] A. Benrabia, *Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda Wilaya de M'sila. Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique*, Université de M'sila, (2013).
- [2] *Weather on line, statistiques de 2000 à 2012.*
- [3] H. Marwa, H. Rawdha, H. Imane, Contribution à l'étude de la contamination des eaux souterraines à usage agricole par les nitrates dans la plaine de Boussaâda (Sud Est Algérien). *Mémoire de fin d'études, Master en agronomie*, Université de M'sila, (2018).
- [4] Google Aearth (2019)
- [5] S. Riad, Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. *Thèse doctorat*. Université des Sciences et Technologies de Lille (France) & Université Ibnou Zohr d'Agadir (Maroc), (2002).
- [6] A. Ghachi, Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie. *Office des publications universitaires*, Alger, (1986).
- [7] A. Sari, L'hydrologie de surface, Editions distribution Houma, Alger, (2002).
- [8] O. Bensellama, Diagnostic de la qualité physicochimique des eaux de l'Oued Boussaâda – M'sila. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila, (2014)
- [9] A. Beyragued, A. Boudiaf, Contribution à la connaissance de la qualité des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam-Bejaia. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila (2017).
- [10] Agence nationale des ressources hydriques (ANRH), M'sila, (2019).
- [11] F. Mansouri, Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de Chemora – Batna. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila (2011).
- [12] 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).
- [13] J.I. Drever, The geochemistry of natural waters. *3rd edition, Prentice Hall*, New Jersey, (1997).
- [14] A. Graine, M. Ben Zemmouri, Approche hydrogéochimique des éléments conditionnant la qualité chimique des eaux souterraines de la région de Boussaâda. *Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila (2018).
- [15] N.E.H. Helali, *Analyse statistique multivariée des eaux souterraines de la région de Boussaâda. Mémoire de fin d'études, Master en Hydraulique urbaine*, Université de M'sila (2016).
- [16] J.-P. Beaudry, M. Tardat Henry, Chimie des eaux. *Edition Les griffons d'argiles, 1ère édition*, INC Canada, (1984).
- [17] M. Sanaa, Y. Naima, Caractérisations, classification et statistique multivariée 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).