

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :.....



FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : OUVRAGES HYDRAULIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : BOULARES SALMA
ZAOUI SARRA

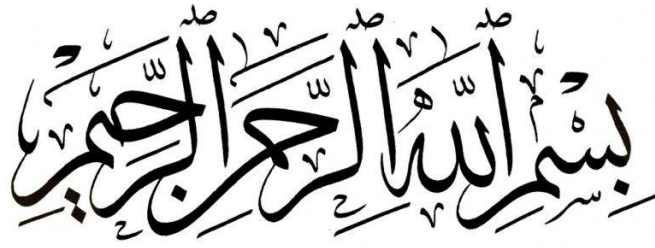
Intitulé

ETUDE HYDROCHIMIQUE ET L'IMPACT DE
LA SALINITE SUR LES EAUX SOUTERRAINES
DE LA ZONE NORD-EST DE BOUSSAADA
-WILAYA DE M'SILA-

Soutenu devant le jury composé de :

GUEMACHE. Abderazek.....	Université M'sila	Président
GHODBANE Messaoud	Université M'sila	Rapporteur
ADJISSI Omar.....	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020 /2021



Remerciements

*Nous remercions ALLAH Tout Puissant de nous avoir donné la
patience et la force pour terminer ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont particulièrement à notre enseignant
Dr. GHODBANE M. pour le soutien et de nous avoir orienté et
encouragé en cours de la réalisation de cette étude*

*Nous adressons aussi nos remerciements à tous les enseignants du
département et l'ensemble des membres du jury qui ont bien voulu
analyser et évaluer ce travail*

*Nous remercions, également, tous les enseignants et Responsables du
Faculté de technologie*

Ainsi que nous camarades de la promotion de l'an 2020/2021

*Et enfin, on remercie tout qui nous a aidés pour rendre ce travail
effectif.*

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1

CHAPITRE I

Présentation Géographique et les Conditions Naturelles

I.1. Introduction.....	2
I.2. Aperçu géographique	2
I.2.1. Localisation géographique	2
I.2.2. Développement et économie.....	2
I.2.3. Habitats et activités	4
I.2.4. Relief.....	4
I. 3. Démographie.....	5
I.5. Le climat	5
I.6.Caractéristiques morphométriques et physiques du B.V et la Zone d'étude	6
I.6.1. Délimitation de la zone étudiée du B.V de Boussaâda	6
I.6.3.Périmètre	6
I.6.4.Indice de compacité de Gravellius	7
I.6.5. Courbe hypsométrique et diagramme de fréquence.....	8
I.6.6.Rectangle équivalent.....	9
I.6.7. Les indices de pente	10
I.6.8.Pente moyenne	11
I.6.9.Longueur du cours d'eau principal	11
I.7.Les caractéristiques du réseau hydrographique	12
I.7.1. Densité de drainage.....	12
I.7.2. Dénivelée spécifique (DS)	12
I.7.3. Temps de concentration (TC)	13
I.7.4.Vitesse d'écoulement de l'eau (VC)	13
I.8.Conclusion	14

CHAPITRE II

Aperçu géologique et hydrogéologique

II.1. Aperçu géologique.....	15
II.1.1. Zone de d'étude	15
II.1.2. Elements de Stratigraphie	16
II.2. Aperçu hydrogéologique	18
II.2.1. L'étude piézométrique	19
II.2.3. Etude et Interprétation de la carte piézométrique	20
II.3. Conclusion	21

CHAPITRE III

Etude hydrochimique et l'impact de la Salinité Sur les Eaux Souterraines de la Zone d'étude

III.1. Introduction	22
III.2. Echantillonnage des eaux et Analyses au laboratoire :	22
III.3. Etude et évaluation de la qualité des eaux :	23
III.3.1. Paramètres ayant fait l'objet de limite de qualité :	23
III.4. Indice d'échange de base (i.e.b) :	37
III.5. Qualité chimique des eaux :	38
III.5.1. Potabilité des eaux:.....	38
III.5.2. L'impact de la salinité sur les eaux souterraines et leur aptitude à l'irrigation:.....	39
III.5.3. Comparaison des classes issues des méthodes de Richards et de WILCOX	41
III.6. Classification des certaines cultures maraichères par tolérance à la salinité :	44
III.7. Conclusion :	44
CONCLUSION GENERALE	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	48

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1</i> Carte de la situation géographique de la Zone d'étude	3
<i>Figure I.2</i> la ville de Boussaâda.	4
<i>Figure I.3</i> B.V de Boussaâda par satellite	6
<i>Figure I.4</i> Carte du sous bassin versant étudié.....	7
<i>Figure I.5</i> Carte topographique du Sous B.V de la zone d'étude	8
<i>Figure I.6</i> Courbe hypsométrique	9
<i>Figure II.1</i> Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie. .15	
<i>Figure II.2</i> extrait de la carte géologique du Boussaâda	16
<i>Figure II.3</i> Coupe géologique de la zone de Boussaâda.....	18
<i>Figure II.4</i> Carte de position des forages étudiés	20
<i>Figure II.5</i> La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudié (Mai 2020)	21
<i>Figure III.1</i> Carte des points d'eau analysés	22
<i>Figure III.2</i> Variation du pH des eaux (Mars 2020).....	24
<i>Figure III.3</i> Variation de CE des eaux (Mars 2020).....	25
<i>Figure III.4</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en calcium (Ca^{2+}) dans les eaux de la nappe (Mars 2020).....	26
<i>Figure III.5</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en magnésium (Mg^{2+}).....	27
<i>Figure III.6</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en sodium (Na).....	28
<i>Figure III.7</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en potassium (K^{+}).....	29
<i>Figure III.8</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en chlorures (Cl^{-}).....	30
<i>Figure III.9</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en bicarbonates (HCO_3^{-}).....	31
<i>Figure III.10</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en sulfates SO_4^{2-}	32
<i>Figure III.11</i> Variation spatiale des valeurs des teneurs en nitrates NO_3^{-}	33
<i>Figure III.12</i> Diagramme de piper.....	34
<i>Figure III.13</i> diagramme de SCHOELLER – BERKALOFF	35
<i>Figure III.14</i> Diagramme de Richard de classification des eaux pour l'irrigation.....	42
<i>Figure III.15</i> DIAGRAMME DE WILCOX	43

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I.1 Evaluation de la population du Boussaâda.</i>	5
<i>Tableau I.2 Données climatiques à Boussaâda.</i>	5
<i>Tableau I.3 Calcul des surfaces partielles et cumulées</i>	8
<i>Tableau I.4 classification des Reliefs</i>	13
<i>Tableau I.5 Principales caractéristiques morphométriques du sous B.V de la zone d'étude</i>	14
<i>Tableau II.1 Inventaire et caractéristiques piézométriques des points d'eau.</i>	19
<i>Tableau III.1 Valeurs statistiques de la température durant la période Mars 2020</i>	23
<i>Tableau III.2 Valeurs statistiques du pH</i>	24
<i>Tableau III.3 Valeurs statistiques de la conductivité électrique</i>	24
<i>Tableau III.4 Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité</i>	25
<i>Tableau III.5 Valeurs statistiques du calcium</i>	26
<i>Tableau III.6 Valeurs statistiques du magnésium</i>	26
<i>Tableau III.7 Valeurs statistiques du sodium</i>	27
<i>Tableau III.8 Valeurs statistiques du potassium</i>	28
<i>Tableau III.9 Valeurs statistiques des chlorures</i>	29
<i>Tableau III.10 Valeurs statistiques des bicarbonates</i>	30
<i>Tableau III.11 Valeurs statistiques des sulfates</i>	31
<i>Tableau III.12 Valeurs statistiques des nitrates</i>	33
<i>Tableau III.13 Faciès chimiques des eaux selon la méthode de SCHOELLER–BERKALOFF</i>	36
<i>Tableau III.14 Classification de SCHOELLER selon la concentration en sulfates</i>	36
<i>Tableau III.15 Classification de SCHOELLER selon la concentration en chlorures</i>	37
<i>Tableau III.16 Indices d'échanges de base</i>	38
<i>Tableau III.17 Normes de potabilité de l'O.M.S.</i>	39
<i>Tableau III.18 Dureté des eaux en (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)</i>	39
<i>Tableau III.19 Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité)</i>	40
<i>Tableau III.20 Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards</i>	42
<i>Tableau III.21 Résultats de l'interprétation du diagramme de Wilcox</i>	44

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation de sodium sur le milieu adsorbant du sol, donc un processus de salinisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité et à l'étouffement des plantes. L'intensité du processus de salinisation dépend des caractéristiques du sol, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier de l'efficacité du système de drainage. Cependant ces pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité en Algérie (A. DOUAOUI et T. HARTANI, 2007 ; S. BOUHLASSA *et al.* 2008 ; A.E.K. ROUABHIA et L. DJABRI, 2010).

La zone Nord-est de la plaine de Boussaâda est caractérisée par un climat semi-aride très sévère, avec une forte évapotranspiration, et une salinisation des sols éminente aggravée par la sécheresse qui dure depuis plus de deux décennies et par le pompage intense des eaux souterraines dont l'absence de d'autres sources d'irrigation.

Ceci nous a amené à entreprendre cette approche intitulée : *Etude hydrochimique et l'impact de la Salinité sur les Eaux Souterraines de la Zone d'étude*, basée sur les analyses et l'interprétation des résultats des analyses chimiques effectuées pendant la période de Mars 2020 .Ainsi, des échantillons ont été prélevés au niveau de 20 points d'eau captant l'aquifère superficiel exploité pour l'irrigation. L'objectif de cette étude est l'identification de la qualité des eaux et l'impact de la salinité provenant du "Chott el Hodna " sur les eaux souterraines de la zone d'étude.

Ce travail comprend :

- Introduction générale.
- Chapitre I : Présentation de la région d'étude.
- Chapitre II : Aperçu sur la géologie et hydrogéologie de la région.
- Chapitre III : Etude hydrochimique et l'impact de la Salinité sur les Eaux Souterraines de la Zone D'étude.
- Conclusion générale.

CHAPITRE I

Présentation Géographique et Conditions Naturelles

I.1. Introduction

Avant de traiter notre sujet il faut avoir une idée générale sur l'emplacement de notre site d'étude (Bassin versant de Boussaâda) concernant une vision géographique, démographique, climatique, administrative et morpho métriques.

I.2. Présentation géographique

I.2.1. Localisation géographique

La commune de Boussaâda 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. 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, couvre une superficie de 255 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 c'est une zone touristique riche des Oasis 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 de Maiter et Boussaâda.

Cette ville en plein 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 etc....).

- 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 : représente par la RN 46 qui traverse la structure du Nord- Est vers le Sud-ouest.

D'autres éléments naturels et technologique contribués à la restriction de la forme actuelle de tissu bâtie de la ville et orientent son extension :

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

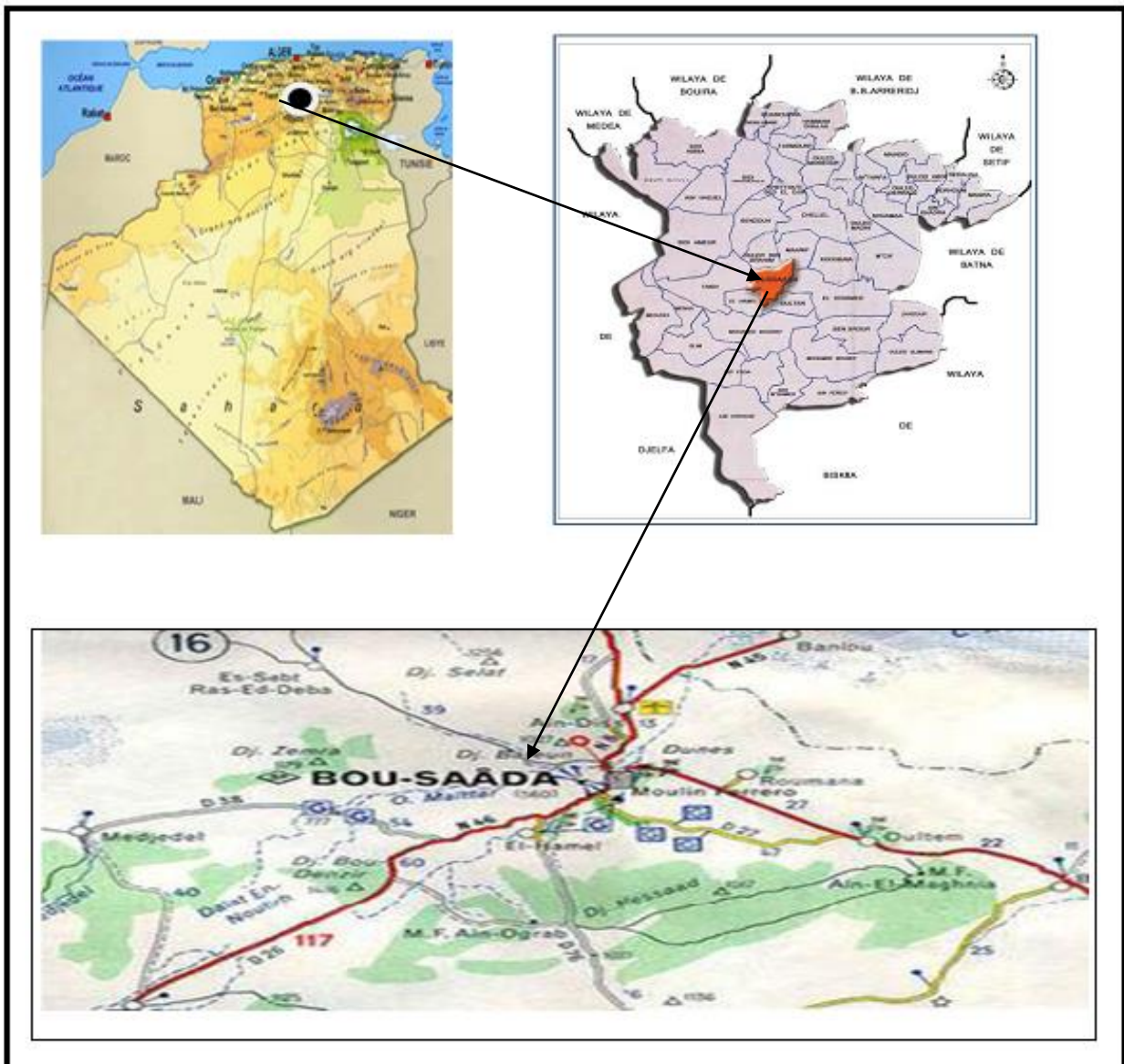


Figure 1.1 Carte de la situation géographique de la Zone d'étude.

I.2.3. Habitats et activités

La plupart des agriculteurs sont concentrés au village Agricole El-Maadhar. Malgré 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. La terre est fertile et les potentialités agricoles de la ville sont énormes. Mais peu qui se mettent au travail et ose 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.

I.2.4. Relief

Les reliefs de la région de Boussaâda sont caractérisés par la présence de chaînes de montagne d'orientation variée surtout au niveau de la partie Sud et Sud-ouest. Les reliefs existants :

- Djebel Grigour côté Nord-ouest de la ville.
- Djebel Moubkhira côté Sud-ouest du chef-lieu (772 m).
- Djebel Kerdada côté Sud (947 m).
- 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).
- Les vallées Traversant le périmètre de Boussaâda :

- 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 (fig.1.2).



Figure I.2 la ville de Boussaâda.

I. 3. 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 (125 573 habitants), la population de la commune est évaluée à 152306 habitants en 2015 et atteint 184694 habitants selon le RGPH 2018 (Tableau. I. 1) :

Tableau I.1 Evaluation de la population du Boussaâda.

Évolution démographique				
1987	1998	2008	2015	2018
66688	104029	125573	152306	184694

I.4. Répartition administrative

La commune de Boussaâda est limitée :

- ✓ Au nord par la commune d'Ouled Sidi Brahim.
- ✓ Au nord est par la commune de Maarif.
- ✓ A l'est par la commune d'Elhouamed.
- ✓ A l'ouest par la commune de tamza.
- ✓ Au sud est par la commune d'Oueltem.
- ✓ Au sud-ouest par la commune d'Ehamel.

I.5. Le climat

Le climat de Boussaâda est de type semi-aride, d'un été sec et très chaud et hiver très froid. Les aléas du climat, la désertification, une pluviométrie faible, irrégulière et inégalement répartie.

Tableau I.2 Données climatiques à Boussaâda.

Données climatiques à Boussaâda												
Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sep.	oct.	nov.	déc.
Température minimale moyenne (°C)	3,7	4,6	7,4	11,7	16,2	21,1	24,7	24,1	19,4	14,7	8,7	5,4
Température moyenne (°C)	9,2	10,7	14,4	18,1	23,1	28,7	32,5	31,7	25,9	20,8	13,9	10,3
Température maximale moyenne (°C)	14,6	16,7	21,3	24,5	30	36,3	40,2	39,3	32,4	26,9	19,1	15,1
Précipitations (mm)	34	22	29	25	25	14	4	14	24	24	32	35

I.6. Caractéristiques morphométriques et physiques du B.V et la Zone d'étude

I.6.1. Délimitation de la zone étudiée du B.V de Boussaâda

Le bassin versant 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 (fig.1.3).

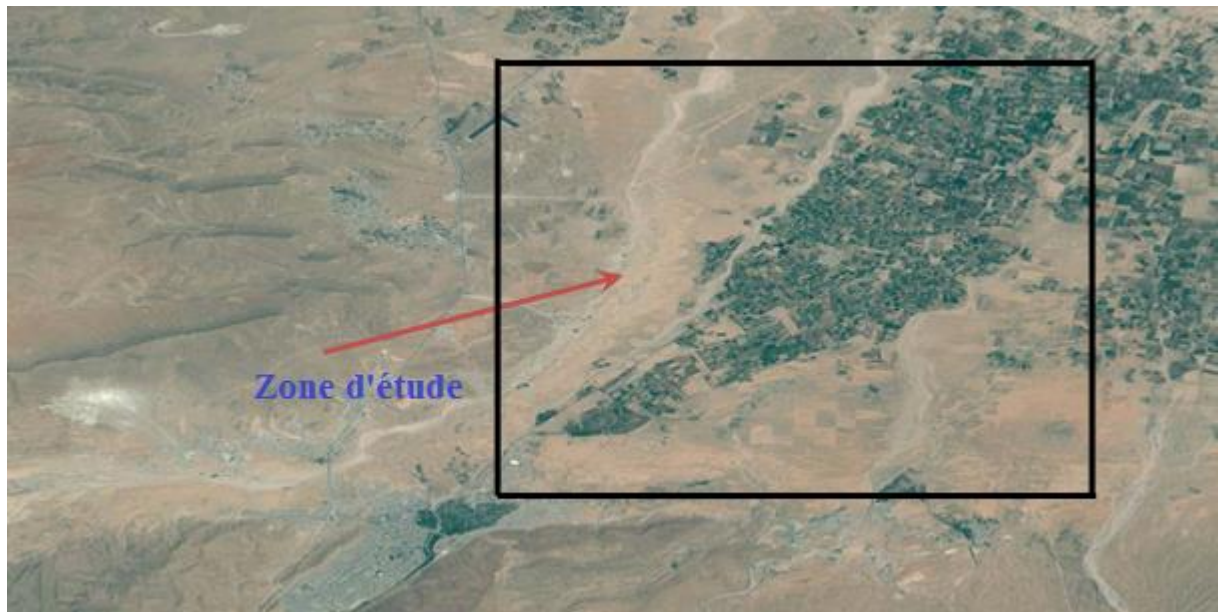


Figure I.3 Bassin versant de Boussaâda contenant la zone d'étude (Vue par satellite)

I.6.2. Surface

La surface de la zone d'étude (A) exprimée en km^2 (fig.1.), peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de digitalisation. (Par exemple les logiciels : (global Mapper – MapInfo). La surface été mesurée grâce au logiciel MapInfo, elle est de l'ordre **132,48 km^2** .

I.6.3. 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 "MapInfo" est de **50,7 km**.

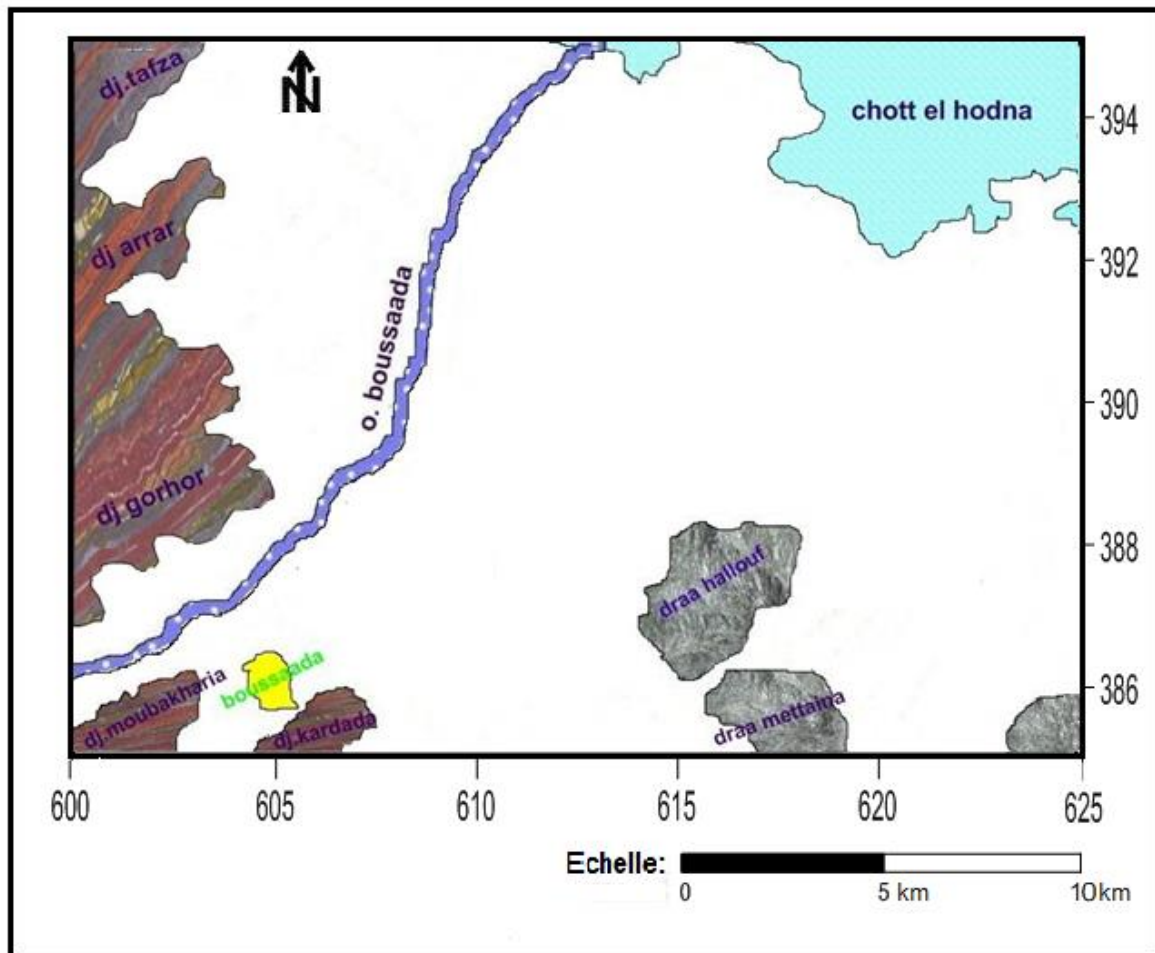


Figure I.4 Carte du sous bassin versant étudié

I.6.4. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (KG) 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'hydro gramme 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) :

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

Avec :

KG : 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 1,23 * Lorsque KG est proche de 1 le bassin versant est de forme quasiment circulaire * Lorsque le KG supérieur à 1 bassin versant est de forme allongée.

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

$K_G=1$ —————> forme d'un cercle

$K_G=1.12$ —————> forme d'un carré

$K_G>1.12$ —————> forme d'un rectangle

D'après K_G obtenue, le bassin versant du Boussaâda est de forme allongée

I.6.5. Courbe hypsométrique et diagramme de fréquence

Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique. Cette courbe est obtenue en portant en abscisses les surfaces partielles cumulées du bassin versant pour laquelle chaque point a une cote au moins égale à cette altitude et en ordonnées l'altitude considérées.

Le planimétrage des surfaces partielles comprises entre les différentes courbes de niveau à été réalisé par le logiciel AutoCAD2004. Les résultats obtenus est représentés dans le tableau (I.3) ; et les courbes de niveau du sous bassin versant de la zone d'étude sont présentées dans la figure (I.5).

Tableau I.3 Calcul des surfaces partielles et cumulées

Altitude (m)	Altitude moy (m)	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
		Si en km2	%	Si en km2	%
900-1000	950	5,00	2,65	5,00	2,65
800-900	850	9,60	5,08	14,60	7,73
700-800	750	18,14	9,61	32,74	17,34
600-700	650	37,63	19,93	70,37	37,27
500-600	550	66,20	35,06	136,57	72,32
400-500	450	52,26	27,68	188,83	100,00
Somme	4200	188,83	100,00	188,83	100,00

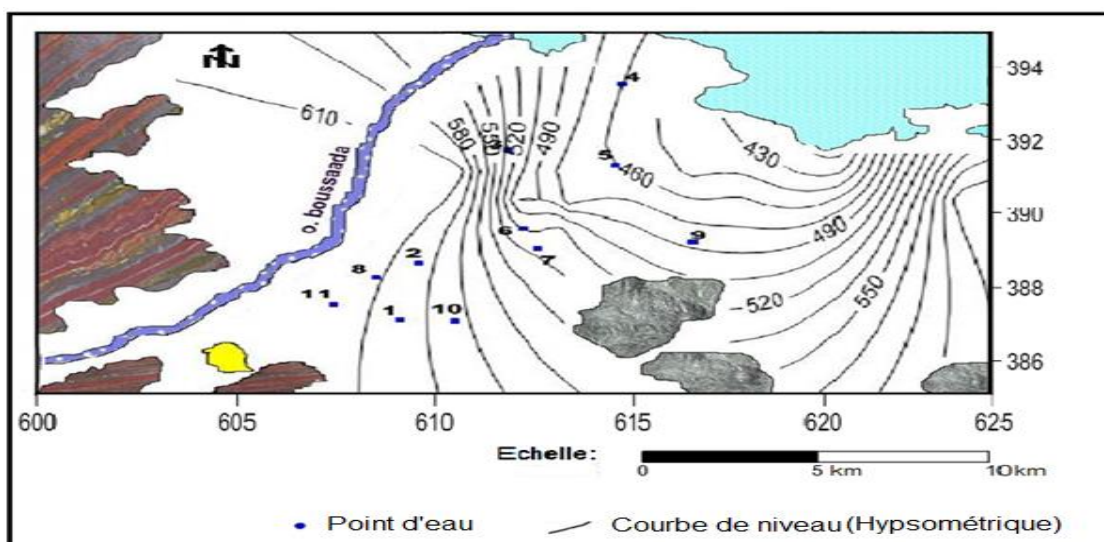


Figure I.5 Carte topographique du Sous B.V de la zone d'étude

La courbe hypsométrique représentée en figure (I.6) montre que **72,32 %** de la surface totale du sous bassin versant est comprise entre les altitudes **500** et **800 m**. Au-dessous de **800 m** le pourcentage des surfaces est très faible par rapport à la surface totale. Il est de l'ordre de **7,73 %**.

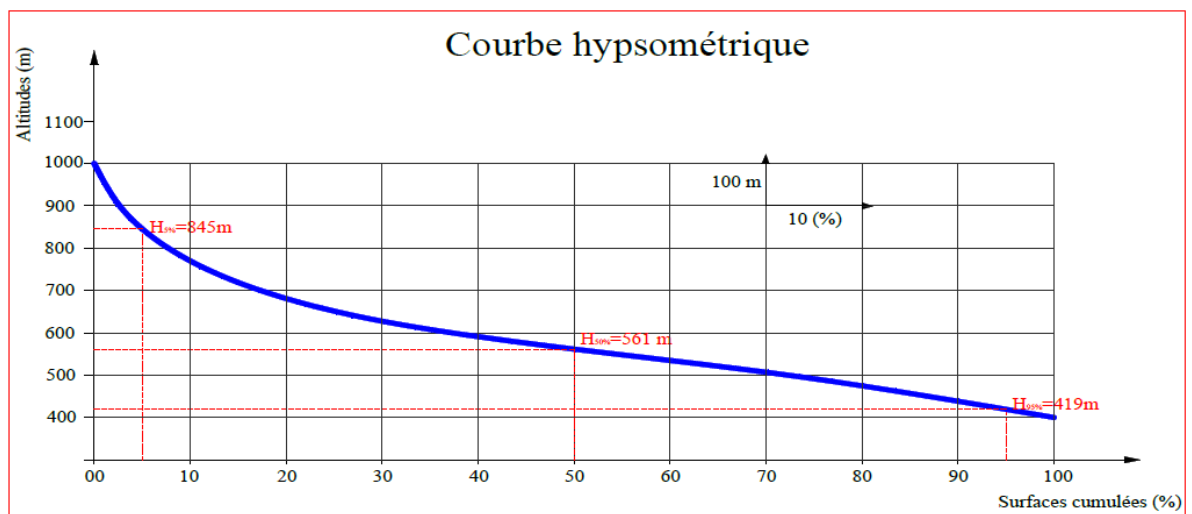


Figure I.6 Courbe hypsométrique

Les altitudes au dessus de **500 m** occupent une surface de l'ordre de **17,68%**. D'après la courbe hypsométrique, on peut déduire que la pente est relativement assez moyenne.

A partir de cette courbe, on détermine :

- * l'altitude à 95% de la surface, $H_{95} = 419 \text{ m}$
- * l'altitude à 5% de la surface, $H_5 = 845 \text{ m}$
- * l'altitude médiane, $H_{50} = 561 \text{ m}$

L'altitude moyenne est définie aussi par la formule suivante :

$$\bar{h} = \frac{\sum S_i \cdot \bar{H}_i}{S}$$

D'où :

S : surface totale du bassin versant

S_i : surface partielle

\bar{H}_i : L'altitude moyenne entre deux courbes niveaux

$$\bar{h} = 591.79 \text{ m}$$

I.6.6. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux cotés du rectangle

équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (ROCHE, 1963) :

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

$$l = \sqrt{A} \frac{K_c}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en Km ;

l : Largeur du rectangle équivalent en Km ;

KC : Indice de compacité ;

A : Superficie du bassin versant en Km² ;

L'application de la relation précédente nous donne une longueur du rectangle équivalent du sous B.V de l'ordre de **17.86 Km** et sa largeur l est de : **7.42 Km**

I.6.7. Les indices de pente

Le but de ces indices est de Caractériser les pentes d'un bassin versant et de comparer le bassin versant ente eux.

a/Indice de pente Roche : ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le l'autre, il est donné par la formule :

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

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

Si : Surface partielle correspondante (%).

Soit : $I_p = 0.17$

b/Indices de pente globale

Les reliefs du bassin versant sont classés d'après cet indice suivant la classification de l'**ORSTOM** :

(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.)

$$I_g = D / L$$

Où :

I_g : indice globale de Roche

D : dénivelée totale (m).

$$D = H_{95} - H_5 = 845 - 419 = 426 \text{ m}$$

Donc l'indice de pente globale du sous bassin versant est de : $I_g = 0.023$; d'après I_g obtenu le sous bassin versant est de relief modéré.

I.6.8.Pente moyenne

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin versant est donnée par ROCHE (1963) comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{A} \sum D_i$$

Avec :

P_m : Pente moyenne du bassin versant en ‰

l : Largeur du rectangle équivalent en km

D_i : Différence de niveau entre deux courbes consécutives

A : Surface élémentaire en km².

La pente moyenne du bassin versant du Boussaâda est de l'ordre de **22,3 ‰** Pour le calcul de cette pente moyenne, on ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique. Cette dernière correspond à la superficie entre les courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief.

I.6.9.Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé. Lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant, cette

distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

I.7. Les caractéristiques du réseau hydrographique

I.7.1. Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné de superficie A comme étant la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km² ou en km⁻¹.

Elle est donc :
$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Avec :

L_i : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km².

La longueur totale des cours d'eaux du BV du Boussaâda est de :

$$\sum L_i = 150.44 \text{ Km}$$

Et leur surface A = 132,48 km²

Donc : $D_d = 1.13 \text{ Km/Km}^2$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant dans une certaine mesure, des conditions climatiques et atmosphériques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées.

I.7.2. 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 de l'introduction du paramètre (Ds).

$$D_s = D/L * \sqrt{A} \longrightarrow D_s = 23.85 \sqrt{132.48} = 274.51 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelée spécifique du bassin de Bou-Saada se trouve dans la classe R5 : caractérisée par un relief assez fort (Tableau. I 04).

Tableau I.4 classification des Reliefs

R1	Relief très faible	5<Ds<10 m
R2	Relief faible	10<Ds< 25m
R3	Relief assez faible	25<Ds<50 m
R4	Relief modéré	50<Ds<100 m
R5	Relief assez fort	100<Ds< 250m
R6	Relief fort	250<Ds<500 m
R7	Relief très fort	500<Ds<750 m

I.7.3. Temps de concentration (TC)

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 suivante :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,54}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

On obtient :

$$T_c = 3.43 \text{ heures}$$

Avec :

A : Superficie du sous bassin = 132,48 km² ;

Lp : Longueur du talweg principale = 21,430 km ;

H_{moy} = 700m

H_{min} = 400m

I.7.4. Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc)

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{L}{T_c}$$

Avec :

- Vitesse d'écoulement de l'eau en m/s (Vc)
- Longueur du talweg principal : 21,430 km = 21430 m (L)

- Temps de concentration 3.43 heures = 12348 S (Tc)

Donc :

$$V_c = 1.73 \text{ m/s}$$

I.7.5. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de Boussaâda est marqué par deux oueds, c'est l'oued Maitar issu du versant sud de djebel Moubakhria, et l'autre oued Boussaâda est issu du djebel Kardada. Et les eaux pluviales qui traversent ces deux Oueds se déversent dans le chott du Hodna.

I.7.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du sous B.V de la zone d'étude

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

Tableau I.5 Principales caractéristiques morphométriques du sous B.V de la zone d'étude

Caractéristiques morphométriques	Résultats	Unité	Observation
Surface	132.48	Km ²	-----
Périmètre	50,7	Km	-----
Altitude max	1000	m	-----
Altitude moyenne	700	m	-----
Altitude min	400	m	-----
Indice de Gravelius	1,23	-----	Forme allongée
Indice de pente globale	0.023	m/Km	Relief modéré
Longueur du rectangle équivalent	17.86	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	7.42	Km	-----
Longueur du cours d'eau principal	21,43	Km	
Pente moyenne	22,3	m/Km	-----
Dénivelée spécifique	254,71	m	-----
Densité de drainage	1,13	Km ⁻¹	Réseau moins dense
Temps de concentration	3,43	heures	
Vitesse d'écoulement d'eau	1.73	(m/s)	

I.8. Conclusion

La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, sec et très chaud en été et très froid hiver.

Le Sous bassin versant draine une grande surface, de forme allongée, de relief modéré, de pente moyenne, d'une densité de drainage moins dense et de longueur du cours d'eau importante.

CHAPITRE II

Aperçu géologique et hydrogéologique

II.1. Aperçu géologique

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

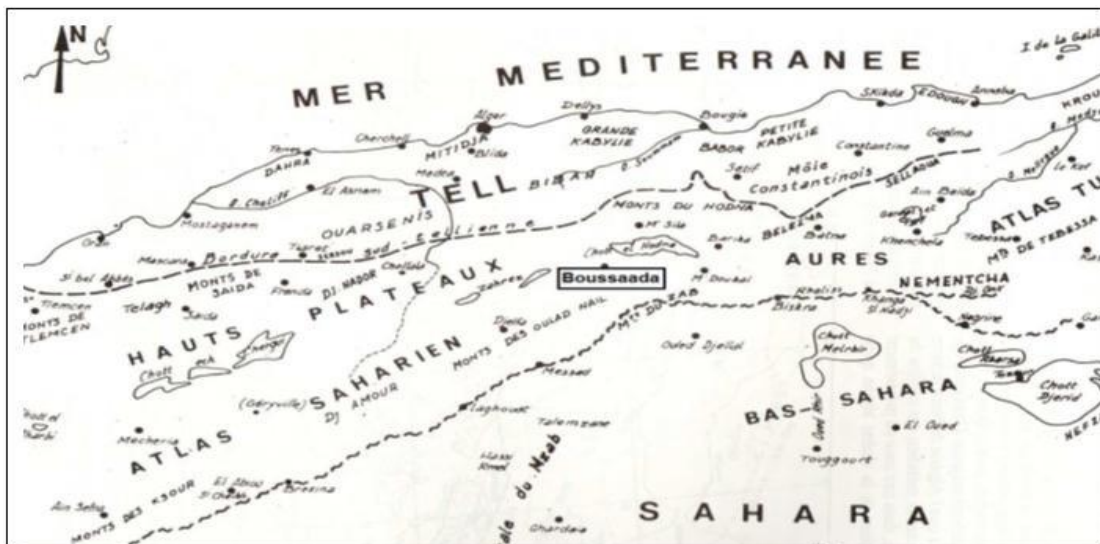


Figure II.1 Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie.

II.1.1. Zone de d'étude

C'est la zone Nord-est de Boussaâda située au Sud du Chott El-Hodna, caractérisée par :

- ✓ l'absence de Miocène marin et une épaisseur de Tertiaire moins importante qu'au Nord du Chott.
- ✓ Les pointements jurassiques des Fennd et le massif du Meharga à l'Est et au Sud.
- ✓ l'anticlinal du Dj Kerdada au Sud-ouest, Dj Zemra et Selat à l'Ouest.

Par ailleurs, la ville de Boussaâda et l'Oued Temsa-Maittar délimitent deux zones structurales distinctes.

- a) Au Nord un plateau rattaché aux Hautes Plaines Algéroises.
- b) Au Sud une partie plissée rattachée à l'Atlas Saharien.

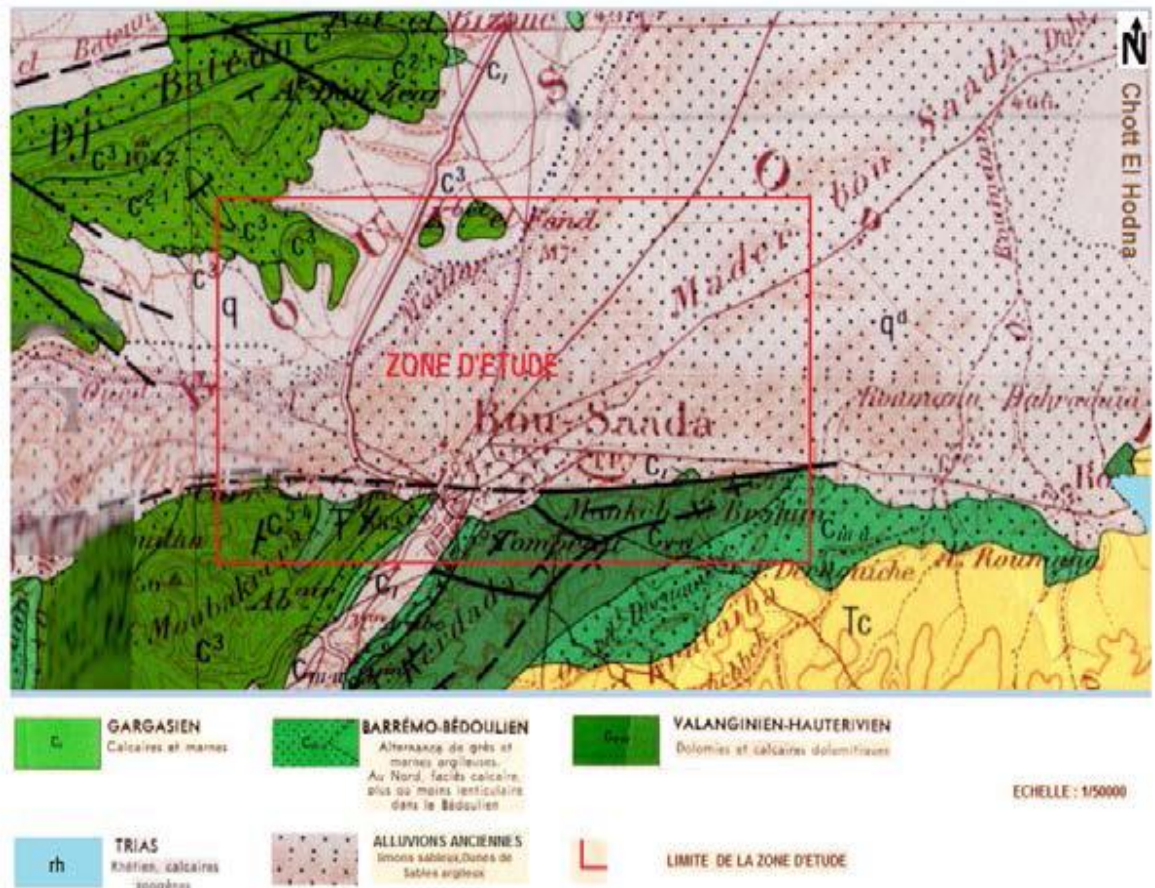


Figure II.2 extrait de la carte géologique du Boussaâda

II.1.2. Elements de Stratigraphie

Les formations, post-triasiques, du bassin sont décrites dans l'ordre stratigraphique :

- **Alluvions anciennes et récentes :**

Des limons souvent très riches en matière sableuse, atteignant parfois une épaisseur supérieure à 10 cm.

- **Dunes :**

Localisées dans la cuvette des oueds TAMSA et MAITER, des sables souvent chargés en matière argileuse, ils proviennent de l'érosion de grés.

- **Tertiaire continental :**

Ces formations sont localisées au Sud de Boussaâda, elles sont constituées par des dépôts d'argile rouge et de sables. L'épaisseur de ces formations est très variable de 50 à 250 m.

• Aptien supérieur :

À une épaisseur de 200 m environ, Turonien : caractérisé par des calcaires et des marnes à intercalations calcaires.

• Cénomaniens :

Ces formations situées au Sud de Boussaâda, elles sont à prédominance carbonatée, dans lesquelles les horizons gypseux sont réduits.

• Barrémo-Bédoulien :

Dans la région de Boussaâda, le Barrémien est représenté par une épaisse série de grès tendres continentaux à stratification entrecroisée et d'argiles vertes ou lie de vin silteuses, avec des intercalations de bancs calcaires et dolomitiques rattachées à l'Aptien inférieur ou Bédoulien. C'est l'ensemble Barrémo-Bédoulien. Au NE du bassin, le Barrémien et l'Aptien inf. forment une épaisse série de calcaires, dolomies, marnes et grès.

• Albien

Dans la région de Boussaâda : série de grès tendres à stratification entrecroisée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, avec intercalations d'argiles vertes silteuses et sableuses, faciès annonçant le « Continental Intercalaire » saharien, parfois surmontées par une série carbonatée alternant avec des formations détritiques. Dans les Monts du Hodna, l'Albien est très réduit (calcaires et marnes) ou absent.

• Cénomaniens

Sur environ 500 m on trouve : une série argileuse, puis une série de gypses et de calcaires. Au sommet, la puissante formation calcaro-dolomitique aquifère est parfois attribuée au Turonien.

• Turonien

Dans la région de Boussaâda, ce sont des Calcaires bitumineux en plaquettes, marnes, et dolomies sur environ 100m. Au forage de M'doukal, les dolomies sont aquifères. Au Dj Metlili la série fait 400m d'épaisseur.

• Sénonien Inférieur

Série argileuse et marneuse de 100m, surmontée dans la région de Boussaâda par d'épais calcaires et marnes. Les marnes ont 600m d'épaisseur au Dj Metlili

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 l'Ain Koucha et l'Ain Diss.

II.2.1. L'étude piézométrique

La piézométrie constitue la synthèse de l'étude hydrogéologique, elle joue un rôle déterminant dans la connaissance du comportement hydrodynamique de l'aquifère, avec la configuration des conditions aux limites d'une nappe.

II.2.1.1. Inventaire des points d'eau

Pour cerner le fonctionnement de la nappe dans la zone d'étude, une carte piézométrique a été tracée par des données de mesure prélevées en 2020 par les services de la direction des ressources en eau de la wilaya de M'sila au niveau de 11 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(m)	Y(m)	Z(m)	Niveau piézométrique
01	Maadher1	613.72	390.02	520	64.32
02	Maadher village	613.89	390.41	464	62.33
03	Maarif	617.14	391.17	441	46.1
04	Banion-Sud ouest	621.08	391.66	400	69.48
05	Banion	621.18	391.10	437	43.6
06	Maadher 236	618.11	390.66	456	52.08
07	Maadher-BIS	618.48	390.52	459	15.39
08	Maadher232	612.60	390.31	488	17.07
09	Maiter 3	624.136	390.540	620	19.6
10	Maadher 235	615.56	390.01	485	58
11	Maiter 235 bis	611.133	390.970	620	44

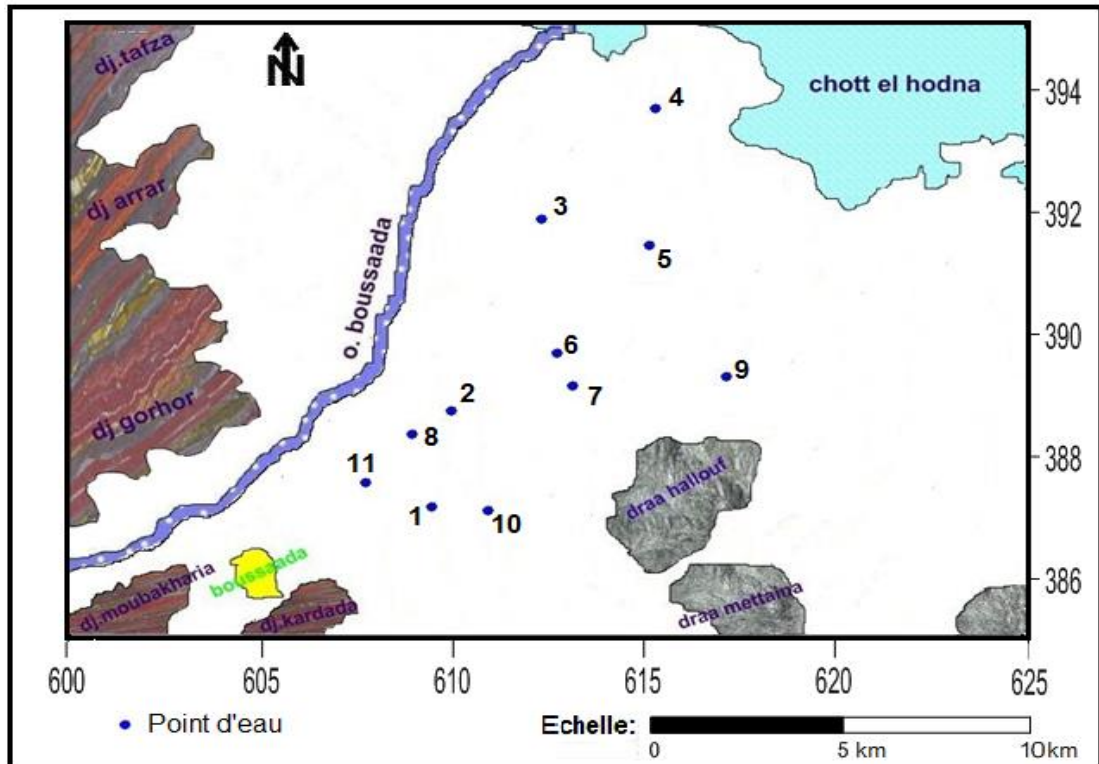


Figure II.4 Carte de position des forages étudiés

II.2.3. Etude et Interprétation de la carte piézométrique

L'établissement des cartes piézométriques est effectué par le logiciel surfer.10. L'analyse morphologique de la surface piézométrique des deux cartes doit obligatoirement passer par l'habillage des cartes piézométriques 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.

L'examen de la carte piézométrique (Fig. II.5) montre que l'écoulement est orienté suivant trois directions vers la dépression (Chott-El-Hodna) et à partir de trois parties :

- La première partie (Centre de la zone d'étude) : est caractérisée par des courbes à espacement croissant de plus en plus en allant vers la dépression (Chott-El-Hodna) et l'écoulement est de direction (O – NE).
- La deuxième partie : est caractérisée par des courbes à espacement croissant du piémont Nord du Djebel Draa Hallouf et l'écoulement est de direction (S – NE).
- La Troisième partie (Est) ; est caractérisée par des courbes serrées, ce qui correspond à un gradient hydraulique fort et l'écoulement est de direction (E – N).

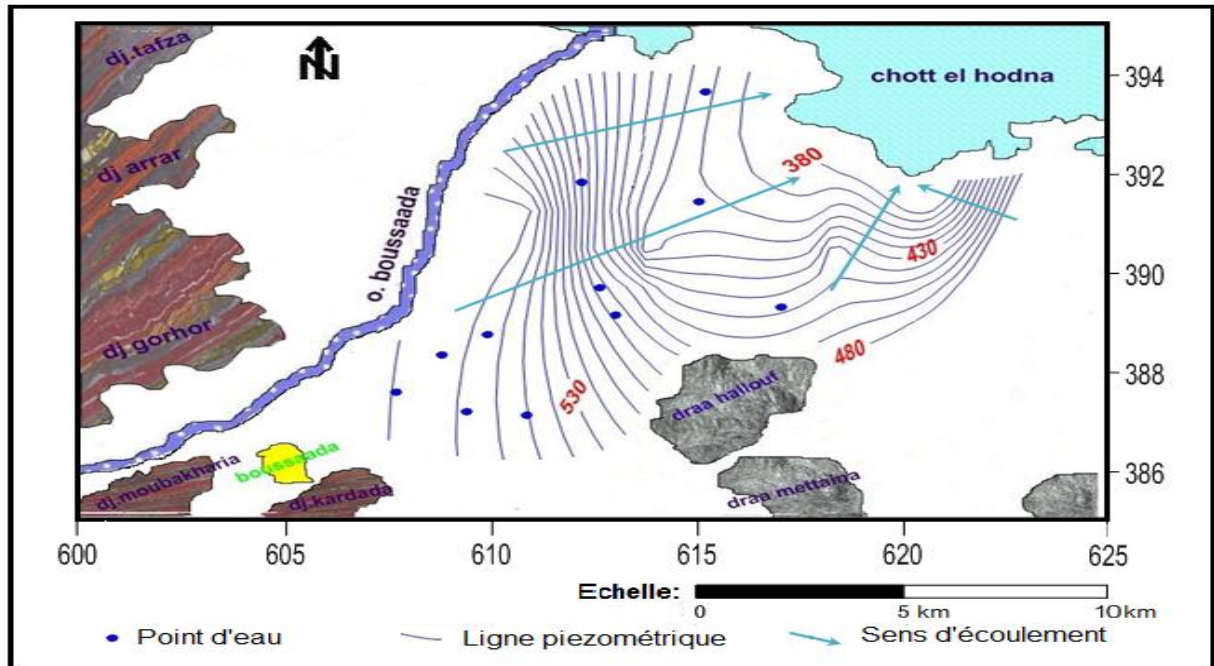


Figure II.5 La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudiée (Mai 2020)

II.3. Conclusion

La détermination des différents endroits favorable à l'implantation des forages est basée sur une bonne connaissance de la géologie locale et 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 où affleurent les barres carbonatées tel que les calcaire 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 gréseuse localisées dans la partie Sud de la Zone d'étude et les formations de calcaires sont assez peu représentées à Djebel Kerdada.

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

- ✓ Les zones correspondantes à des horizons à fort écoulement avec les directions de l'écoulement O-NE, S-NE et E-N.
- ✓ L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent la plaine de Maiter et Maadher où les axes d'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sont orientés vers la dépression Chott-El-Hodna.

CHAPITRE III

Etude hydrochimique et l'impact de la Salinité Sur les Eaux Souterraines de la Zone d'étude

III.1. Introduction

La zone Nord-est de la plaine de Boussaâda se caractérise par son climat semi-aride très sévère, avec une forte évapotranspiration, et une salinisation des sols qui devient de plus en plus très élevée en se rapprochant du chott El-Hodna. La sécheresse qui dure depuis plus de deux décennies, aggravée par le pompage intense des eaux souterraines dont l'absence de d'autres sources d'irrigation.

Ce ci nous a amené à entreprendre cette approche sur les analyses et l'interprétation des données chimiques effectuées pendant la période de Mars 2020 par des méthodes graphiques et statistiques en utilisant des supports informatiques « Logiciels » tels que : MapInfo, Surfer, Diagrammes, etc. Ces techniques permettent de déterminer:

- La répartition Spatiale et quantitative des éléments majeurs.
- les principaux faciès chimiques des eaux et leurs origines géologiques.
- Déterminer l'impact de la Salinité sur les Eaux Souterraines de la Zone d'étude et évaluer la qualité des eaux pour la potabilité et leur aptitude à l'irrigation.

III.2. Echantillonnage des eaux et Analyses au laboratoire :

Onze (11) échantillons prélevés au niveau de 11 forages durant la période de Mars 2020, qui font l'objet d'une étude de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Boussaâda (Fig. N°III.12).

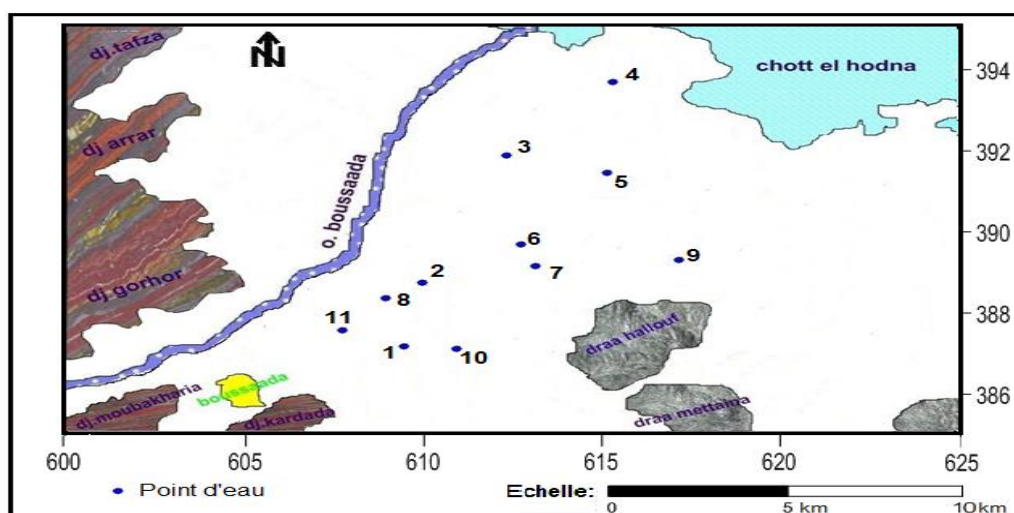


Figure III.1 Carte des points d'eau analysés

III.3. Etude et évaluation de la qualité des eaux :

III.3.1. Paramètres ayant fait l'objet de limite de qualité :

Les analyses ont été effectuées au niveau du laboratoire des services de l'algérienne des eaux (ADE) de la willaya de M'sila.

Les paramètres sont classés en deux grandes catégories :

- ✓ Paramètres physiques : T (C°), pH, conductivité électrique, DHT et TAC
- ✓ Paramètres chimiques : ont porté sur le dosage :
 - Des cations : Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺ et K⁺
 - Des anions: Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃, NO₃⁻ et NO₂⁻

III.3.1.1- Fiabilité des résultats mesurés au laboratoire :

Le contrôle du bilan ionique (BI) donne une valeur inférieure à 10%, ce qui atteste la bonne qualité des résultats obtenues.

$$B_i = \frac{\sum Cation(meq/l) - \sum Anion(meq/l)}{\sum Cation(meq/l) + \sum Anion(meq/l)} \times 100$$

A- Etude des paramètres physiques:

* - Température :

La température des eaux souterraines de la nappe superficielle a été mesurée in-situ à l'aide d'un thermomètre.

La variation de la température a été représentée dans le tableau suivant :

Tableau III.1 Valeurs statistiques de la température durant la période Mars 2020

Paramètres statistiques	Minimum	Moyenn e	maximu m	Ecart type	Cv
	°C	°C	°C		
Température	10.3	11	30	5.99	0.20
Norme de potabilité	T ≤ 25°C				

On remarque les valeurs de la température mesurées aux points d'eau 1 et 11 dépassent la norme de l'OMS (T ≤ 25°C).

* - **Le Potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH représente l'acidité ou l'alcalinité du milieu. A partir des résultats obtenus (tableau N° III. 8) on constate que les eaux de la nappe souterraine ont un pH qui varie entre **7.2** et **8** Les valeurs du pH mesurées aux différents points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme de potabilité fixée par l'OMS (**6.5 - 9.2**).

Tableau III.2 Valeurs statistiques du pH

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	maximum	Ecart type	Cv
pH	7.2	7.49	8	0.26	0.03

L'examen de la carte du pH (Fig. N°III. 13) montre que les valeurs élevées caractérisent les eaux des parties Sud et centre de la zone d'étude.

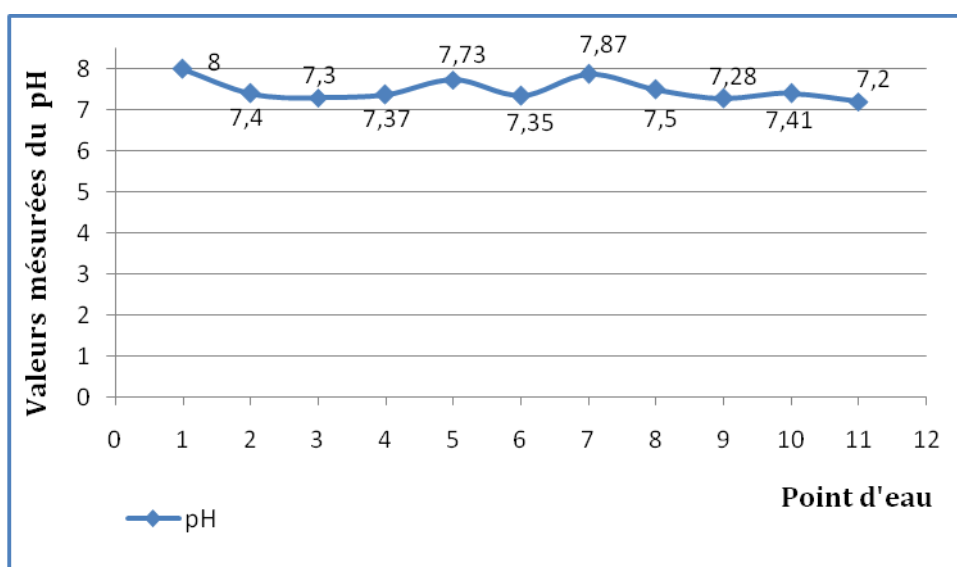


Figure III.2 Variation du pH des eaux (Mars 2020)

*-La Conductivité électrique (CE) :

La conductivité d'une eau augmente avec sa teneur en sels dissous, elle permet donc une estimation de la minéralisation. L'analyse des résultats statistiques du tableau N°09 montre des valeurs très élevées avec une valeur maximale atteinte 3360 $\mu\text{S/cm}$. Ce qui traduit la salinité des eaux de la zone d'étude

Tableau III.3 Valeurs statistiques de la conductivité électrique

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$		
2020	1524	2483,55	3360	716.97	0.21
Norme de l'OMS $\leq 1500 \mu\text{S/cm}$					

Le tableau N°10 montre que 55% des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda montrent un degré de minéralisation élevé à très élevé sont plus conductrices donc plus minéralisés.

Tableau III.4 Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité

Conductivité $\mu\text{S/cm}$ à $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$	Degré de Minéralisation	pourcentage des points d'eau (%)
< 45	Très faible	/
450 – 750	Faible	/
750 – 1500	Moyen	/
1500 – 2300	Moyennement élevée	45
2300 – 3000	Elevée	18
> 3000	Très élevée	36

La figure (N°.III. 14) montre que les valeurs de la conductivité élevées sont enregistrées aux points d'eau : 1, 8, 10 et 11 à la partie Sud et 7, 9 à la partie centre de la zone d'étude.

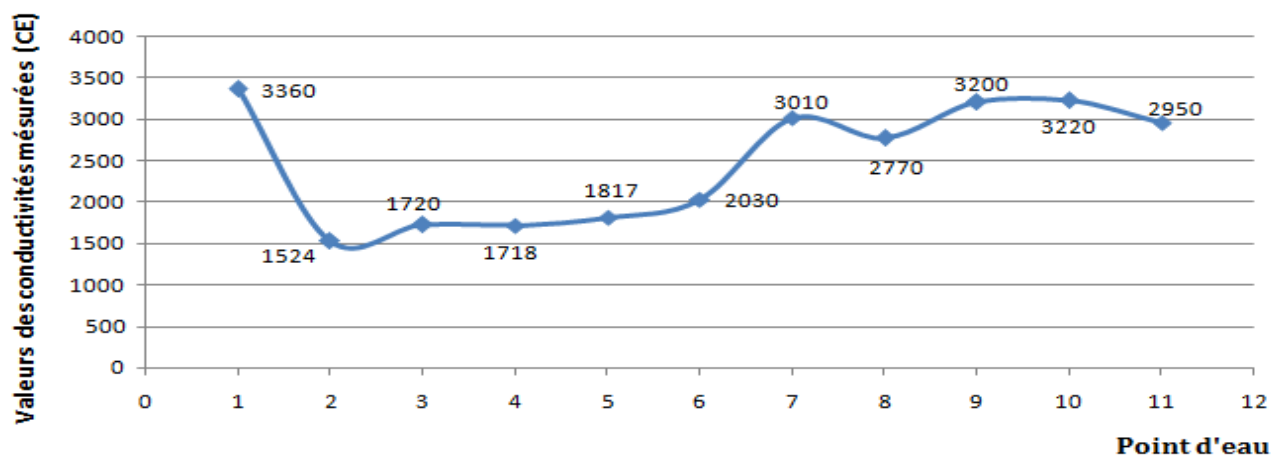
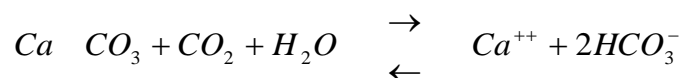


Figure III.3 Variation de CE des eaux (Mars 2020)

B- Etude des paramètres chimiques

a- Le calcium Ca^{++} :

Le Calcium est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carboniques. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles selon l'équation suivante :



Le tableau N°11 et Fig. N°15 montrent que 27% des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en calcium qui dépassent la norme de l'OMS et concernent les eaux des forages 1,9, et 11. Cela revient principalement à la dissolution des roches carbonatées du massif de Dj. Kerdada.

Tableau III.5 Valeurs statistiques du calcium

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$		
Ca^{++}	112	192.44	320	62.08	0.19
Norme de l'OMS (200 mg/l)					

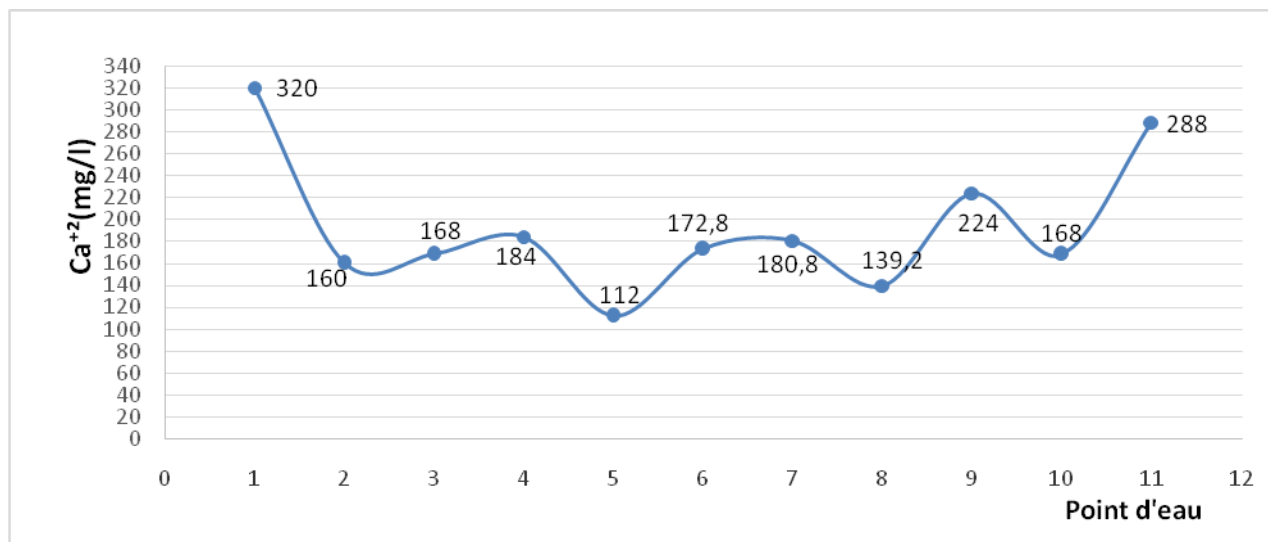


Figure III.4 Variation spatiale des valeurs des teneurs en calcium (Ca^{2+}) dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

b - Le magnésium Mg^{++} :

Il provient de l'attaque chimique des formations calcaro- dolomitiques par l'eau en présence du gaz carbonique, ainsi que de la dissolution de (Mg SO_4) dans les terrains gypseux et des minéraux ferromagnésiens.

Le tableau N°12 et Fig. N°16 montrent que 45% des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en magnésium qui dépassent la norme de l'OMS et concernent les eaux des forages 1,7, 8, 10 et 11. Dû à la dissolution des formations calcaro- dolomitiques.

Tableau III.6 Valeurs statistiques du magnésium

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$		
Mg^{++}	102.06	148.19	208.98	36.96	0.18
Norme de l'OMS (150 mg/l)					

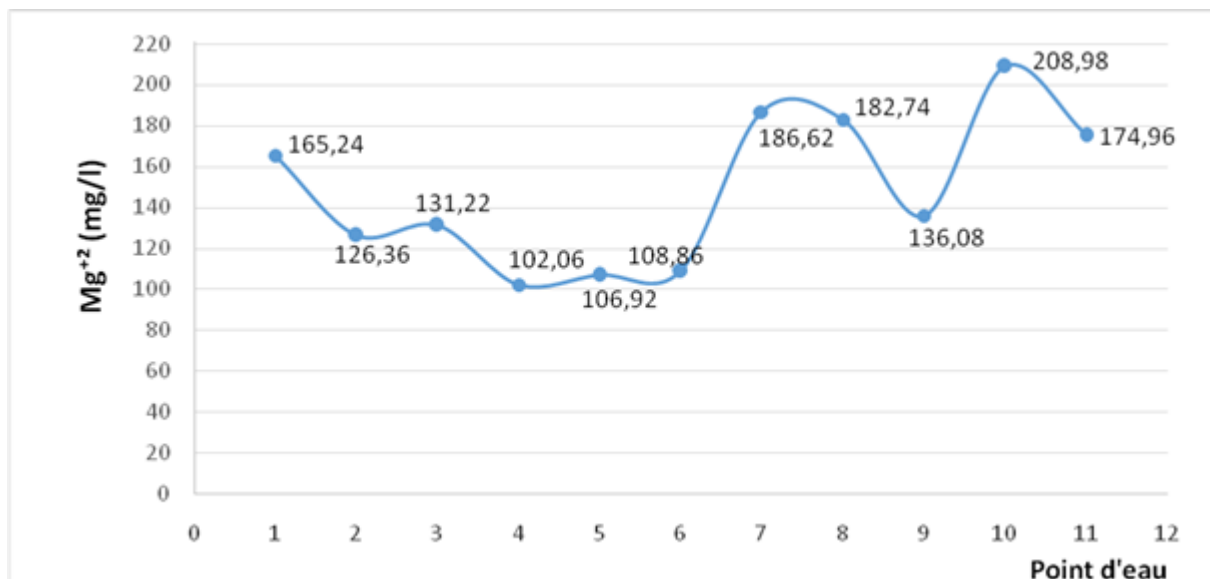


Figure III.5 Variation spatiale des valeurs des teneurs en magnésium (Mg²⁺) dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

c- Sodium Na⁺ :

Le sodium est élément, très abondant dans la nature, surtout dans l'eau de mer et provient aussi du lessivage ou de la percolation de terrains salés. Il joue un rôle important en irrigation à cause du fait de son action sur la perméabilité des sols.

Le tableau N°13 et Fig. N°17 montrent que la totalité des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en sodium dans la norme de l'OMS. Cela dû probablement à l'échange de base entre les ions de sodium et les ions du calcium.

Tableau III.7 Valeurs statistiques du sodium

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	μS/cm	μS/cm	μS/cm		
Na ⁺	63	102.73	160	33.04	0.21
Norme de l'OMS (200 mg/l)					

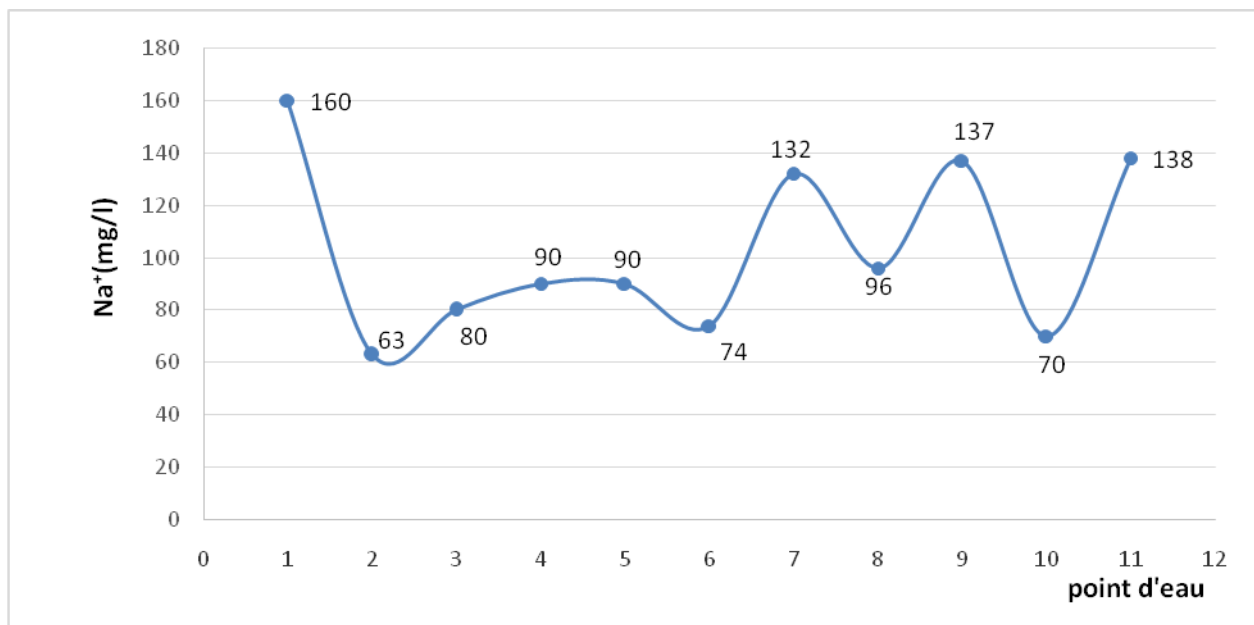


Figure III.6 Variation spatiale des valeurs des teneurs en sodium (Na) dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

d- Potassium K⁺ :

Le potassium beaucoup moins abondant que le sodium et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l.

L'examen du tableau N°14 et Fig. N°18 montrent que toutes les eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en potassium inférieures à la norme de l'OMS.

Tableau III.8 Valeurs statistiques du potassium

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	µS/cm	µS/cm	µS/cm		
K ⁺	3.30	6.53	8.60	1.42	0.16
Norme de l'OMS (20 mg/l)					

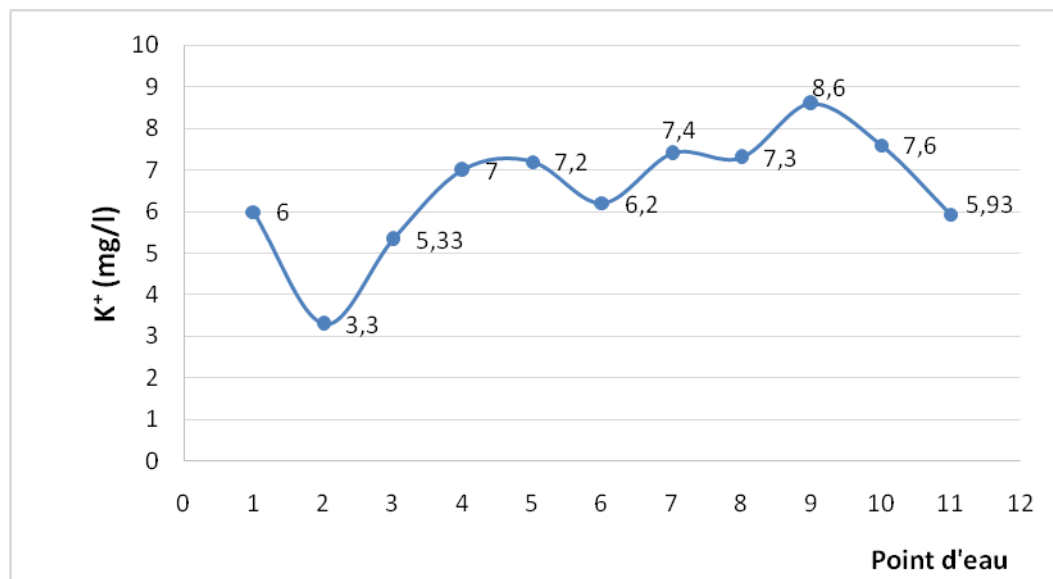


Figure III.7 Variation spatiale des valeurs des teneurs en potassium (K⁺) dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

e- Les chlorures 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.

La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo - sableuses ou argileuses. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion dans les canalisations et les réservoirs à partir de 50 mg/l (norme de l'O.M.S). 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.

D'après le tableau N°15 et Fig. N°19 toutes les eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en chlorures inférieures à la norme maximale admissible de l'OMS.

Tableau III.9 Valeurs statistiques des chlorures

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	μS/cm	μS/cm	μS/cm		
Cl ⁻	142	201.38	248.5	45.49	0.18
Norme de l'OMS (600 mg/l)					

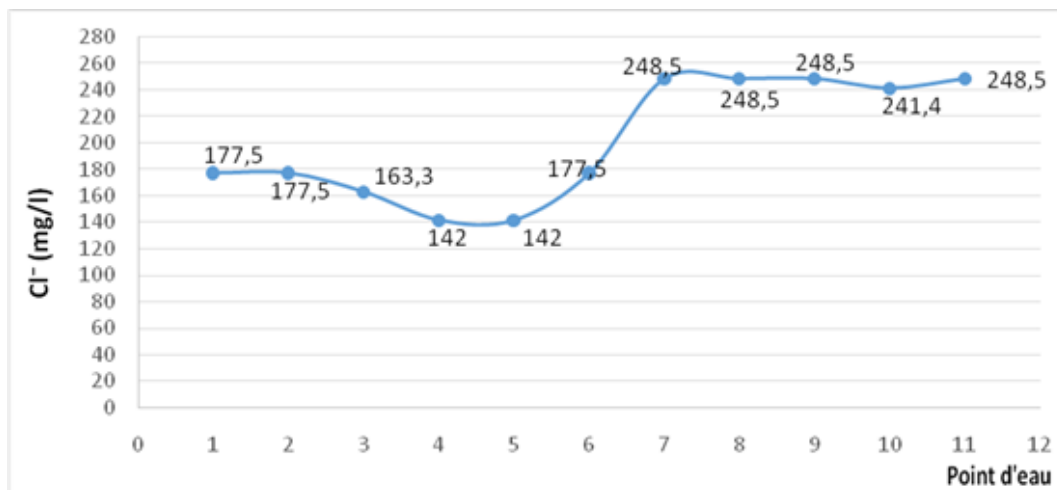
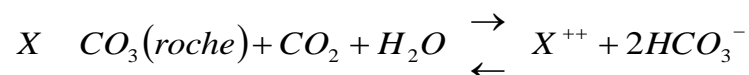


Figure III.8 Variation spatiale des valeurs des teneurs en chlorures (Cl-) dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

f- Les Bicarbonates HCO₃⁻⁻ :

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico - chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :



Leur origine principale est la dissolution de roches carbonatées, donc sa concentration dans l'eau est en fonctions des paramètres suivants :

- Concentration du CO₂ dissous
- Température de l'eau
- pH de l'eau

L'élément (X) peut être le (Ca⁺⁺), ou le (Mg⁺⁺), il est beaucoup probable que ce soit le Ca⁺⁺, car le Mg⁺⁺ est très solubles, sauf si l'eau est thermale.

D'après le tableau N°16 et Fig. N°20 les valeurs les plus élevées des bicarbonates sont enregistrées au centre de la plaine Nord-est de Boussaâda. Dû principalement à la dissolution des roches carbonatées et au lessivage des terrains sédimentaires.

Tableau III.10 Valeurs statistiques des bicarbonates

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	µS/cm	µS/cm	µS/cm		
HCO₃⁻⁻	244	364.89	427	66.48	0.16

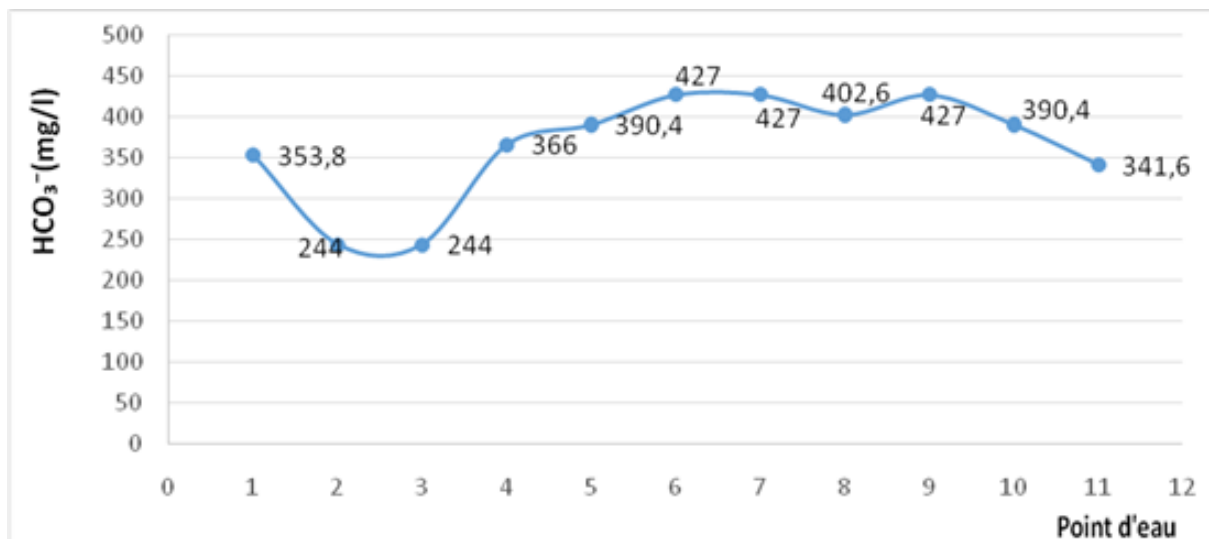


Figure III.9 Variation spatiale des valeurs des teneurs en bicarbonates (HCO₃⁻) dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

g- Les sulfates SO₄²⁻ :

Les sulfates contenus dans l'eau souterraines résultent de :

- La dissolution du gypse (Ca SO₄ 2H₂O).
- L'utilisation des engrais chimiques.
- Le lessivage des terrains argileux et marneux.

L'examen des résultats des analyses chimiques et statistiques, tableau N°17 et Fig. N°21 montre que 72.72% des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda dépassent la norme de l'OMS et concernent la partie centre et Sud. Cela revient aux trois causes citées ci-dessus.

Tableau III.11 Valeurs statistiques des sulfates

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	μS/cm	μS/cm	μS/cm		
SO ₄ ²⁻	300	650	920	242.07	0.26
Norme de l'OMS (400 mg/l)					

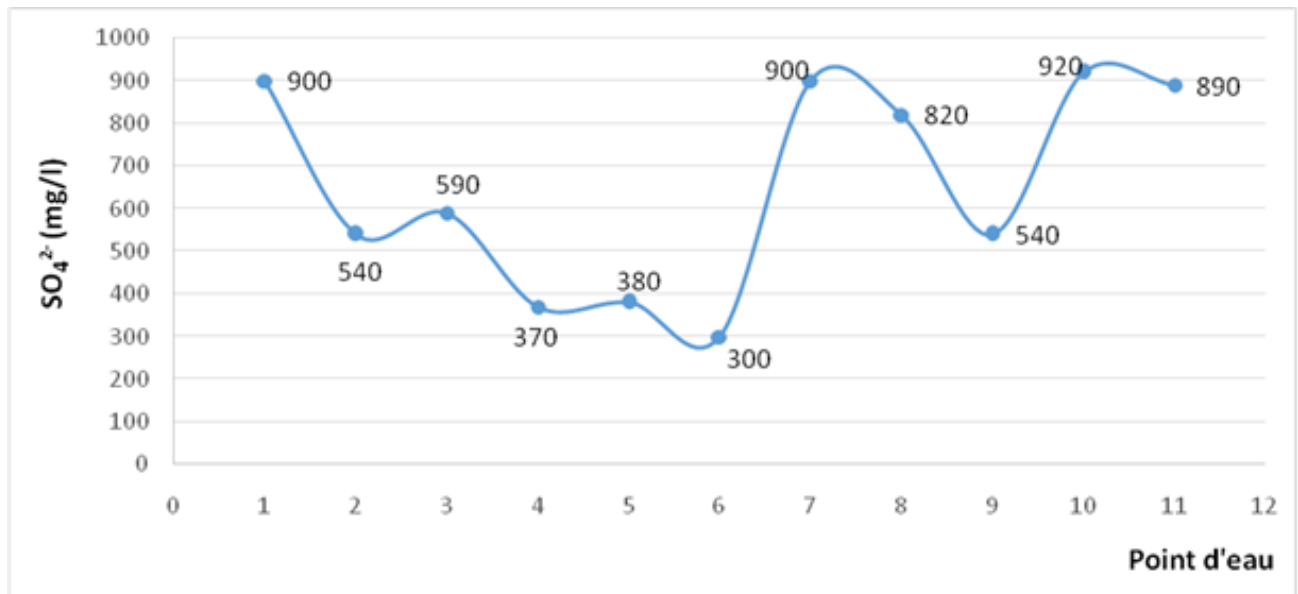


Figure III.10 Variation spatiale des valeurs des teneurs en sulfates SO₄²⁻ dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

h- Les nitrates NO₃⁻ :

Les nitrates sont des composés naturels présents dans tous les écosystèmes. Ils sont essentiels aux végétaux, mais peuvent devenir néfastes pour les plantes et les animaux s'ils sont trop abondants. Ils entrent aussi dans la composition des engrais chimiques et naturels (fumiers). Les cours d'eau, les lacs et les étangs peuvent renfermer des nitrates provenant des diverses sources : zones agricoles dans lesquelles on fait une forte utilisation d'engrais, parcs d'engraissement de bétail et pâturages, et zones de traitement des eaux usées, donc ont une origine essentiellement agricole (engrais, élevage...) et urbaine (égouts). Les nitrates dans l'eau potable sont mesurés à la fois en terme de quantité d'azote présent ou en quantité d'oxygène et d'azote. Les normes pour le nitrate dans l'eau potable est de 50mg/l de nitrate mesuré en mg/l de nitrate NO₃, lorsque l'oxygène est mesuré comme l'azote. L'excès de nitrate et le dépassement de la norme porte un potentiellement dangereux à la santé humaine, notamment pour les bébés.

Le tableau N°18 et Fig. N°22 montrent que 55% de la totalité des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda ont des teneurs en nitrates dépassent la norme de l'OMS. Cela dû à l'utilisation des fertilisants (Engrais chimiques, fumiers, ...) et lessivage des terrains agricoles durant la période pluviale.

Tableau III.12 Valeurs statistiques des nitrates

Paramètres statistiques	Minimum	moyenne	Maximum	Ecart type	Cv
	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$		
NO_3^-	29	150	69.36	38.13	0.25
Norme de l'OMS (50 mg/l)					

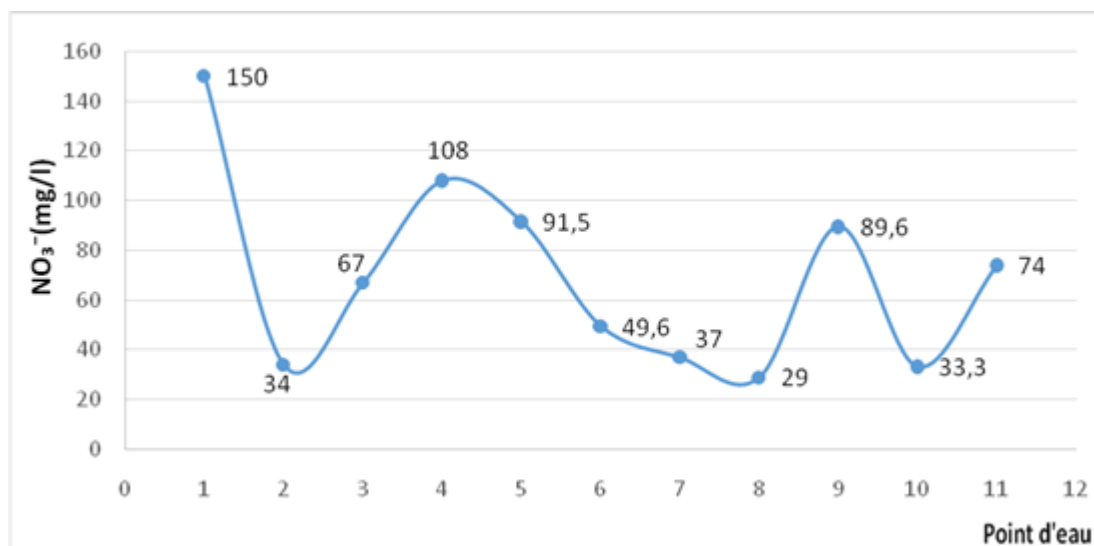


Figure III.11 Variation spatiale des valeurs des teneurs en nitrates NO_3^- dans les eaux de la nappe (Mars 2020)

* - Détermination et répartition des faciès chimiques :

Le faciès chimique a été déterminé à l'aide du diagramme de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff.

Les résultats des analyses chimiques de cette campagne a été reporté sur le diagramme de piper (Fig. N°23) ; ce qui permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines présentée par une seule famille caractérisée par un faciès global : Chlorurée et sulfatée calcique à magnésien.

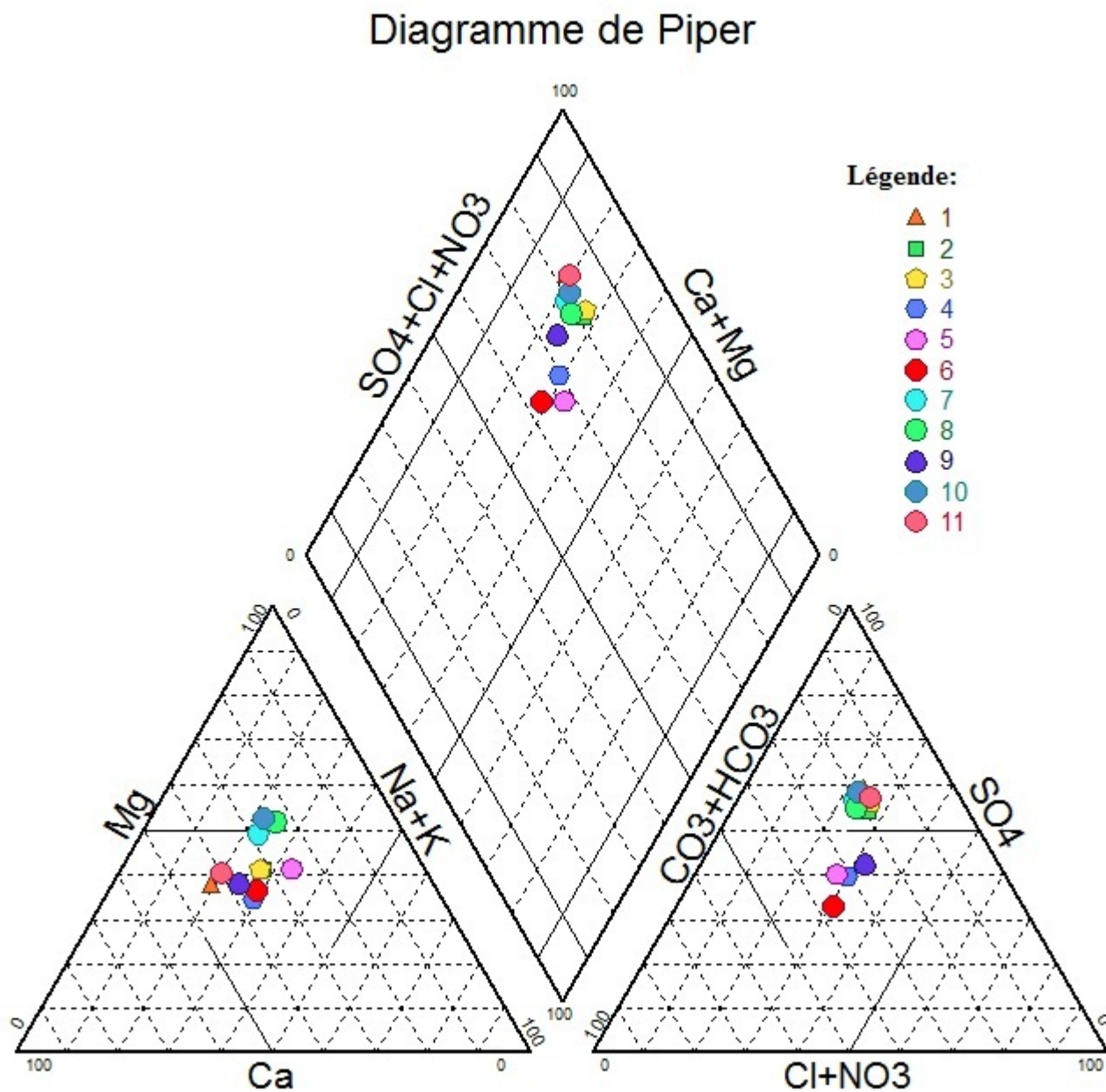


Figure III.12 Diagramme de piper

Le diagramme H. SCHOELLER (1932), révisé par BERKALOFF en 1952, il est composé de sept échelles logarithmiques verticales correspondant aux principaux ions analysés dans l'eau. Ce diagramme (Fig.N°24) a permis d'identifier les grandes familles chimiques suivantes (tableau N°19) :

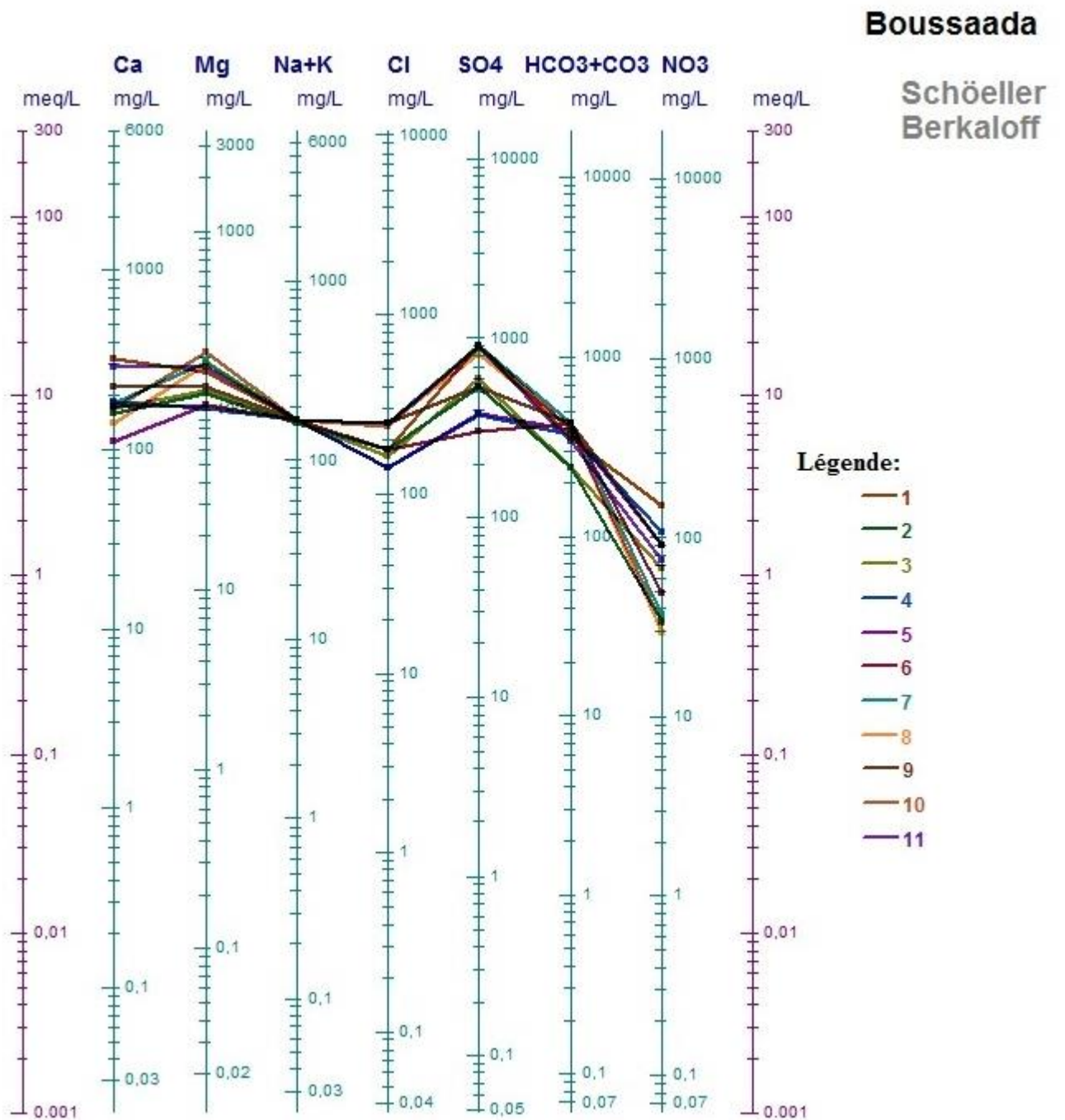


Figure III.13 diagramme de SCHOELLER – BERKALOFF

Tableau III.13 Faciès chimiques des eaux selon la méthode de SCHOELLER–BERKALOFF

Compagne chimique	Faciès chimiques		Effectif	Pourcentage (%)	
Familles de faciès chimiques	Famille des eaux Sulfatées	Sulfaté magnésien	6	55	100
		Sulfaté calcique	5	45	

La méthode semi-log de Schoeller et Berkaloff, permet de constater deux faciès chimiques :

- Le faciès Sulfaté- magnésien avec 55% de cas.
- Le faciès Sulfaté- Calcique avec 45% de cas,

Par La classification de SCHOELLER, on peut classer les eaux selon les concentrations en sulfates et en chlorures comme suit (Tableaux 20 et 21).

Tableau III.14 Classification de SCHOELLER selon la concentration en sulfates

Classe	Limites requises (méq/l)	Nbre des points	Taux (%)	Observation
Eaux hyper sulfatées	r So4 > 58	/	/	/
Eaux sulfatées	r So4 entre 58 et 24	/	/	/
Eaux Oligo-sulfatées	r So4 entre 24 et 6	11	100	Teneur normale
Eaux sulfatées normales	r So4 < 6	/	/	Teneur normale

- La totalité des échantillons présentent des teneurs normales en sulfates.

Tableau III.15 Classification de SCHOELLER selon la concentration en chlorures

Classe	Limites requise (méq/l)	Nbre de points	Taux %	Observation
Eaux hyper chlorurées	r Cl >700			/
Eaux chloro thalassiques	r Cl entre 700 et 420	-	-	/
Eaux chlorurées fortes	r Cl entre 420 et 140	-	-	/
Eaux chlorurées moyennes	r Cl entre 140 et 40	-	-	/
Eaux Oligo-chlorurées	r Cl entre 40 et 10	-	-	Teneur normale
Eaux chlorurées normales	r Cl < 10	20	100	Teneur normale

- Ces eaux sont à 100 % chlorurées normales avec des teneurs normales en chlorures

III.4. Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base défini par SCHOELLER en 1934 est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante :

$$i.e.b1 = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$$

Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca^{++} et Mg^{++} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes. Par contre si l'i.e.b est positif, les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes. Dans le cas où l'i.e.b est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échangé des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permetolites, il est préférable de calculer l'i.e.b par la formule suivante :

$$i.e.b2 = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rSO_4^- + rHCO_3^- + rNO_3^-}$$

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain.

- Interprétation des résultats :

L'interprétation des données des i.e.b calculés (Tableau N°.III. 22) montre que la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude ont un i.e.b positif ce qui signifie que les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{++} et Ca^{++} des formations encaissantes et explique le faciès calcique et magnésien.

Tableau III.16 Indices d'échanges de base

Echantillon	I.E.B 1	I.E.B 2
1	-0,40	-0,08
2	0,44	0,14
3	0,23	0,06
4	-0,01	0,00
5	-0,01	0,00
6	0,33	0,12
7	0,16	0,04
8	0,39	0,11
9	0,13	0,05
10	0,53	0,14
11	0,13	0,04

III.5. Qualité chimique des eaux :

Pour la détermination de la qualité chimique des eaux on a utilisé d'une part des normes fixées par l'organisation mondiale de la santé (O.M.S) et d'autre part par le degré hydrotimétrique.

III.5.1. Potabilité des eaux:

La potabilité des eaux souterraines est définie en se basant sur deux types de normes. Ceux de l'O.M.S et ceux basés sur le D.H.T.

a- Selon l'O.M.S :

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (Tableau N°23) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

- Une concentration maximale acceptable à partir de laquelle une eau provoque une certaine réticence chez le consommateur.
- Une concentration maximale admissible qui correspond à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse à la santé.

L'examen du tableau N°23 montre que tous les échantillons ont des teneurs en chlorures Cl^- inférieures à la norme maximale admissible, les nitrates NO_3^- avec 82% du total de cas inférieures à la norme maximale admissible. Pour le calcium, on a 73% des eaux qui ont des teneurs inférieures aux normes. Pour le magnésium on a 55% et pour les Sulfates on a 27% qui ont des teneurs < à la norme maximale admissible.

Tableau III.17 Normes de potabilité de l'O.M.S

Eléments chimiques	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)	Pourcentage des échantillons ayant une concentration inférieure à la concentration maximale admissible
Calcium	75	200	73
Magnésium	50	150	55
Sulfates	200	400	27
Chlorures	200	600	100
Nitrates	50	100	82

b- Normes selon le degré hydrotimétrique total (D.H.T) :

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

$$DHT = rCa^{++} + rMg^{++} \quad (\text{en } \text{még/l})$$

$$DHT = (rCa^{++} + rMg^{++}) \times 5 \quad (\text{en } \text{degré Français } ^{\circ}F)$$

Le (tableau N°.24) ci-dessous montre que la totalité des eaux analysées sont très dure (100%) avec D.H.T est supérieur à 54 °F. Ce qui peut créer des conséquences plus ou moins néfastes telle que la consommation excessive du savon et la mauvaise cuisson des légumes secs.

Tableau III.18 Dureté des eaux en (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)

D.H.T (en °F)	0 - 7	07-22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Pourcentage des points d'eau	/	/	/	/	100%

Nous pouvons dire que les eaux souterraines de la zone d'étude sont très dures, donc impropre à la consommation.

III.5.2. L'impact de la salinité sur les eaux souterraines et leur aptitude à l'irrigation:

La rareté des précipitations et la forte évaporation, on contraint les agriculteurs à utiliser les eaux du barrage dans l'irrigation des terres agricoles. C'est Pour cette raison que la qualité de l'eau utilisée dans l'agriculture doit présenter les meilleurs paramètres physicochimiques.

Les eaux chargées en sels minéraux posent des problèmes pédologiques et agronomiques entraînant une influence sur la croissance des plantes. Parmi ces sels, on peut citer le cas des sulfates et du

sodium, qui avec de fortes teneurs influent sur la structure physique du sol et sur le développement de la plante.

Pour mettre en évidence de phénomène nous allons utiliser trois méthodes qui sont:

- la Salinité CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- la Classification de RICHARD (SAR)
- la Classification de WILLOX

a-Salinité :

Selon R. S. AYERS et D. W. WESTCOT (1988) quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. 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 en $\mu\text{S} / \text{cm}$ est inférieure à 700, il n'y aucune restriction pour l'irrigation ;
- Si, la conductivité varie entre 700 et 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- Et si, elle est supérieure à 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est forte.

L'examen du (Tableau N° 25) montre que 64% des points d'eau de la zone d'étude représentent une restriction légère à modéré et 36% de la totalité des cas une restriction forte, d'où en cas d'irrigation avec ces eaux chargées en sels, on peut s'attendre à des chutes de rendements de certaines cultures pratiquées et il est recommandé d'irriguer avec ces eaux les cultures tolérantes en sels, de pratiquer des cultures sur les sols légers (sableux), de faire des apports d'eau supplémentaires. (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988).

Tableau III.19 Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité)

Restriction pour l'irrigation	CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Pourcentage des échantillons (%)
Aucune	< 700	/
Légère à modéré	700 – 3000	64
Forte	> 3000	36

b- Les eaux peu salées :

Les eaux peu salées dont la conductivité électrique est inférieure à 200 $\mu\text{S} / \text{cm}$ ont une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol ce qui entraîne la dispersion des particules plus et l'obturation des espaces poreux (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988).

La valeur minimale de conductivité des eaux de la plaine Nord-est de Boussaâda est supérieure à 200 $\mu\text{S} / \text{cm}$, donc ce cas ne se rencontre pas.

C- Les eaux à forte teneur en sodium :

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et une destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988). Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l.}$$

III.5.3. Comparaison des classes issues des méthodes de Richards et de WILCOX**a-Classification de Richards :**

Cette classification a été proposée par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation.

En effet, cette classification ne peut prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides ou semi- arides auxquels elle est destinée. Elle donne une vision sur l'état actuel de ces caractéristiques mais ne permet pas d'anticiper sur le devenir de cette eau.

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problèmes liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol.

Après avoir reporté tous les points d'eau sur le diagramme de Richards, selon la conductivité électrique et la valeur de SAR (voir Fig.25), un (Tableau 26) ci-dessous récapitule les résultats obtenus après interprétation du diagramme.

Tableau III.20 Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards

Classes		% des points d'eau	% cumulé
Admissible	C ₃ S ₁	5	45
Médiocre	C ₄ S ₁	6	55

Deux classes apparaissent (admissible, médiocre et mauvaise). Chaque classe présente ses propres caractéristiques.

- Admissible (C₃ S₁)** : Elle claustré généralement les eaux moyennement minéralisées avec des risques de salinisation moyens et de faible alcalisation; représente 45% des eaux des forages localisés à la partie centre, convenable pour l'irrigation des cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit être contrôlée ;
- Médiocre (C₄S₁)** : cette classe se caractérise par les eaux de forte minéralisation, présentant des risques de salinisation des sols importants, mais à alcalisation moyenne. 55% des eaux des forages appartenant à cette classe, localisés au Sud de la plaine, pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces (concombre, ...) bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

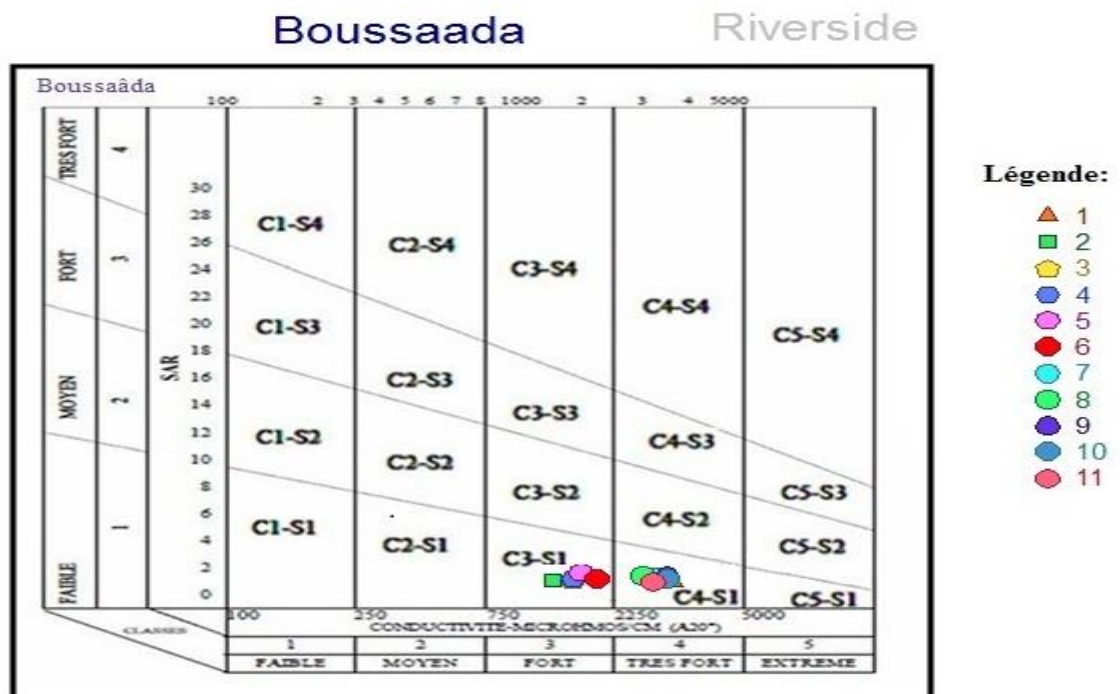


Figure III.14 Diagramme de Richard de classification des eaux pour l'irrigation

D'après SALINE AND SOILS

(Complété par J.H DURANS)

b-Classification de Wilcox :

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

$$\%Na^+ = \frac{Na^+}{Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+} \times 100, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l.}$$

Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente – Bonne – Admissible- Médiocre - Mauvaise (Fig.15).

D'après le diagramme de Classification de Wilcox, les résultats rapportés dans le tableau montre que 36% des points d'eau sont représentés par la bonne classe et concerne la partie du centre vers le Nord-est de la zone d'étude située dans le sens d'écoulement d'où la dilution des éléments minéraux, la classe médiocre est représentée par 28% des eaux et retient les points d'eau situés au centre de la plaine, le reste de 36% appartient à la classe mauvaise avec des conductivités très élevées et touche la partie Sud très influencée par la salinité du lac salé (Chott El-Hodna) et l'amas du sel surtout pendant la période de la sècheresse.

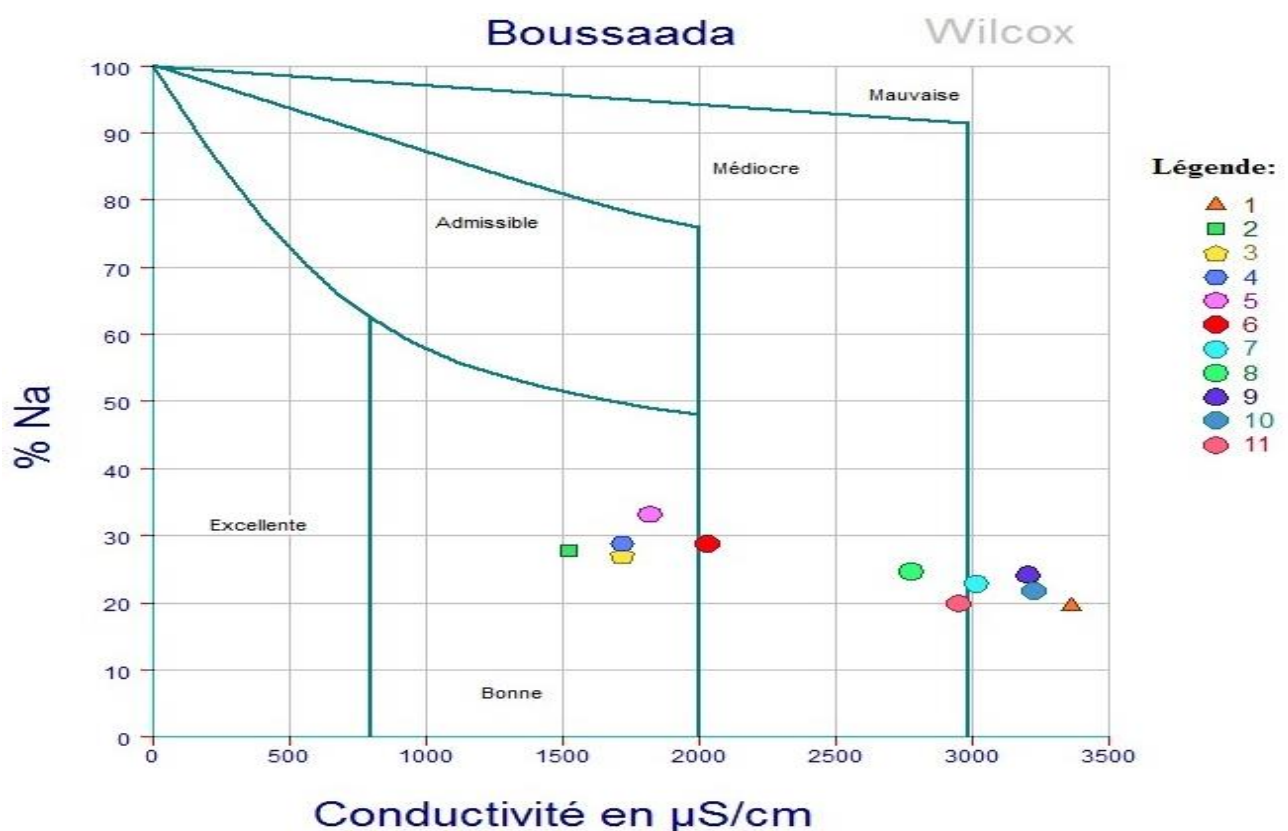


Figure III.15 DIAGRAMME DE WILCOX

Tableau III.21 Résultats de l'interprétation du diagramme de Wilcox

Classes	% des points d'eau
Excellente	/
Bonne	36
Médiocre	28
Mauvaise	36

III.6. Classification des certaines cultures maraichères par tolérance à la salinité :

Cultures peu tolérantes	Cultures à tolérance moyenne	Cultures très tolérantes
Radis, céleri, fève en vert, haricot vert, fraise, melon.	Tomate, choux, poivron, laitue, mais pomme de terre melon, carotte, oignon, petit pois, courge, concombre.	Betterave rouge, asperge, épinard.

III.7. Conclusion :

L'étude hydrochimique effectuées sur les résultats des analyses des eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda nous a permet de conclure :

- L'analyse générale des résultats physico-chimiques des eaux a montré que tous les échantillons ont des teneurs en chlorures Cl^- inférieures à la norme maximale admissible fixée par l'OMS, les nitrates NO_3^- avec 82% du total de cas inférieures à la norme maximale admissible. Pour le calcium, on a 73% des eaux qui ont des teneurs inférieures aux normes. Pour le magnésium on a 55% et pour les Sulfates on a 27% qui ont des teneurs < à la norme maximale admissible.
- L'application du diagramme de piper a donné une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines présentée par une seule famille caractérisée par un faciès global : Chlorurée et sulfatée calcique à magnésien. La méthode semi-log de Schoeller et Berkloff, permet de constater deux faciès chimiques :
 - Le faciès Sulfaté- magnésien avec 55% de cas.
 - Le faciès Sulfaté- Calcique avec 45% de cas.
- ✓ L'étude d'échange de base a montré que la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude ont un i.e.b positif ce qui signifie que les ions Na^+ et K^+ sont remplacés par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} des formations encaissantes, ce qui explique la dominance du faciès calcique et magnésien.

- L'analyse de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude et leur convenabilité à la potabilité a montré une forte dureté (D.H.T supérieur à 54 °F). Donc impropre à la consommation et peut entraîner des conséquences assez néfastes comme une consommation excessive de savon et une mauvaise cuisson des légumes.
- D'après les diagrammes de Wilcox et Richards de classification des eaux pour l'irrigation, les résultats rapportés dans le tableau montre que 36% des points d'eau sont représentés par la bonne classe et concerne la partie du centre vers le Nord-est de la zone d'étude situés dans le sens d'écoulement d'où la dilution des éléments minéraux, la classe médiocre est représentée par 28% des eaux et retient les points d'eau situés au centre de la plaine, ces eaux conviennent à l'irrigation des cultures moyennement tolérantes au sel et sur des sols drainés et lessivés (Tomate, choux, poivron, laitue, mais, pomme de terre, melon, carotte, oignon, petit pois, courgette, concombre...). Le reste de 36% appartient à la classe mauvaise avec des conductivités très élevées et touche la partie Sud très influencée par la salinité du lac salé (Chott El-Hodna) et lamas du sel surtout pendant la période de la sécheresse. Ces eaux conviennent à l'irrigation de certaines espèces de cultures (Betterave rouge, asperge, épinard, ...) bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés avec des importants débits d'irrigation.

CONCLUSION GENERALE

La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, sec et très chaud en été et très froid hiver.

Le sous bassin versant de forme allongée, draine une grande surface, de relief modéré, de pente moyenne, d'une densité de drainage moins dense et de longueur du cours d'eau importante.

Le sous bassin présente des conditions favorables pour l'accumulation des eaux souterraines, à partir des bords de la plaine ou affleurent les barres carbonatées tel que les calcaire 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 gréseuse localisées dans la partie Sud de la Zone d'étude et les formations de calcaires sont assez peu représentées à Djebel Kerdada.

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

- Les zones correspondantes à des horizons a fort écoulement avec les directions de l'écoulement

O-NE, S –NE et E-N.

- L'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent la plaine de Maiter et Maadher où les axes de l'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sont orientés vers la dépression Chott-El-Hodna.

L'étude hydrochimique effectuées sur les résultats des analyses des eaux souterraines de la zone Nord-est de Boussaâda nous a permet de conclure :

- L'analyse générale des résultats physico-chimiques des eaux a montré que tous les échantillons ont des teneurs en chlorures Cl^- inférieures à la norme maximale admissible fixée par l'OMS, les nitrates NO_3^- avec 82% du total de cas inférieures à la norme maximale admissible. Pour le calcium, on a 73% des eaux qui ont des teneurs inférieures aux normes. Pour le magnésium on a 55% et pour les Sulfates on a 27% qui ont des teneurs < à la norme maximale admissible.
- L'application du diagramme de piper a donné une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines présentée par une seule famille caractérisée par un faciès global : Chlorurée et sulfatée calcique à magnésien. La méthode semi-log de Schoeller et Berkloff, permet de constater deux faciès chimiques :

-Le faciès Sulfaté- magnésien avec 55% de cas.

-Le faciès Sulfaté- Calcique avec 45% de cas.

- L'étude d'échange de base a montré que la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude ont un i.e.b positif ce qui signifie que les ions Na^+ et K^+ sont remplacés par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} des formations encaissantes, ce qui explique la dominance du faciès calcique et

magnésien.

- L'analyse de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude et leur convenabilité à la potabilité à montrer une forte dureté (D.H.T supérieur à 54 °F). Donc impropre à la consommation et peut entraîner des conséquences assez néfastes comme une consommation excessive de savon et une mauvaise cuisson des légumes.
- D'après les diagrammes de Wilcox et Richards de classification des eaux pour l'irrigation, les résultats rapportés dans le tableau montre que 36% des points d'eau sont représentés par la bonne classe et concerne la partie du centre vers le Nord-est de la zone d'étude situés dans le sens d'écoulement d'où la dilution des éléments minéraux, la classe médiocre est représentée par 28% des eaux et retient les points d'eau situés au centre de la plaine, ces eaux conviennent à l'irrigation des cultures moyennement tolérantes au sel et sur des sols drainés et lessivés (Tomate, choux, poivron, laitue, maïs, pomme de terre, melon, carotte, oignon, petit pois, courgette, concombre...). Le reste de 36% appartient à la classe mauvaise avec des conductivités très élevées et touche la partie Sud très influencée par la salinité du lac salé (Chott El-Hodna) et lamas du sel surtout pendant la période de la sécheresse. Ces eaux conviennent à l'irrigation de certaines espèces de cultures (Betterave rouge, asperge, épinard, ...) bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés avec des importants débits d'irrigation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] BELKHIRI. I.(2005) : Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ain Azel (Sétif), Thèse de magister en hydrogéologie. Batna 155 pages.
- [02] BELLAREDJ. A. M. « Caractérisation des eaux souterraines de la plaine de la M'leta (Algérie, Nord-Ouest) par application de méthodes statistiques multivariées (ACP) » université de Oran 89-90 page. (2013) .
- [03] BOUAROUDI .S(2012) : Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation. Thèse magistère en écologie .Univ Constantine.
- [04] BOUDOUKHA. A. : Etude hydrogéologique des hautes plaines sétifiennes et qualité des eaux souterraines » Thèse de doctorat D'état. Institut de chimie. Université Annaba 230 pages.(1998).
- [05] DEBICHE .T(2002) : Evaluation de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) Sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Thèse de doctorat .Univ du franc comté .195 pages.
- [06] DEMDOUM .A. (1996) : Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux des bassins fermes d'EL Eulma.
- [07] DJABRI L .(1996) : pollution des eaux de la vallée de la Sebouse – régions Guelma – Boucheouf – Annaba, ses origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines.
- [08] GHODBANE. M. : Estimation des potentialités des eaux souterraines et estimation de la pollution par les nitrates (Cas de la région de Chemora-Est algérien) » Thèse de doctorat en sciences . Département Hydraulique Université . Batna.2. (2018-2019).
- [09] GOUADIA et al : Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et Risque de dégradation des sols de la plaine de Meskiana (Nord-est Algérien).
- [10] HALALI. N. El Houda. Mémoire De Master En Hydraulique Option Hydraulique urbaine« Analyse Statistique Multivariées Des Eaux Souterraines De La Région De Boussaâda» (W. M'sila) Université De M'sila (2015-2016).
- [11] LAKHAL. A : Mémoire De Master En Hydraulique Option Irrigation Et Drainage Agricole «Analyse Spatio-temporel Des Précipitations Dans La Zone De La Mitidja» Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique Blida. (2018-2019).
- [12] MOKADEM .T : Mémoire De Master En Hydraulique Option Irrigation Et Drainage Agricole «La Cartographie Des Nitrates De La Plaine De Mitidja» Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique Blida. (2016-2017).

- [13] YAHIAOUI . S : Thèse de Magister «Evaluation de la qualité des eaux souterraines de la Mitidja et leur aptitude à l'irrigation» Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique Blida. (2011-2012).
- [14] HLALI . N : Mémoire de master en hydraulique «Analyse statistique multivariée des eaux souterraines de la région de Boussaâda » (2015_2016)
- [15] BOUSADIA. I et BEN BAGRA. I: Mémoire de master en hydraulique « Etude Hydrochimique et évaluation de la salinité des eaux souterraines de la région Chemora- w de Batna» (2019_2020)
- [16] GURBAS .A : Mémoire de master en hydraulique« Evaluation de la salinité de souterraines de la zone nord- ouest de la région de Chemora w de Batna »(2014)
- [17] BEN RABIA .A : Mémoire de master en hydraulique« Etude de la qualité de eaux souterraines de la région de Boussaâda wilaya de m'sila» (2013)

Résumé

La plaine Nord-est de Boussaâda (W. de M'sila), caractérisée par un climat semi-aride. La sécheresse et la pénurie des pluies connues ces dernières années au niveau de cette région rendent l'irrigation par les eaux souterraines de plus en plus sollicitées par la plupart des cultures. Ces eaux sont influencées par la salinité des terrains voisinant le lac salé (Chott El-Hodna). A cet effet une approche hydrochimique a été réalisée pour déterminer l'impact de la Salinité sur les Eaux Souterraines de la Zone d'étude, basée sur les résultats des analyses hydrochimiques des eaux prélevés de 11 forages captant les eaux de la nappe phréatique. Les résultats révèlent une dominance du Faciès chimique: Sulfatée calcique et magnésien. Ainsi montrent une dureté très élevées, donc impropre à la consommation et comme ils exposent trois classes des eaux pour l'irrigation des cultures ; une bonne classe avec 36% des eaux de la nappe situées dans le sens d'écoulement du centre vers le Nord-est, 28% de classe médiocre et concerne les eaux de la partie centre de la plaine. La dernière classe de qualité mauvaise représente 36% des eaux situées au Sud, caractérisées par des conductivités très élevées et influencées par la salinité du lac salé (Chott El-Hodna) et l'amas du sel surtout pendant la période de la sècheresse.

ملخص

المنطقة الشمالية الشرقية لبوسعادة بولاية المسيلة، تتميز بمناخ شبه جاف. حيث أدى الجفاف ونقص الأمطار الذي شهدته هذه المنطقة خلال السنوات الأخيرة إلى زيادة الطلب على المياه الجوفية لسقي معظم المحاصيل. مما أدى تأثير هذه المياه بملوحة الأراضي المجاورة للبحيرة المالحة (شط الحضنة). ولهذه الغاية قمنا بإعداد دراسة هيدروكيميائية لتحديد مدى تأثير الملوحة على المياه الجوفية في منطقة الدراسة وبناءً على نتائج التحاليل الهيدروكيميائية للمياه المأخوذة من 11 بئراً ارتوازي كشف النتائج عن هيمنة الشحنتات الكيميائية: كبريتات الكالسيوم والمغنيسيوم. مما يظهر درجة تمعدن عالية جداً ، وبالتالي فهي غير صالحة للاستهلاك. كما تبين ثلاث أنواع من المياه لري المحاصيل ؛ فئة جيدة تمثل 36% من المياه الجوفية تقع في اتجاه التدفق من المركز إلى الشمال الشرقي ، و 28% من المياه ذات نوعية متوسطة وتتعلق بمياه الجزء الأوسط من المنطقة. في حين النوع الأخير يقدر ب 36% من المياه و يمثل النوعية الرديئة و تمس الجزء الجنوبي لطبقة المياه الجوفية و التي تتميز بناقلية كهربائية عالية جداً متأثرة بملوحة البحيرة المالحة (شط الحضنة) وتراكم الأملاح خاصة خلال فترة الجفاف.