

**Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf – M'sila**



**Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique
MEMOIRE
Présenté pour l'obtention du diplôme
MASTER
FILIERE : Hydraulique
Option : Hydraulique urbaine
THEME**

**APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE DES
ÉLÉMENTS CONDITIONNANT LA QUALITÉ
CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES
DE LA RÉGION DE BOUSSAADA**

Enseignant :
M^r : Ghodbane.M

Présenté Par :
»Graine Abderrazak
» ben zemmouri mohamed

Promotion: 2017/2018

Remerciements

Au terme de cette étude, nous voulons d'abord remercier notre encadreur monsieur GHODBANE Messaoud pour ses précieux conseils, et ses orientations tout le long d'année. Ensuite, nous tenons à remercier aussi nos Professeurs et nos enseignants, pour l'intérêt qu'ils nous ont accordé. Enfin, nos reconnaissances iront aussi à toute personne qui nous a aidés de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Graine .A & Benzemmouri .M

Dédicace

Nous dédions ce mémoire A` nos très chers parents Qui peuvent être fier et trouvent ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour nous aider à avancer dans la vie. Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer leur juste valeur, la gratitude et l'amour qu'ils nous les portent. Chaque ligne de ce mémoire, chaque mot et chaque lettre vous 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 amis, avec qui nous avons partagé les moments les plus agréables. `A tous les étudiantes et les étudiants de ma promotion, que chacun trouve à travers ces lignes nos sincère amitié.

Graine .A & Benzemmouri .M

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I: Présentation Géographique Et les Conditions Naturelles.

I.1. Introduction.....	3
I.2. Aperçu géographique.....	3
I.2.1. Localisation géographique.....	3
I.2.2. Développement et économie.....	3
I.2.3. Habitats et activités.....	5
I.2.4. Relief.....	5
I.3. Démographie	6
I.4. Répartition administrative.....	6
I.5. Le climat.....	7
I.6. Caractéristiques morpho métriques et physiques du B.V et la zone d'étude..	7
I.6.1. Délimitation de la Zone étudiée du B.V de Boussaâda.....	7
I.6.2. Surface.....	8
I.6.3. Périmètre.....	8
I.6.4. Indice de compacité de Gravellius	9
I.6.5. Courbe hypsométrique et diagramme de fréquence.....	9
I.6.6. Rectangle équivalent.....	11
I.6.7. Les indice de pente.....	12
a/Indice de pente Roche.....	12
b/Indice de pente globale.....	13
I.6.8. Pente moyenne.....	13

I.6.9. Longueur du cours d'eau principal.....	14
I.7. Les caractéristiques du réseau hydrographique.....	14
I.7.1. Densité de drainage.....	14
I.7.2. Dénivelée spécifique (DS).....	15
I.7.3. Temps de concentration (TC).....	16
I.7.4. Vitesse d'écoulement de l'eau (VC).....	16
I.7.5. Réseau hydrographique.....	16
I.7.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du sous B.V de	
La zone d'étude.....	17
I.8. Conclusion.....	17

Chapitre II: Aperçu géologique et hydrogéologique

II.1. Aperçu géologique.....	18
II.1.1. Zone de Boussaâda.....	18
II.1.2. ELEMENTS de STRATIGRAPHIE.....	19
II.2. Aperçu hydrogéologique.....	21
II.2.1. Zone de Boussaâda.....	22
II.2.1.1. Les cartes structurales.....	22
II.2.1.2. Les cartes piézométriques.....	22
II.2.2. Inventaire des points d'eau.....	22
II.2.3. Etude piézométrique et Interprétation des cartes piézométriques..	24
II.3. Conclusion.....	25

Chapitre III: Etude Hydrogéochimique

III.1. Introduction.....	26
III.2. Résultats et discussion des analyses des paramètres physico-chimiques...	27
III.2.1. Paramètres physiques.....	27
III.2.2. Paramètres chimiques.....	28

III.2.2.1. Cartographie hydrochimique.....	28
III.2.2.1.1-Carte iso-teneur du Calcium (Ca^{+2}).....	28
III.2.2.1.2- Carte iso-teneur du Magnésium (Mg^{2+}).....	30
III.2.2.1.3- Carte iso-teneur en chlorure (Cl^-).....	32
III.2.2.1.4- Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^-).....	33
III.2.2.1.5- Carte iso-teneur en Sulfate (SO_4).....	34
III.2.2.1.6- Carte iso-teneur en Nítrate (NO_3^-).....	36
III.2.2.2. Faciès hydro chimique.....	38
III.2.2.2.1. Classification de Piper.....	38
III.2.2.2.2. Classification de Schoeller et Berkloff.....	39
III.2.2.3- Origine des éléments chimiques	40
III.2.2.3.1- Origine du calcium (Ca^{2+}).....	40
III.2.2.3.2- Origine du sulfate (SO_4^{2-}).....	41
III.2.2.4- Indices de saturation et équilibres chimiques.....	41
III.3. Analyses statistiques des paramètres physico-chimiques.....	43
III.3.1. L'Analyse en composantes principales (ACP).....	43
III.3.1.1. Principe de l'ACP	43
III.3.1.2. Application de L'ACP sur des données chimiques	
de la zone d'étude	43
A. Matrice de corrélation	45
B .Etude des valeurs propres, variables et des individus (Observations) ...	47
B. 1- Etude des valeurs propres.....	47
B. 2- Etude des variables.....	47
B. 3- Etude des individus.....	49
III.4. Conclusion.....	51
Conclusion générale	52

Liste des figures

Figure. I. 1. Carte de la situation géographique de la ville de Boussaâda.....	4,5
Figure. I.2. la ville de Boussaâda.....	6
Figure. I.3. B.V de Boussaâda par satellite.....	7
Figure. I.4. Carte du sous bassin versant étudié.....	8
Figure. I.5. Courbe hypsométrique du sous B.V de la zone d'étude.....	10
Figure. I.6. Courbe hypsométrique.....	11
Figure. II.1. Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie.....	18
Figure. II.2. extrait de la carte géologique du Boussaâda.....	19
Figure. II.3. Coupe géologique de la zone de Boussaâda.....	21
Figure. II.4. Carte de position des forages étudiés.....	23
Figure. II.5. La Carte piézométrique du B.V de sous B.V de la zone d'étude (Mai 2016).....	24
Figure. II.6. La Carte piézométrique du B.V de sous B.V de la zone d'étude (Juillet 2017).....	25
Figure. III.1. Répartition de la T (°C) des eaux souterraines pour les campagnes (Mai 2016 et Juillet 2017).....	28
Figure. III.2. Répartition du pH des eaux souterraines pour les campagnes (Mai 2016 et Juillet 2017).....	28
Figure. III.3. Répartition de la CE des eaux souterraines pour les campagnes (Mai 2016 et Juillet 2017).....	28
Figure. III.4. Répartition de la Salinité des eaux souterraines pour les campagnes (Mai 2016 et Juillet 2017).....	28
Figure. III.5. Carte iso-teneur en calcium en mg/l (Mai 2016).....	29
Figure. III.6. Carte iso-teneur en calcium en mg/l (Juillet 2017).....	30
Figure. III.7. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2}) en mg/l (Mai 2016).....	31

Figure. III.8. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2}) en mg/l (Juillet2017).....	31
Figure. III.9. Carte iso-teneur en chlorure (Cl^{-}) en mg/l (Mai 2016).....	32
Figure. III.10. Carte iso-teneur en chlorure (Cl^{-}) en mg/l (Juillet2017).....	33
Figure. III.11. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^{-}) en mg/l (Mai 2016).....	34
Figure. III.12. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^{-}) en mg/l (Juillet2017).....	34
Figure. III.13. Carte iso-teneur en sulfate (SO_4) en mg/l (Mai 2016).....	35
Figure. III.14. Carte iso-teneur en sulfate (SO_4) en mg/l (Juillet2017).....	36
Figure. III.15. Carte iso-teneur en Nitrate (NO_3^{-}) en mg/l (Mai 2016).....	37
Figure. III.16. Carte iso-teneur en Nitrate (NO_3^{-}) en mg/l (Juillet2017).....	37
Figure. III.17. Diagramme de Piper Compagne de (Mai 2016).....	38
Figure. III.18. Diagramme de Piper Compagne de (Juillet2017).....	38
Figure. III.19. Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF (Mai 2016).....	39
Figure. III.20. Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF (Juillet2017).....	40
Figure. III.21. L'évolution du Ca^{2+} en fonction de HCO_3^{-} selon la droite de pente (1 / 1) pour les compagnes (Mai 2016 et Juillet2017).....	41
Figure. III.22. L'évolution du Ca^{2+} en fonction de SO_4^{2-} selon la droite de pente (1 / 1) pour les compagnes (Mai 2016 et Juillet2017).....	41
Figure. III.23. Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques pour les compagnes (Mai 2016 et Juillet2017).....	42
Figure. III.24. Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2).....	48
Figure. III.25. Répartition des Individus.....	49

Liste des tableaux

Tableau. I.1: Evaluation de la population du Boussaâda.....	6
Tableau. I.2: Données climatiques à Boussaâda.....	7
Tableau. I.3: Calcul des surfaces partielles et cumulées.....	10
Tableau. I.4: Classification des Reliefs.....	15
Tableau. I.5: Principales caractéristiques morpho métriques du sous B.V de la zone d'étude.	17
Tableau. II.1: Inventaire et Caractéristiques piézométriques des points d'eau.....	23
Tableau III. 1. Intervalle, moyenne, écart-type, des paramètres de qualité de l'eau pour les compagnes (Mai 2016 et Juillet2017).....	27
Tableau III. 2. Statistique du calcium dans les eaux souterraines de la zone d'étude.....	29
Tableau III. 3. Statistiques de Magnésium dans les eaux souterraines de la zone d'étude.....	30
Tableau III. 4. Statistique de Chlorure dans les eaux souterraines de la zone d'étude.....	32
Tableau III. 5. Statistique de sulfaté dans les eaux souterraine de la zone d'étude.....	35
Tableau III.6.Statistique de Nitrate dans les eaux souterraines de la zone d'étude.....	36
Tableau III. 7. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico -chimiques avec les normes Algériennes (Mai 2016).....	44
Tableau III. 8. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico -chimiques avec les normes Algériennes (Juillet 2017).....	44
Tableau III. 9. Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson	45
Tableau III. 10. Matrice de corrélation des paramètres chimique (Mai 2016).....	46
Tableau III. 11. Matrice de corrélation des paramètres chimique (Juillet 2017)	46
Tableau III. 12. Les couples des paramètres physico-chimiques corrélés.....	46
Tableau III. 13. Valeurs propres et pourcentage de la variance exprimée.....	47
Tableau III. 14. Corrélacion entre les variables et les facteurs.....	48

Introduction Générale

Introduction générale

La qualité des eaux souterraines est un paramètre déterminant pour qu'une nappe d'eau puisse être exploitée à des fins d'alimentation en eau potable. Les caractéristiques chimiques naturelles des eaux souterraines dépendent de la nature lithologique des aquifères et des terrains superficiels traversés par l'eau. [1]

L'eau des précipitations ou de la neige s'infiltré dans les systèmes aquifères pour atteindre les eaux souterraines. Par la suite, elle peut éventuellement remonter à la surface, ou rejoindre des lacs ou des océans. Les eaux souterraines sont connues pour être de bonne qualité, mais ces dernières années même les eaux souterraines ne sont pas protégées de la Pollution à cause des dangers qui menacent notre environnement par l'être humain représentés par ses activités agricoles, rejets liquides et solides, minières et industrielles.

L'accumulation des éléments polluants dans les formations superficielles (sols et sédiments) en teneurs excessives, représente un risque, d'une part, pour les systèmes sol (altération de la qualité des cultures), et d'autre part, pour le système eau (par mobilité et par migration vers les nappes phréatiques).

Les conditions lithologiques, hydrodynamiques et hydro chimiques sont variées, notamment la morphologie de la région de Boussaâda qui présente une cuvette où il y a lieu d'importants dépôts granulaires d'âge Quaternaire et sédimentaires. Par ailleurs, diverses études entreprises depuis une trentaine d'années, ont montré que les eaux de cette région sont caractérisées par une minéralisation totale excessive, le plus souvent associées à une dureté et salinité élevées.

L'objectif du présent travail est d'étudier la qualité des eaux souterraines de la zone Nord de Boussaâda (plaines El-Maadher et Maiter), la caractérisation de leurs paramètres physicochimiques et leur variation spatio-temporelle influencée hydrogéochimiquement par le temps de contact eau-roche.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres.

Le premier chapitre porte sur la présentation du site d'étude, son climat et les caractéristiques morphologiques du B.V de Boussaâda.

Le deuxième chapitre présente un aperçu sur la géologie et l'hydrogéologie traitant le comportement hydrodynamique de la nappe et sa variation spatio-temporelle.

Le troisième chapitre expose les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les Eaux souterraines. La détermination des faciès chimiques et l'origine évolutive des Éléments chimiques des eaux analysées. La saturation en éléments carbonatés et évaporitiques et l'équilibre chimique des eaux souterraines et l'application de la technique d'analyse statistique ACP à l'ensemble des données des eaux souterraines pour mettre point sur la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.

En fin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale récapitulant les principaux résultats.

**Chapitre I: Présentation Géographique
Et les Conditions Naturelles**

Chapitre I : Présentation Géographique et les 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. Aperçu 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'allongent le pôle urbain (la ZHUN), qui contient certains équipements structurants.

Chapitre I: Présentation Géographique et les Conditions Naturelles

- 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 sableuse sur les rives d'oued Maiter, situé sur le côté Ouest et côté Nord-est de la ville.

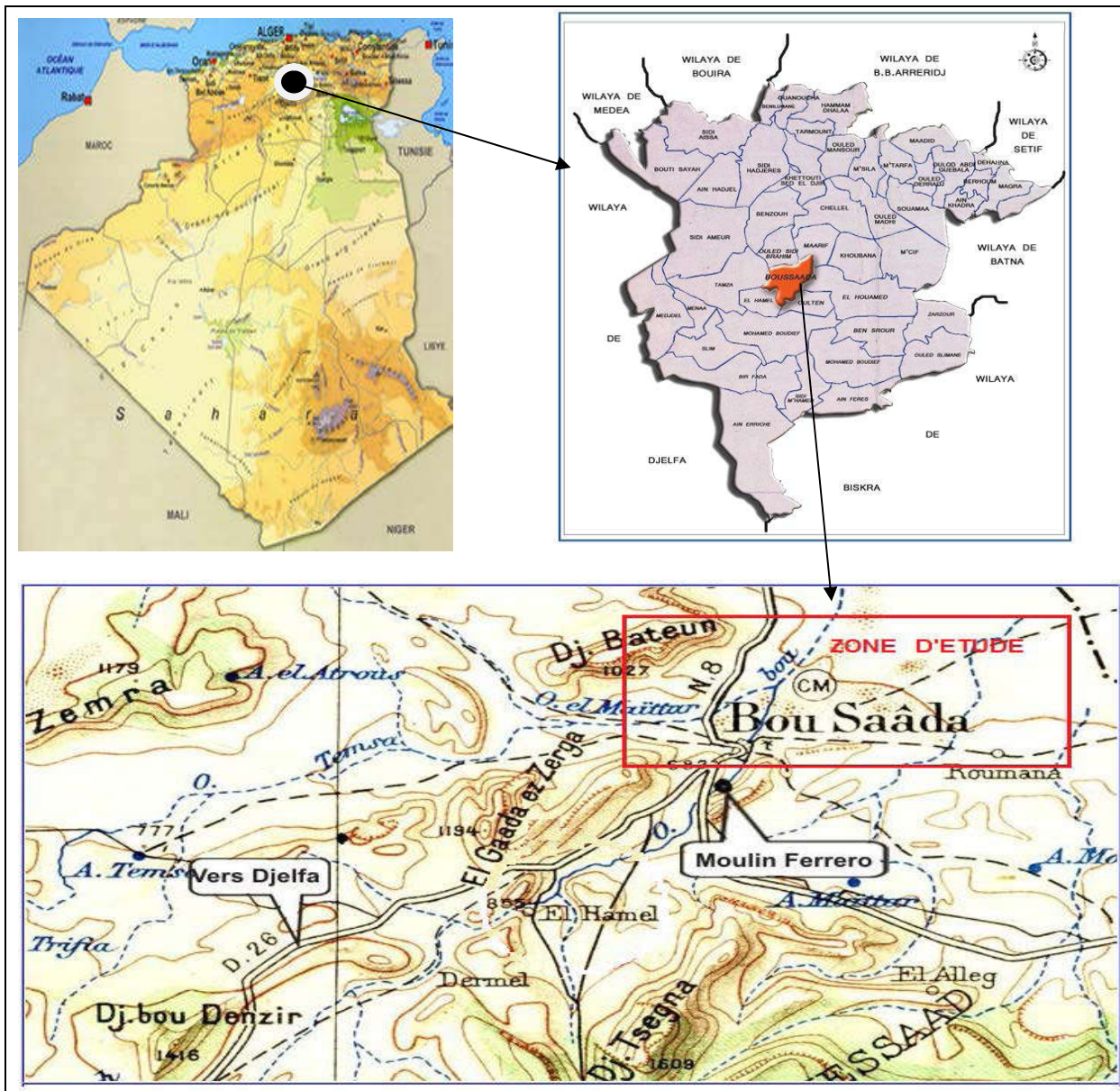


Fig. I.1.Carte de la situation géographique de la ville de Boussaâda. [2]

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 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.

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). [02]
- 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 jettant 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.

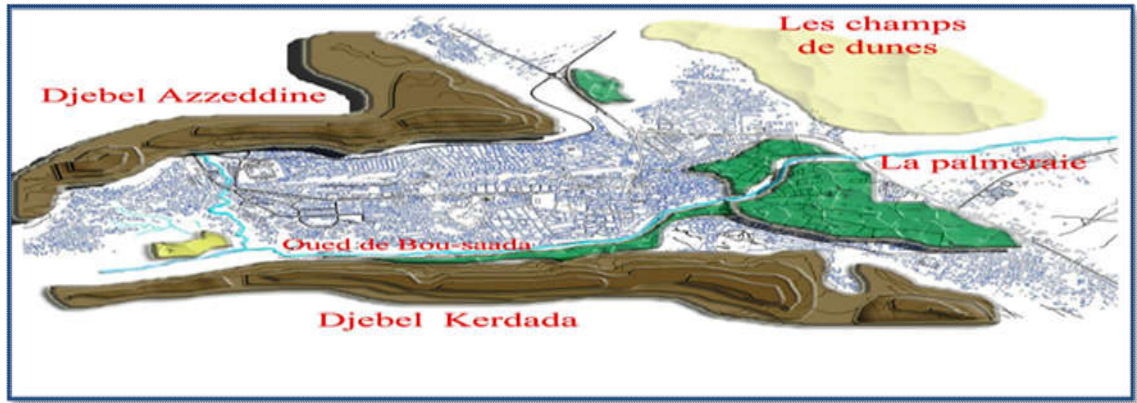


Fig.1.2.la ville de Boussaâda.

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 (Tableau. I. 1):

Tableau. I. 1: Evaluation de la population du Boussaâda. [03]

Évolution démographique				
1987	1998	2008	2015	2018
66 688	104 029	125 573	152 306	184 694

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. [02]

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. [04]

Tableau. I.2.Données climatiques à Boussaâda. [04]

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



Fig. I.3.B.V de Boussaâda par satellite [05]

I.6.2.Surface

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. Sa surface (A) exprimée en km², 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 a été mesurée grâce au logiciel mapInfo Elle est de l'ordre **132,48 km²**

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 "Map-info" est de **50,7 km**.

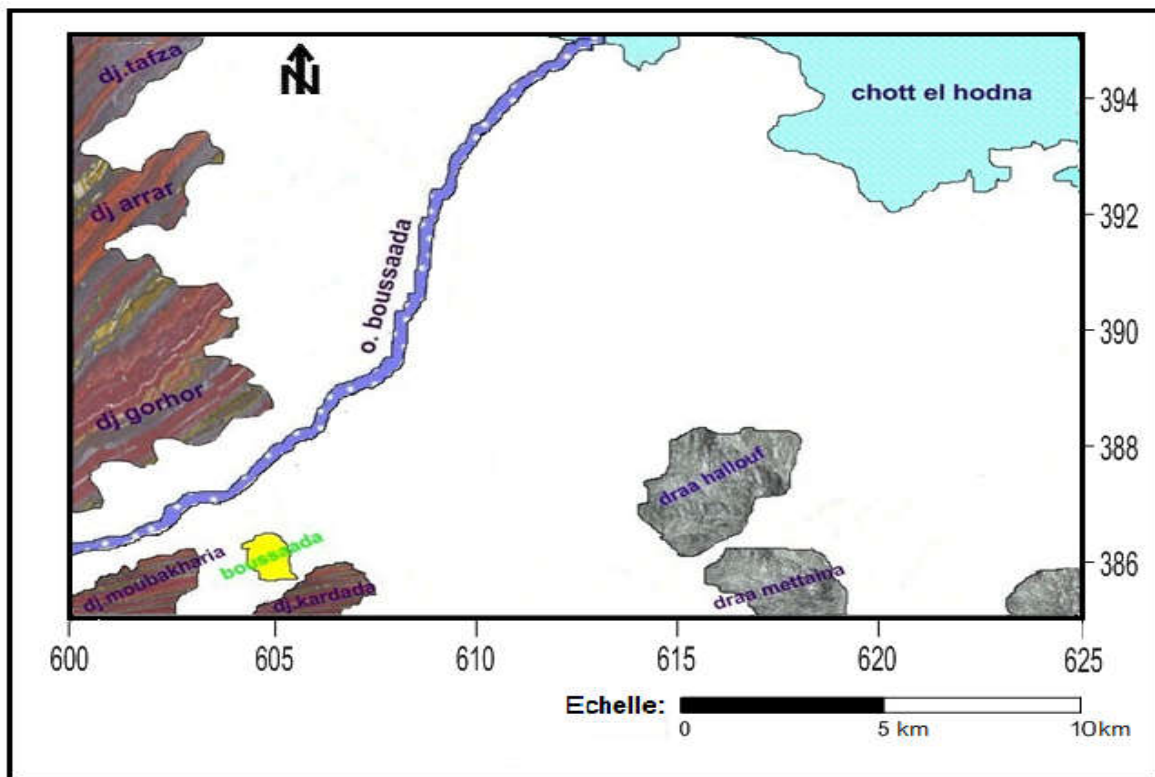


Fig. I.4. Carte du sous bassin versant étudié

I.6.4.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) :

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

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 1,23 * Lorsque K_G est proche de 1 le bassin versant est de forme quasiment circulaire * Lorsque le K_G 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 obtenu, le bassin versant du Boussaâda est de forme allongée [06]

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

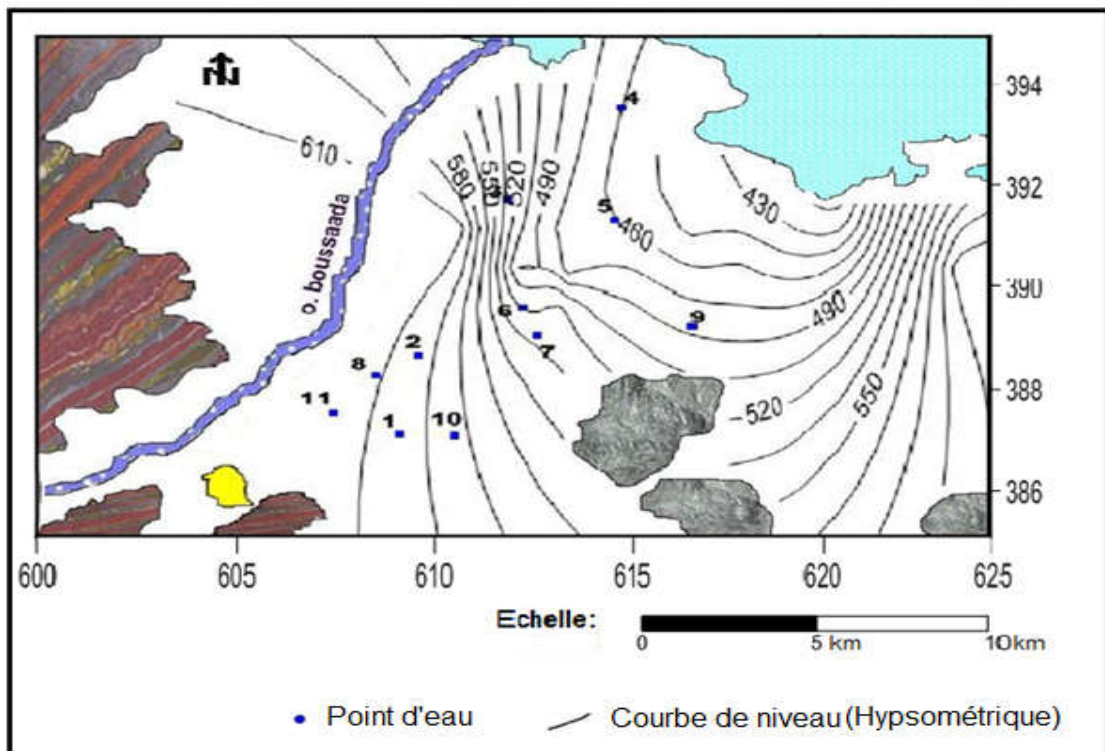


Fig. I.5.Courbe de niveau du Sous B.V de la zone d'étude

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 %**.

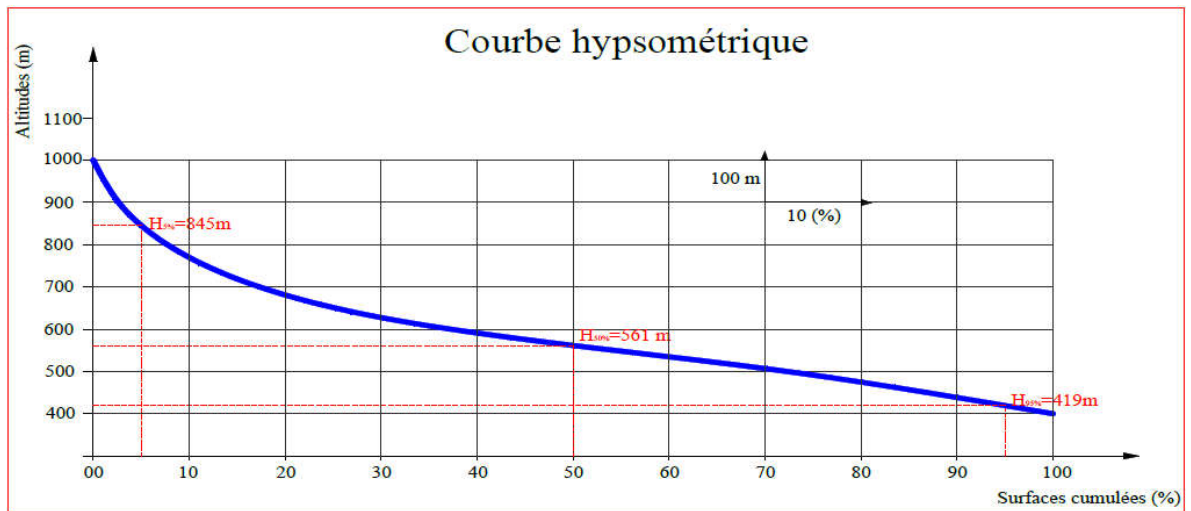


Fig. I.6. Courbe hypsométrique

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, H₉₅= 419 m
- * l'altitude à 5% de la surface, H₅= 845 m
- * l'altitude médiane, H₅₀ = 561 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

Chapitre I: Présentation Géographique et les Conditions Naturelles

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 ;

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 [07]**

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 entre 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)

S_i : 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).

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

Donc l'indice de pente globale du sous bassin versant est de : $I_g = \mathbf{0.023}$; d'après I_g obtenu le sous bassin versant est de relief modéré [08].

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. [09]

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. [09]

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 $A = 132,48 \text{ km}^2$

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

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant dans une certaine mesure, des conditions climatologiques 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 [06.10]

I.7.2. Dénivelée spécifique (D_s)

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 (D_s).

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

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 04). [02]

Tableau. I.4.classification des Reliefs

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

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 : **Tc= 3.43 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 : **Vc = 1.73m/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. [02]

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

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 imperméable 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. [02]

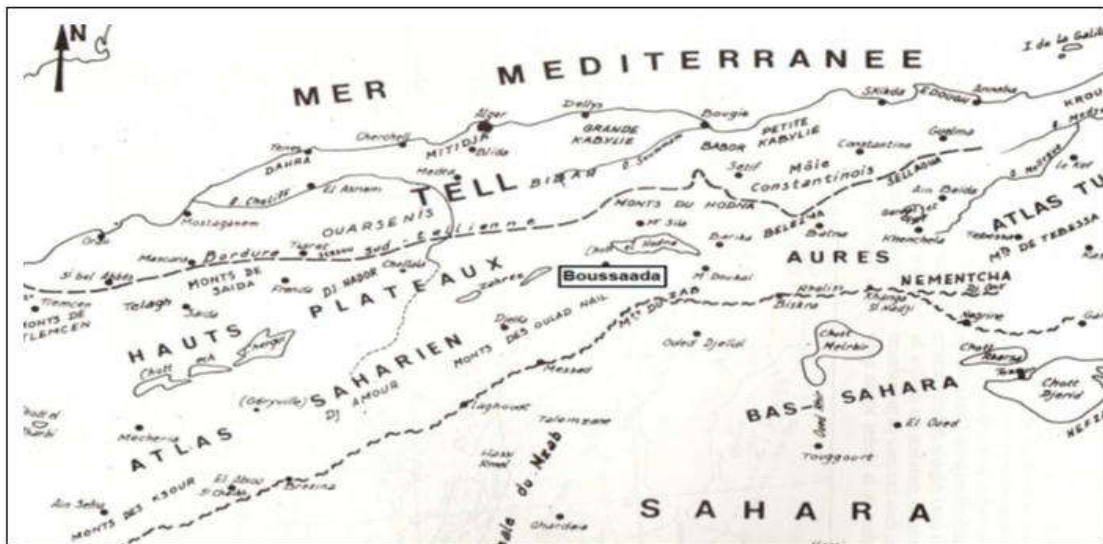


Fig.II.1: Localisation de Boussaâda dans l'ensemble géomorphologique du Nord de l'Algérie. [11]

II.1.1-Zone de Boussaâda

C'est la rive sud du Chott, caractérisée par l'absence de Miocène marin et une épaisseur de Tertiaire moins importante qu'au Nord du Chott :

a) à l'Est et au Sud par les pointements jurassiques des Fennd et le massif du Meharga,
 b) au Sud-ouest l'anticlinal du Dj Kerdala,
 c) à l'Ouest les Djebels de Zemra et Selat. 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. Une grande faille E-O sépare les deux zones. [05]

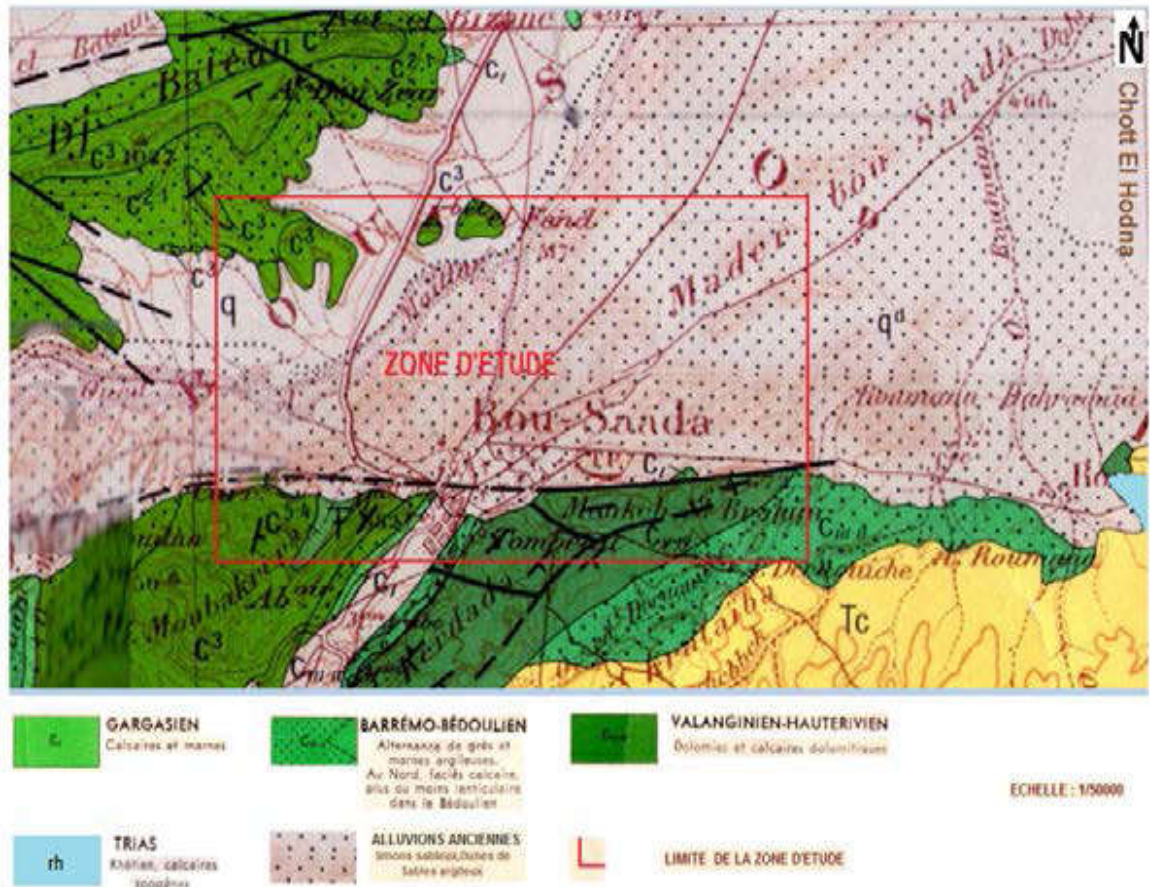


Fig. II.2: extrait de la carte géologique du Boussaâda [05]

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 grès.

- **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.

II.2.1-Zone de Boussaâda

Les principaux aquifères de ce secteur sont les formations conglomératiques et sableuses du Miopliocène continental, qui communiquent avec et 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 l'Ain Koucha et l'Ain Diss. [05]

II.2.1.1-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'absence d'une étude géophysique de la région, l'évaluation des épaisseurs et des surfaces limites des aquifères seront 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. [12]

II.2.1.2- Les cartes piézométriques

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. [13]

II.2.2-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 mois de Mai 2016 comparé à une autre en mois de Juillet 2017, pour 11 points d'eau (tableau II.1 et fig. II.4). [2]

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

N	Point d'eau	X(m)	Y(m)	Z(m)	NP (2016)	NP (2017)
01	Maadher1	613.72	390.02	520	64.32	50.44
02	Maadher village	613.89	390.41	464	62.33	49
03	Maarif	617.14	391.17	441	46.1	36
04	Banion-Sud ouest	621.08	391.66	400	69.48	49.3
05	Banion	621.18	391.10	437	43.6	34
06	Maadher 236	618.11	390.66	456	52.08	43.1
07	Maadher-BIS	618.48	390.52	459	15.39	12
08	Maadher232	612.60	390.31	488	17.07	14.82
09	Maiter 3	624.136	390.540	620	19.6	18
10	Maadher 235	615.56	390.01	485	58	50
11	Maiter 235 bis	611.133	390.970	620	44	38

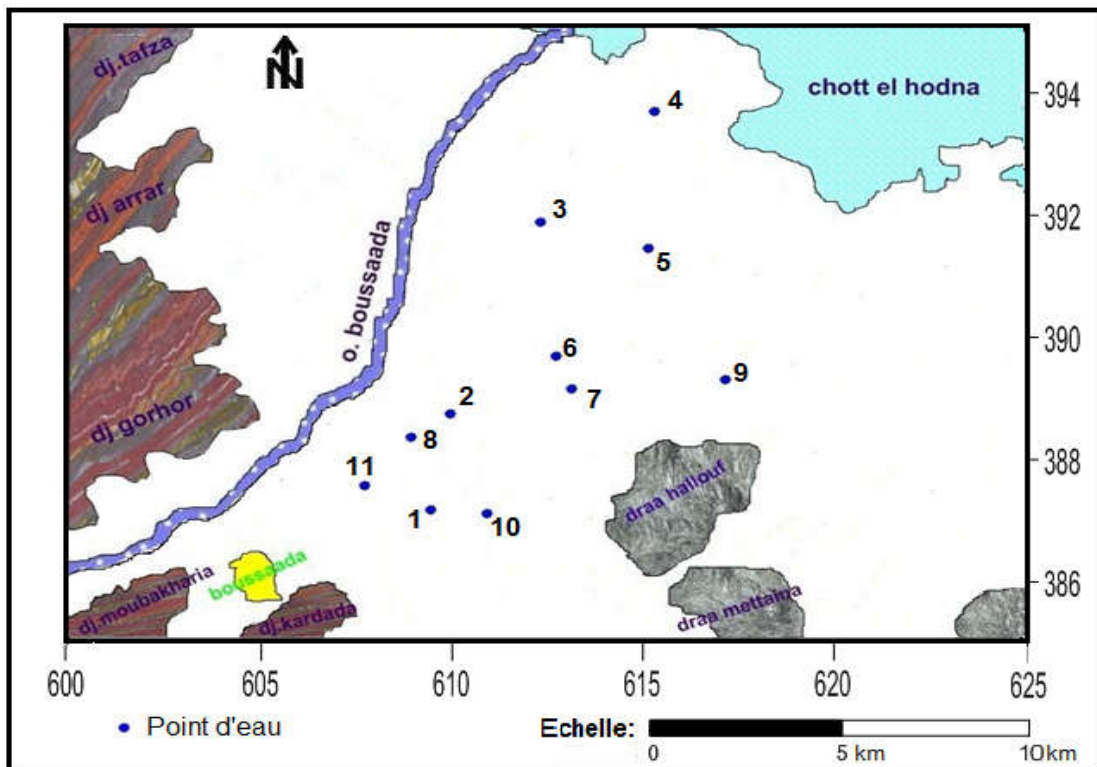


Fig. II. 4 : Carte de position des forages étudiés

II.2.3-Etude et Interprétation des cartes piézométriques

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. [02]

L'examen des deux cartes piézométriques (Fig. II.5, II.6) permet de dire que la nappe a gardé la même structure et l'écoulement est orienté suivant trois directions vers la dépression (Chott-El-Hodna) et a partir de trois parties, durant les deux périodes de mesure :

- 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 – NE).

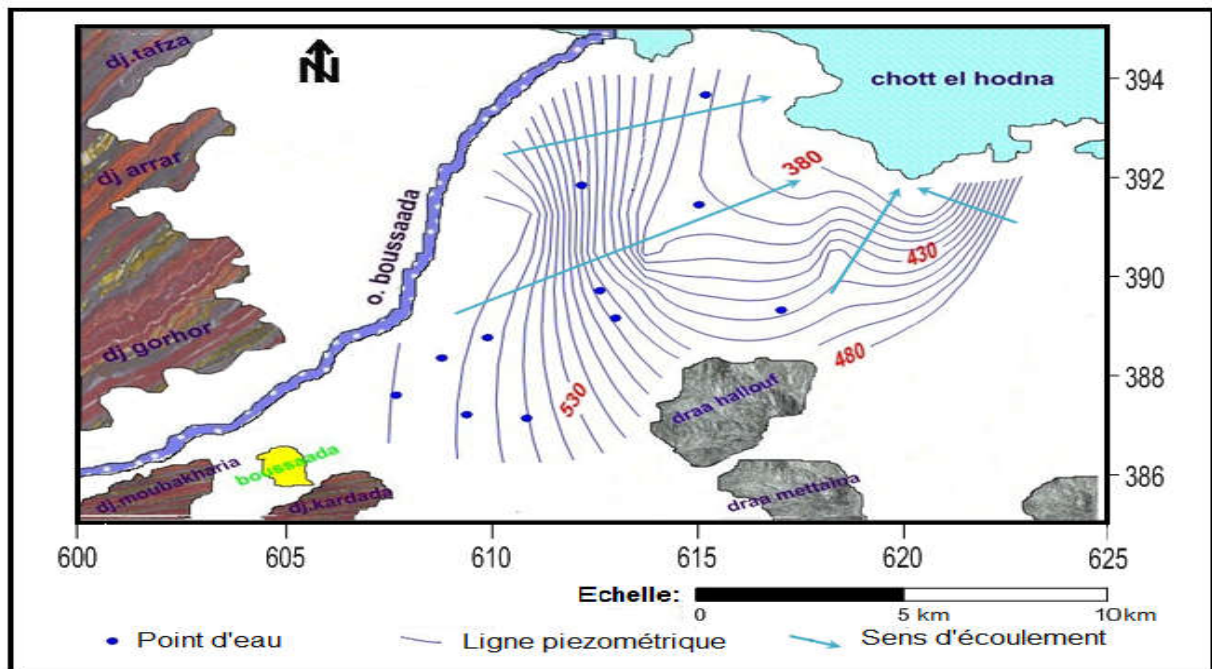


Fig. II.5 : La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudiée (Mai 2016)

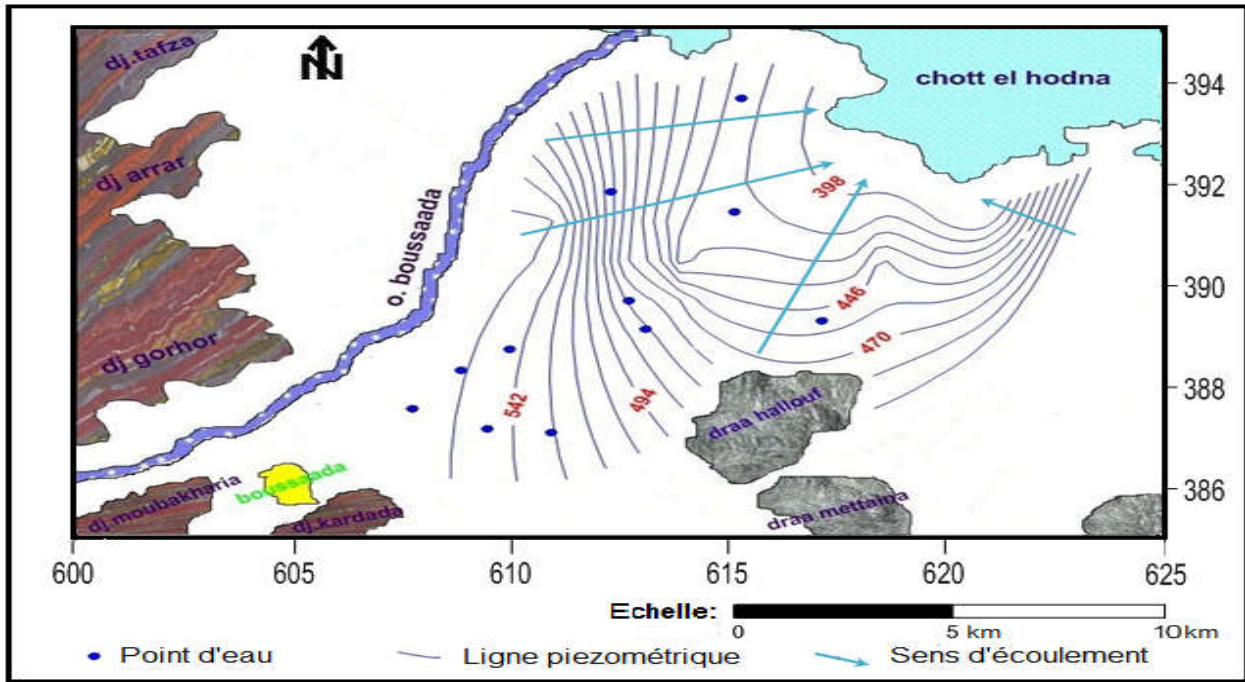


Fig. II.6 : la Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudiée (juillet 2017).

II.3-Conclusion

La détermination des différents endroits favorables 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 ou affleurent des 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. [02]

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-NE.
- ✓ 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 Hydrogéochimique

III. Etude Hydrogéochimique

III.1. Introduction

La composition des eaux souterraines évolue géochimiquement par le biais de phénomènes d'ordre hydrodynamique, qui contrôlent la circulation des eaux souterraines dans divers environnements. Plusieurs phénomènes hydrochimiques interviennent, notamment d'ordre minéralogique : dissolution des minéraux et libération d'éléments chimiques dans les eaux, précipitation de minéraux secondaires et remobilisation d'éléments à partir de la solution. [14]

Afin de suivre la variation hydrogéochimique le long du chemin d'écoulement souterrain et de déterminer le chimisme et la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda, nous a avons procédé a une approche portant sur :

- ✓ Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et leur variation spatio-temporelle ainsi que la détermination des faciès chimiques des eaux.
- ✓ Etude des principaux processus chimiques dans l'aquifère et l'évolution spatio-temporelle de la composition de l'eau on comparant les campagnes des mesures et des analyses physico-chimiques (Mai 2016 et juillet 2017) par les méthodes de cartographie et l'analyses statistiques, telles que l'analyse en composante principale (ACP).

Cette approche d'analyse et d'interprétation a été effectuée sur des analyses chimiques de 11 échantillons prélevés des forages de la région pendant deux périodes (Mai 2016 et juillet 2017). Les analyses ont été effectuées au laboratoire de la société Algérienne Des Eaux (ADE) de la wilaya de M'sila.

III.2. Résultats et discussion des analyses des paramètres physico-chimiques (Mai 2016 - juillet 2017)

Dix paramètres physico-chimiques ont été déterminés au cours de cette étude (Tableau III.1).

Tableau III.1. Intervalle, moyenne, écart-type, des paramètres de qualité de l'eau en 2016-2017.

	T	PH	CE	Sal	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
Période Mai 2016										
Min	10.3	6.33	680	0.26	92	34	244	77	354	12
Moy	16.36	6.77	1751.45	1.03	183.64	78.09	300.18	131.91	656.36	58.36
max	21.6	7.43	2240	1.3	272	136	381	262	760	96
ET	3.22	0.36	464.75	0.30	60.49	31.11	40.35	54.97	140.96	32.56
CV(%)	19.68	5.25	26.54	29.35	32.94	39.84	13.44	41.67	21.48	55.78
	T	PH	CE	Sal	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
Période Juillet 2017										
Min	8.4	6.64	736	0.3	80	28	219	29	400	15
Moy	15.59	6.87	1425.64	0.89	168.64	79.91	316.73	123.51	549.09	59.73
max	27.9	7.09	1876	1.2	256	133	366	177	700	94
ET	6.56	0.16	361.40	0.28	49.49	28.09	51.49	56.58	96.90	28.49
CV(%)	42.08	2.36	25.35	31.13	29.35	35.16	16.26	45.81	17.65	47.70

Toutes les valeurs sont en mg/l sauf : pH, T (° C), Sal (%) et CE (µS/cm).

III.2.1. Paramètres physiques

Les tendances des paramètres physiques sont présentées dans les Fig. III.I, 2, 3 et 4. Pendant les périodes étudiées, le changement de température de l'eau est largement influencé par le climat général de la région avec un maximum de 21.6 °C enregistré en période de Mai 2016 et 27.9 °C en période de Juillet 2017 dépassant légèrement la norme de potabilité fixée par la norme algérienne et celle de l'Organisation mondiale de la santé (O.M.S) de 25°C. La valeur du pH des échantillons d'eau variait de 6,33 à 7.43 pour les deux périodes, se trouvant dans la norme de potabilité algérienne (6,5-8,5) et celle de l'O.M.S (6,5-9,5). Dans la plage de pH de 6,5 à 7,5, signifiant la dominance de la calcite et la dolomite. [15]

La conductivité électrique est marquée par des valeurs élevées en se rapprochant du Chott El-Hodna avec une valeur maximale de 2240 µS/cm enregistrée pendant la période de Mai 2016, la CE augmente dans le sens d'écoulement, possiblement dû à la lessivage des terrains salés et l'écoulement inverse en période des hautes eaux. L'examen de la répartition de la salinité (%) Fig. III.4, confirme les valeurs et la variation de la conductivité électrique CE.

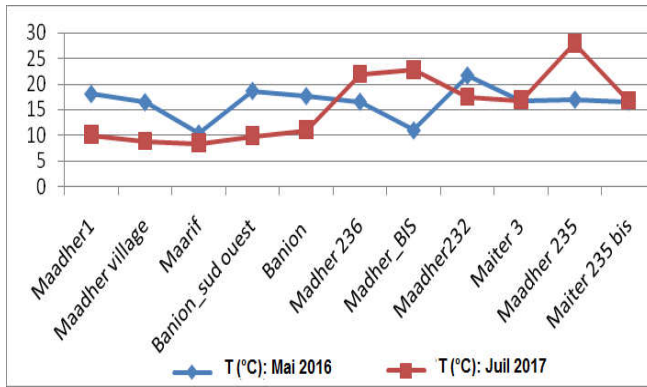


Fig. III.1. Répartition de la T (°C) des eaux souterraines -compagnes (Mai 2016 et Juil 2017)

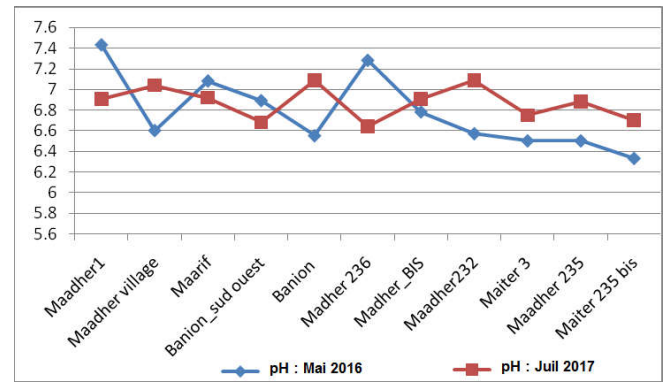


Fig. III.2. Répartition de pH des eaux souterraines compagnes (Mai 2016 et Juil 2017)

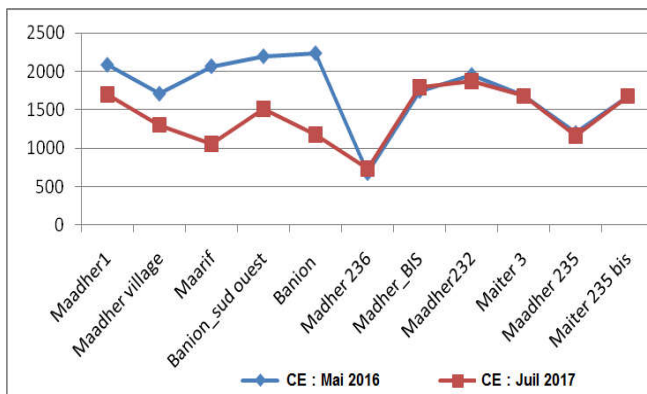


Fig. III.3. Répartition de la CE des eaux souterraines -compagnes (Mai 2016 et Juil 2017)

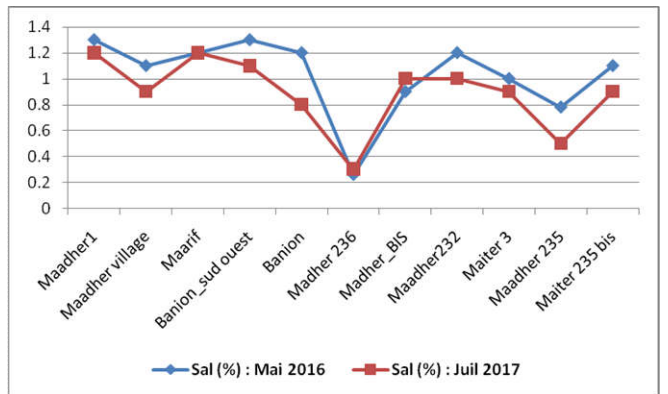


Fig. III.4. Répartition de la salinité des eaux souterraines compagnes (Mai 2016 et Juil 2017)

III.2.2. Paramètres chimiques

III.2.2.1. Cartographie hydrochimique

III.2.2.1.1. Carte iso-teneur du Calcium (Ca^{+2}):

Le calcium est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates, fréquent dans les roches sédimentaires sous forme aussi de carbonates ; calcite, dolomite et aragonite. [16]

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

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

✓ L'examen du tableau. III.2 et les fig. III.5, III.6 montrent que les eaux de 45% des points d'eau ont des teneurs en calcium dépassant la norme durant la campagne de Mai 2016, avec une valeur maximale de 272 mg/l et 18% pendant la campagne de Juil 2017, avec une valeur maximale 256mg/l. La répartition spatio-temporelle des teneurs en Ca montre l'augmentation des concentrations dans le sens d'écoulement dû à la dilution et la dissolution des roches carbonatés des Monts de Moubakharia, Kardada, Gorhor et Arrar durant la période de Mai 2016.

Tableau III.2.Statistique du calcium dans les eaux souterraines de Zone d'étude

Périodes \ Valeurs	% des points d'eau > à la Norme	Points d'eau	Valeurs normatives de (Ca ⁺²)	
			OMS 2006	Algériennes 2000
Mai 2016	45%	1, 3, 4, 5, 7	75-200 (mg/l)	75-200 (mg/l)
Juil 2017	18%	1, 5		

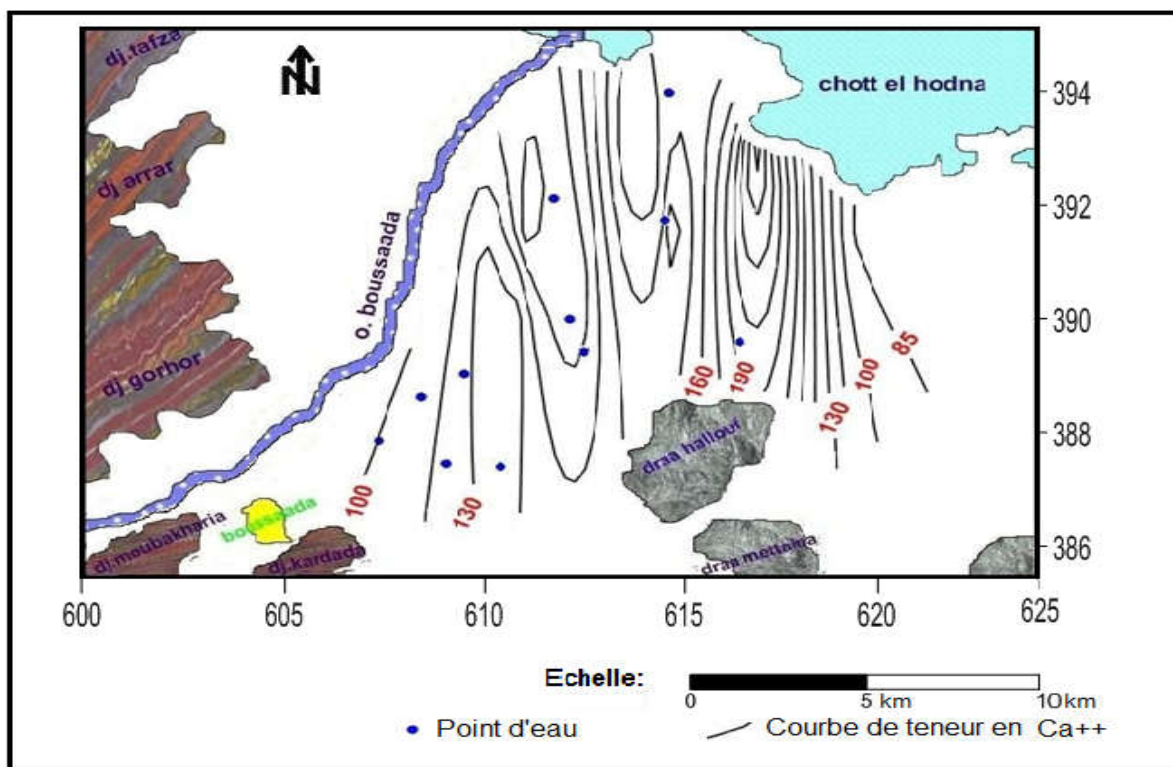


Fig. III.5.Carte iso-teneur en Calcium en mg/l – Mai 2016

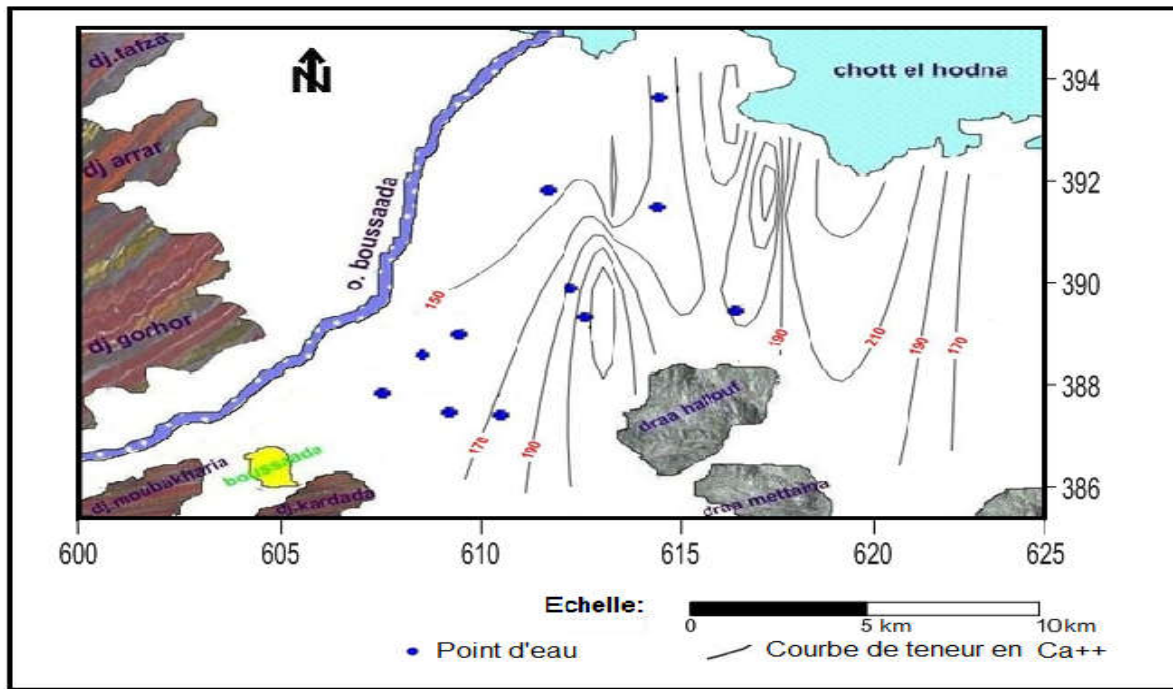


Fig. III.6. Carte iso-teneur en Calcium en mg/l - Juil 2017

III.2.2.1.2- Carte iso-teneur du Magnésium (Mg^{2+}):

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.

✓ Le tableau.III.3 montre que les valeurs des teneurs en magnésium sont dans la norme pour les deux Compagnes (Mai 2016 et Juil 2017). La répartition et l'évolution spatio-temporelle fig.III.7, III.8 montrent que les valeurs des concentrations élevées sont enregistrées au centre de la zone d'étude avec 136 mg/l au niveau du point d'eau 3 (Maarif) durant la période de Mai 2016 et 133 mg/l au niveau du point d'eau 8 (Madher 232) durant la période de Juillet 2017. Cela dû peut être à la solubilité des roches Silicatées et d'origine calcaire (Dj Kardada).

Tableau III. 3. Statistiques de Magnésium dans les eaux souterraines de la Zone d'étude

Périodes	Valeurs	% des points d'eau > à la Norme	Points d'eau	Valeurs normatives de (Mg^{+2})	
				OMS 2006	Algériennes 2000
Mai 2016		0 %	/	150 (mg/l)	150 (mg/l)
Juil 2017		0 %	/		

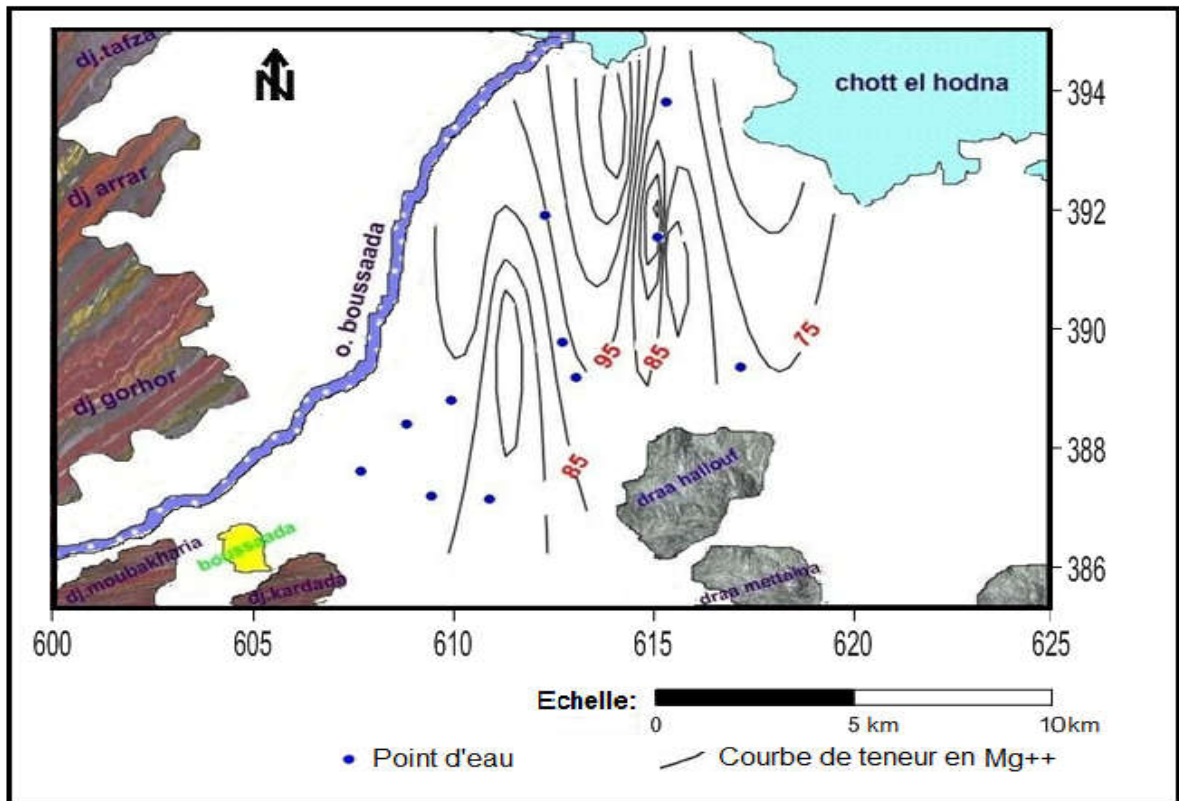


Fig. III.7. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+}) en mg/l - Mai 2016

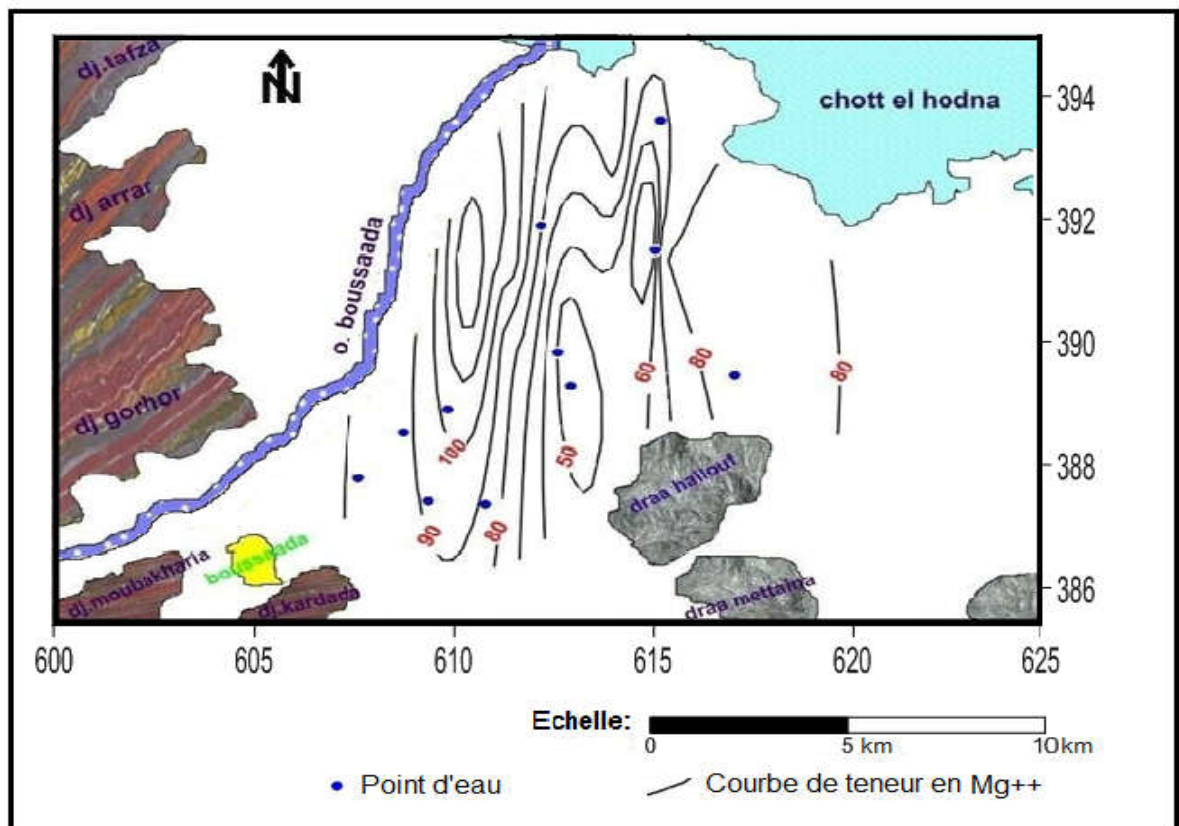


Fig. III.8. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2}) en mg/l - Jul 2017

III.2.2.1.3- 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.

✓ Le tableau III.4 et Fig. III.9, III.10 montrent que les teneurs des Chlorures varient entre 29 à 262 mg/l en deux périodes, dépassent les normes au point d’eau n° 5 (Banion), durant la période de Mai 2016 avec une concentration de 262 mg/l, dû au lessivage des terrains salifères.

Tableau III. 4. Statistique de Chlorure dans les eaux souterraine de la Zone d’étude

Périodes \ Valeurs	% des points d’eau > à la Norme	Points d’eau	Valeurs normatives de (Cl)	
			OMS 2006	Algériennes 2000
Mai 2016	9.09 %	5	250 (mg/l)	200 (mg/l)
Juil 2017	0 %	/		

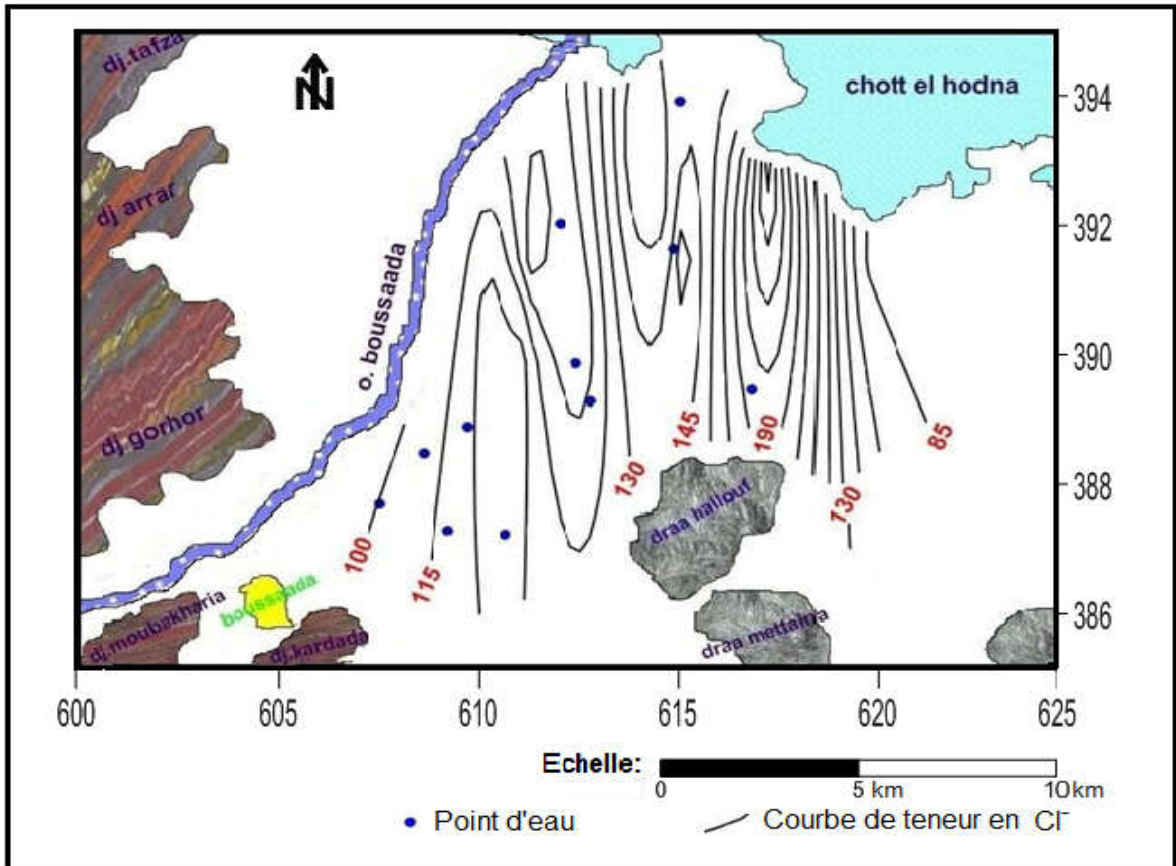


Fig. III.9. Carte iso-teneur en chlorure (Cl) en mg/l - Mai 2016

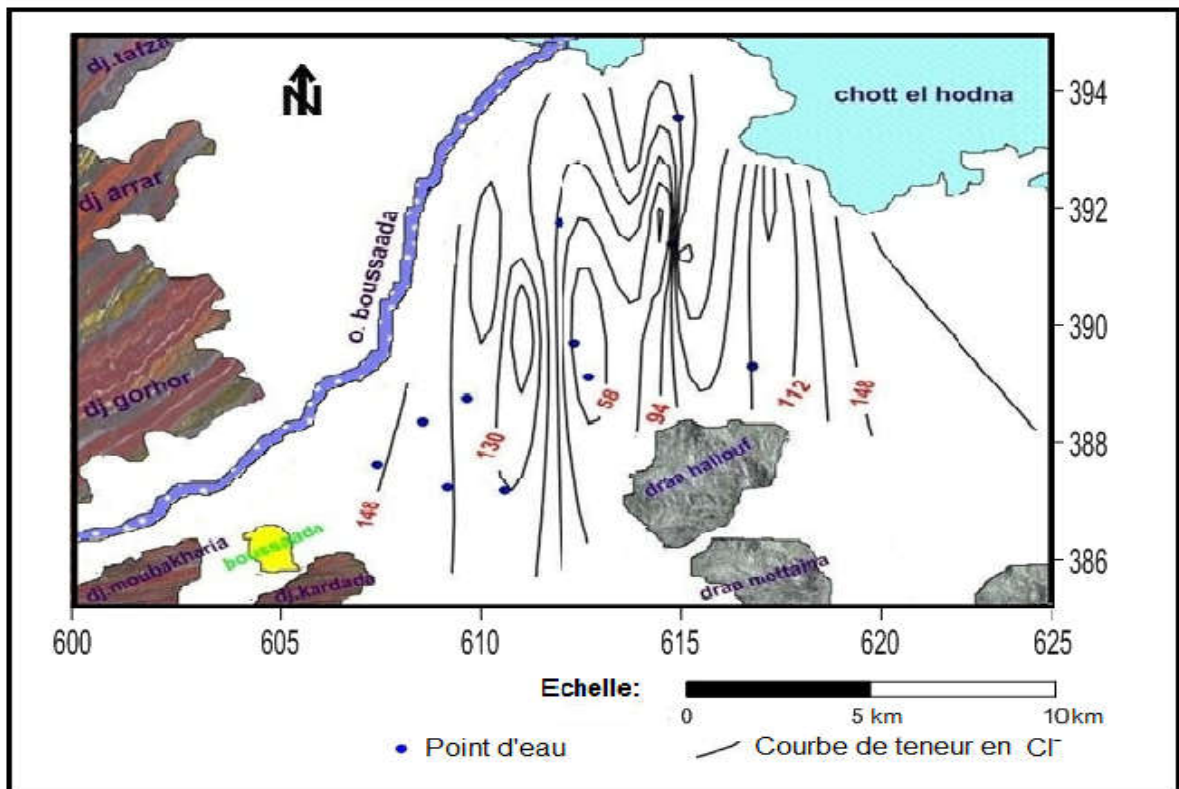


Fig. III.10. Carte iso-teneur en chlorure (Cl) en mg/l - Juil 2017

III.2.2.1.4- Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^-)

Les bicarbonates proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2). La répartition des teneurs des bicarbonates, fig.III.11et III.12 montrent que les valeurs des concentrations varient de 219 à 281 mg/l pour les deux Compagnes.

- ✓ Les concentrations élevées sont enregistrées au centre de la zone d'études et dans le sens d'écoulement. Cela renseigne sur la dissolution des formations carbonatées, représentées par l'Aptien calcaire.

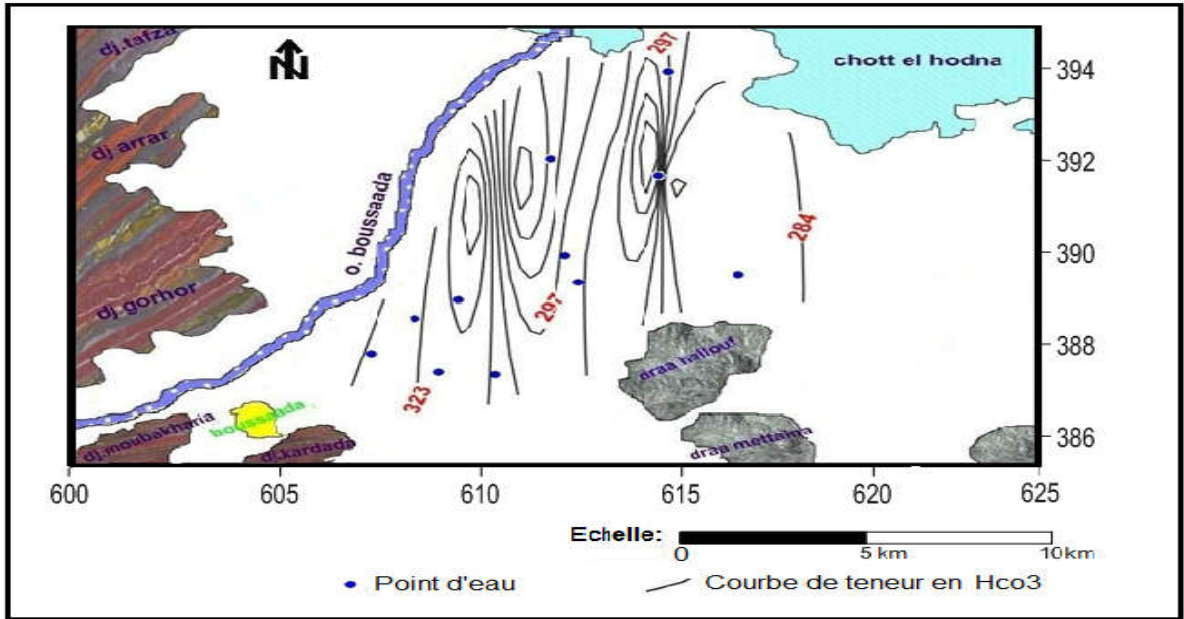


Fig. III.11. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3) en mg/l - Mai 2016

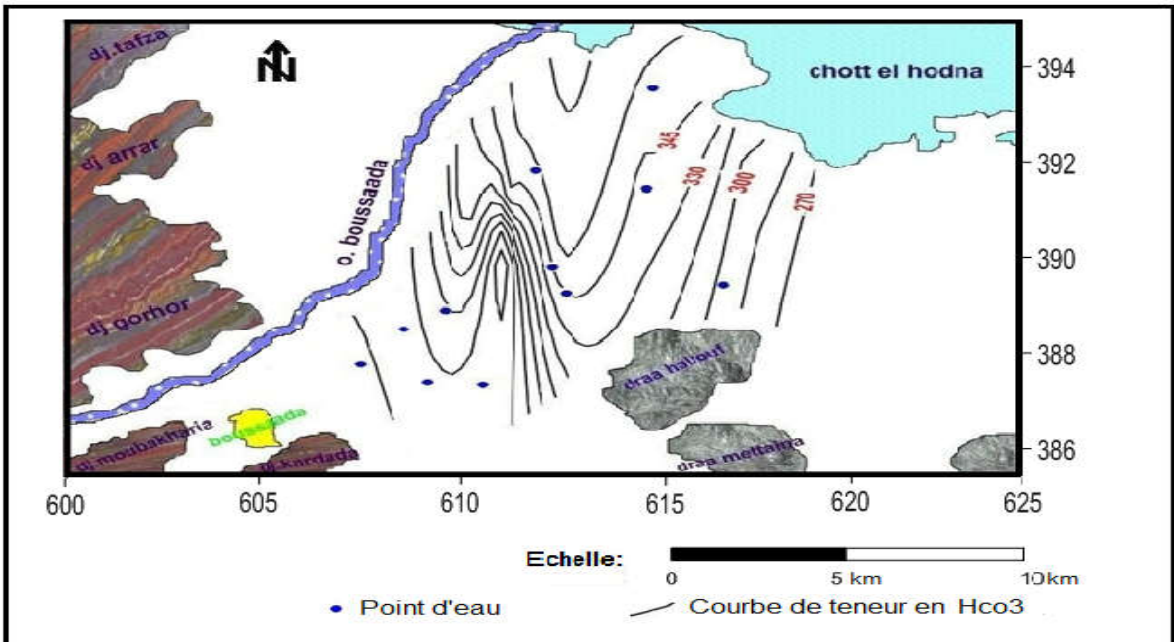


Fig. III. 12. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3) en mg/l – Juil 2017

III.2.2.1.5- Carte iso-teneur en Sulfate (SO_4)

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. [17]

✓ L'examen du tableau. III.5 et les fig. III.13, III.14 montrent que les eaux de tous les points d'eau ont des teneurs en calcium dépassant la norme durant les deux campagnes, avec une valeur maximale de 760 mg/l. Ces fortes 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.

Tableau III. 5. Statistique de Sulfates dans les eaux souterraine de la Zone d'étude

Périodes	Valeurs	% des points d'eau > à la Norme	Points d'eau	Valeurs normatives de (SO_4^{-2})	
				OMS 2006	Algériennes 2000
Mai 2016		100%	Tous	250 (mg/l)	200 (mg/l)
Juil 2017		100%	Tous		

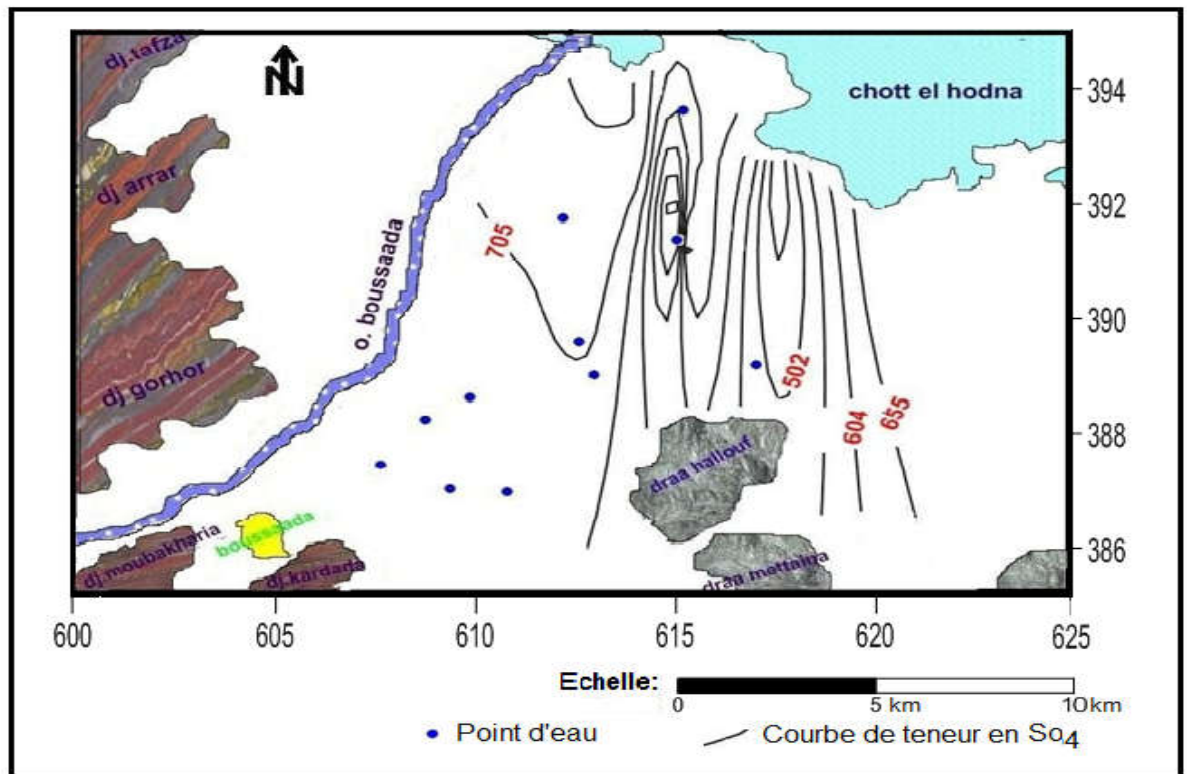


Fig. III.13. Carte iso-teneur en sulfate (SO_4) en mg/l - Mai 2016

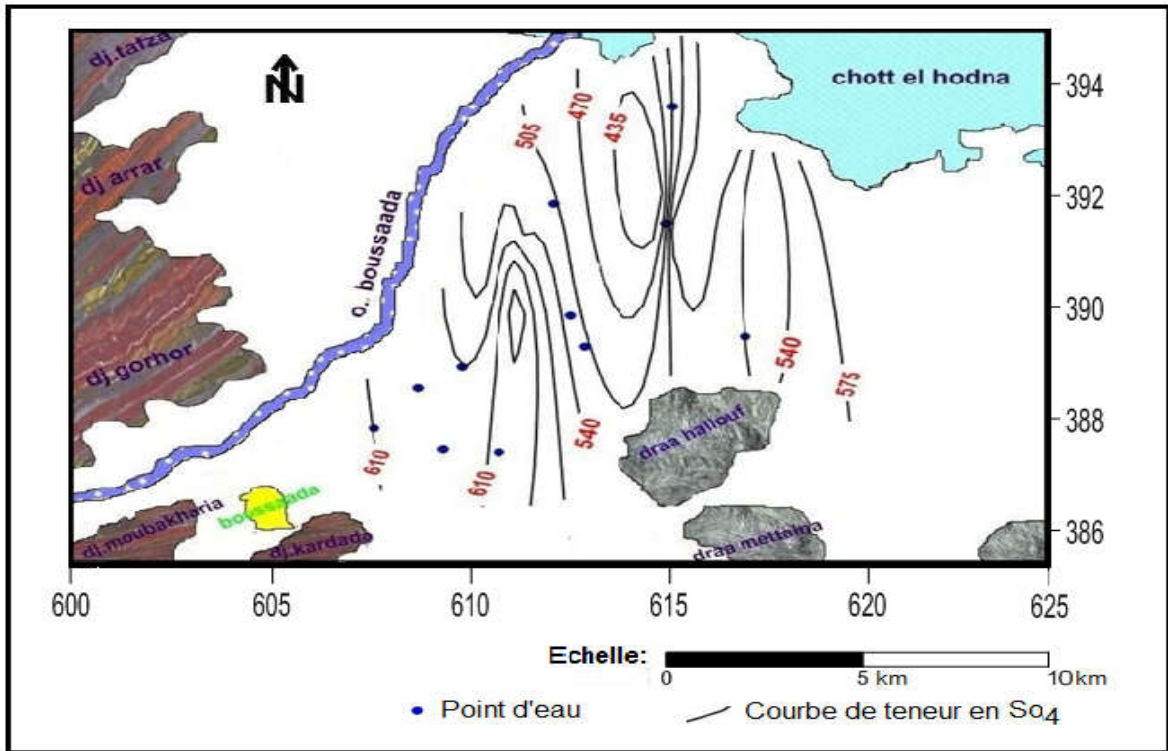


Fig. III.14. Carte iso-teneur en sulfate (SO₄) en mg/l- Juil 2017

III.2.2.1.6- Carte iso-teneur en Nitrate (NO₃⁻)

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.

✓ L'examen du tableau. III.6 et les fig. III.15, III.16 montrent que les eaux de 54.54% des points d'eau ont des teneurs en nitrate dépassant la norme durant la campagne de Mai 2016, avec une valeur maximale de 94 mg/l et 72,72% pendant la campagne de Juil 2017, avec une valeur maximale 96 mg/l. La répartition spatio-temporelle des teneurs en NO₃ montre une concordance soit dans le coté graphique ou les valeurs. Les teneurs élevées des nitrates sont en liaison avec les terrains agricoles d'où l'utilisation des engrais et fumiers.

Tableau III. 6. Statistique de Nitrates dans les eaux souterraine de la Zone d'étude

Périodes \ Valeurs	% des points d'eau > à la Norme	Points d'eau	Valeurs normatives de (NO ₃ ⁻)	
			OMS 2006	Algériennes 2000
Mai 2016	54.54 %	1, 3, 4, 5, 7,10	50 (mg/l)	50 (mg/l)
Juil 2017	72.72 %	1, 2, 3, 4, 7,8, 9,11		

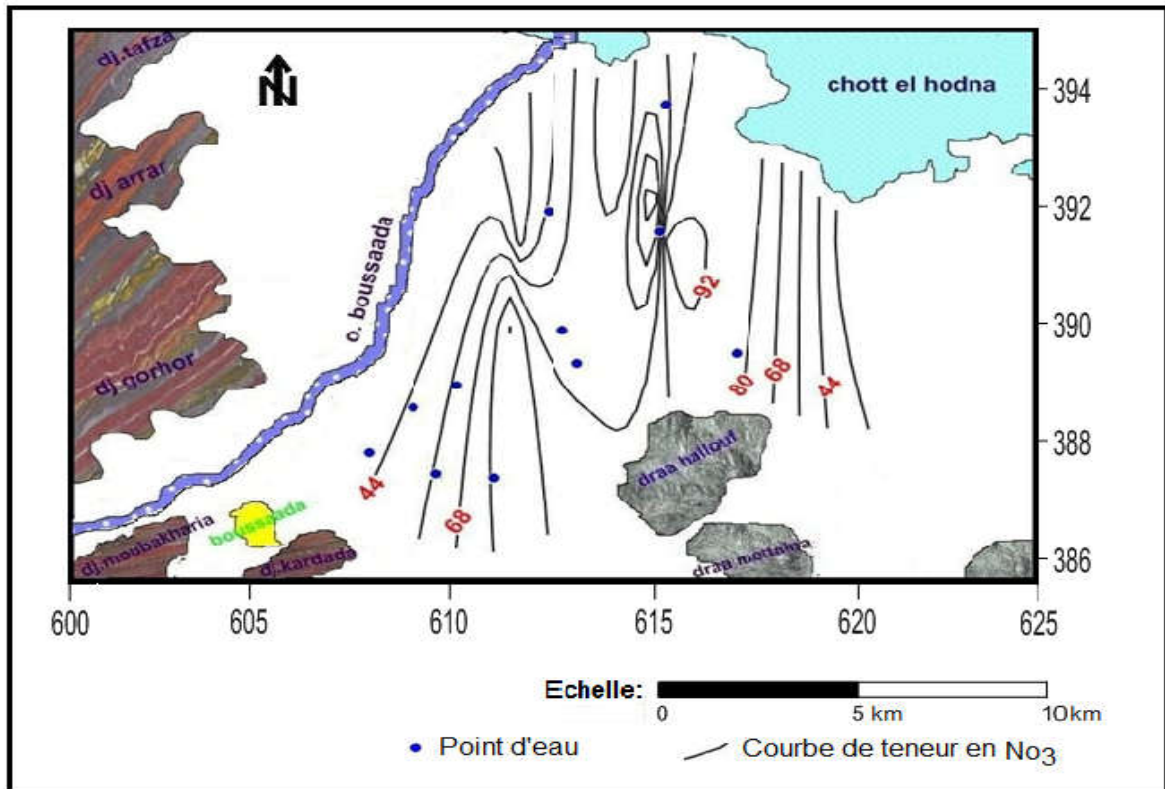


Fig. III.15. Carte iso-teneur en nitrates (NO₃⁻) en mg/l - Mai 2016

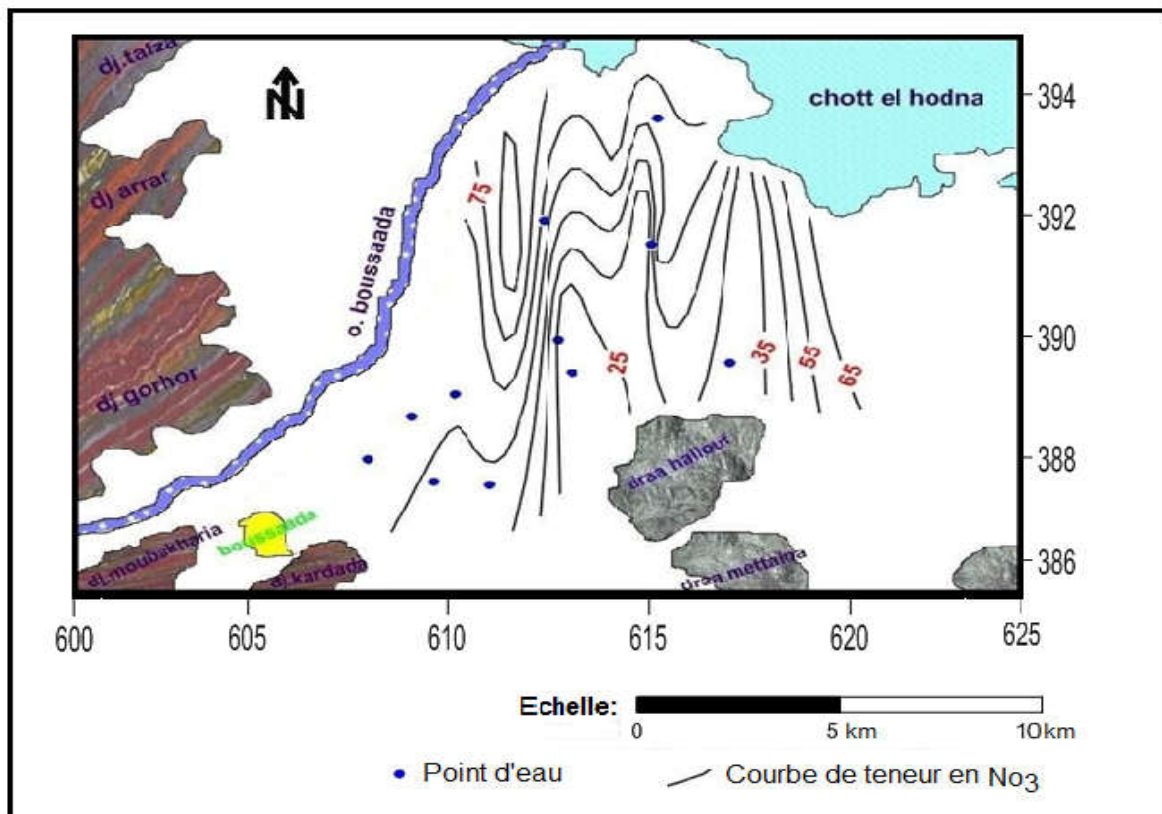


Fig. III.16. Carte iso-teneur en nitrates (NO₃⁻) en mg/l – Juil -2017

III.2.2.2. Faciès hydro chimique

III.2.2.2.1. Classification de Piper

Le diagramme de Piper comporte un losange et deux triangles équilatéraux dont les côtés sont divisés en cent parties égales correspondantes à des pourcentages d'ions par rapport à la concentration des ions de même signe. Ce diagramme permet une classification simple des eaux. L'examen des diagrammes de Piper (Fig. III. 17 et III. 18) montrent que la plus part des eaux analysées ont un faciès chimique ; *Chloruré sulfaté calcique et magnésien* pour les deux Compagnes (Mai 2016 et Jul 2017).

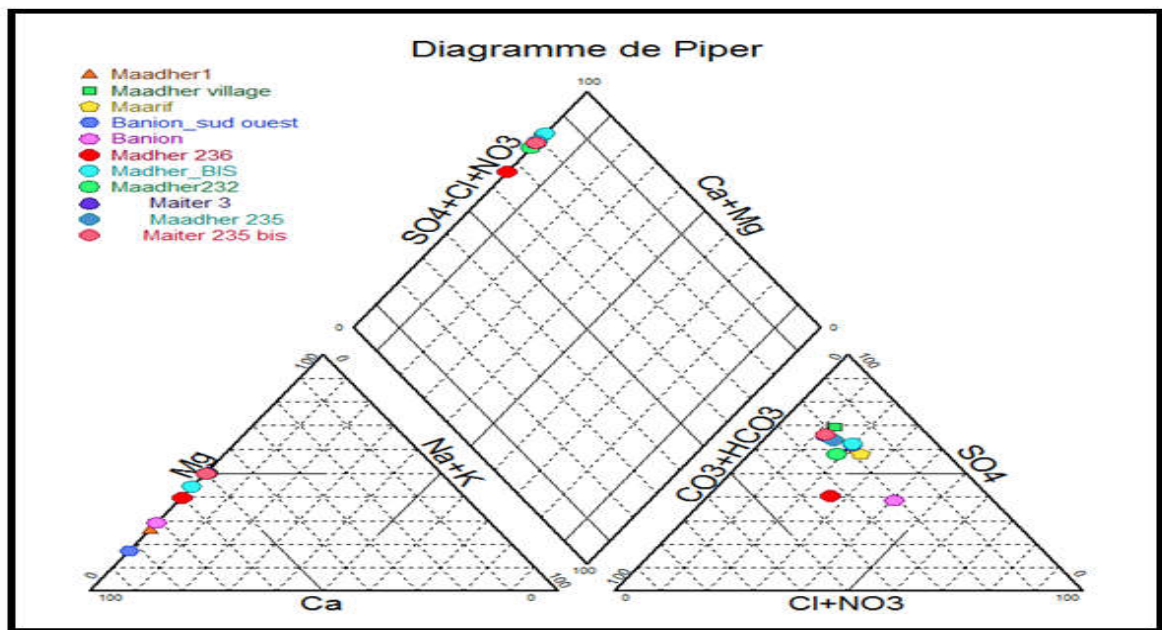


Fig. III.17. Diagramme de Piper Compagne de Mai 2016

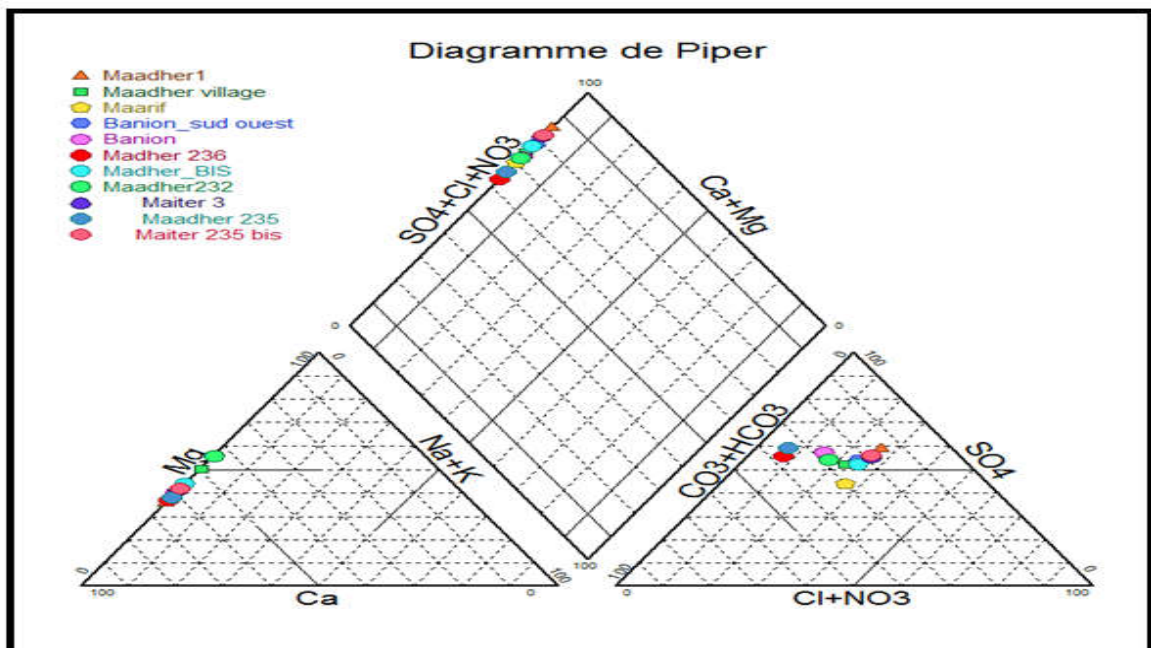


Fig. III.18. Diagramme de Piper Compagne de Jul 2017

III.2.2.2.2. Classification de Schoeller et Berkaloff

Les diagrammes semi-logarithmiques verticaux mis au point par E. Berkaloff et Schoeller permettent de connaître les faciès hydrochimiques. Ils sont en échelles logarithmiques verticales équidistantes qui servent au rapport des valeurs représentatives de Ca, Mg, (Na+K), Cl, SO₄, (HCO₃+CO₃) et NO₃. Chaque échelle est une grandeur en (mg/l) et (még/l). L'analyse des diagrammes de SCHOELLER – BERKALOFF (Fig. IV.19 et IV.20) montrent que la majorité des eaux de la zone d'étude donnent un faciès chimique : *sulfaté calcique* pour les deux Compagnes (Mai 2016 et Juil 2017).

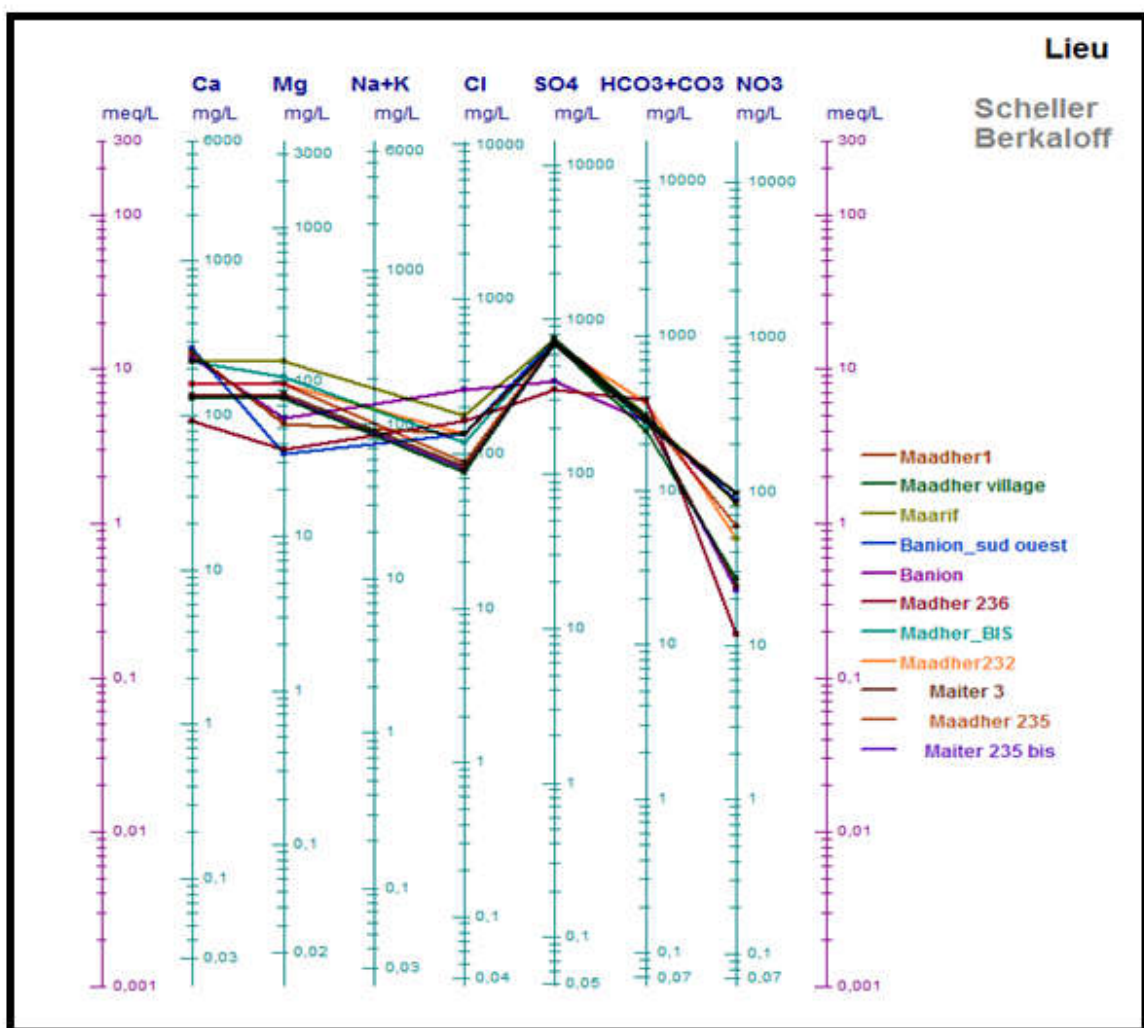


Fig. III.19. Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF 2016

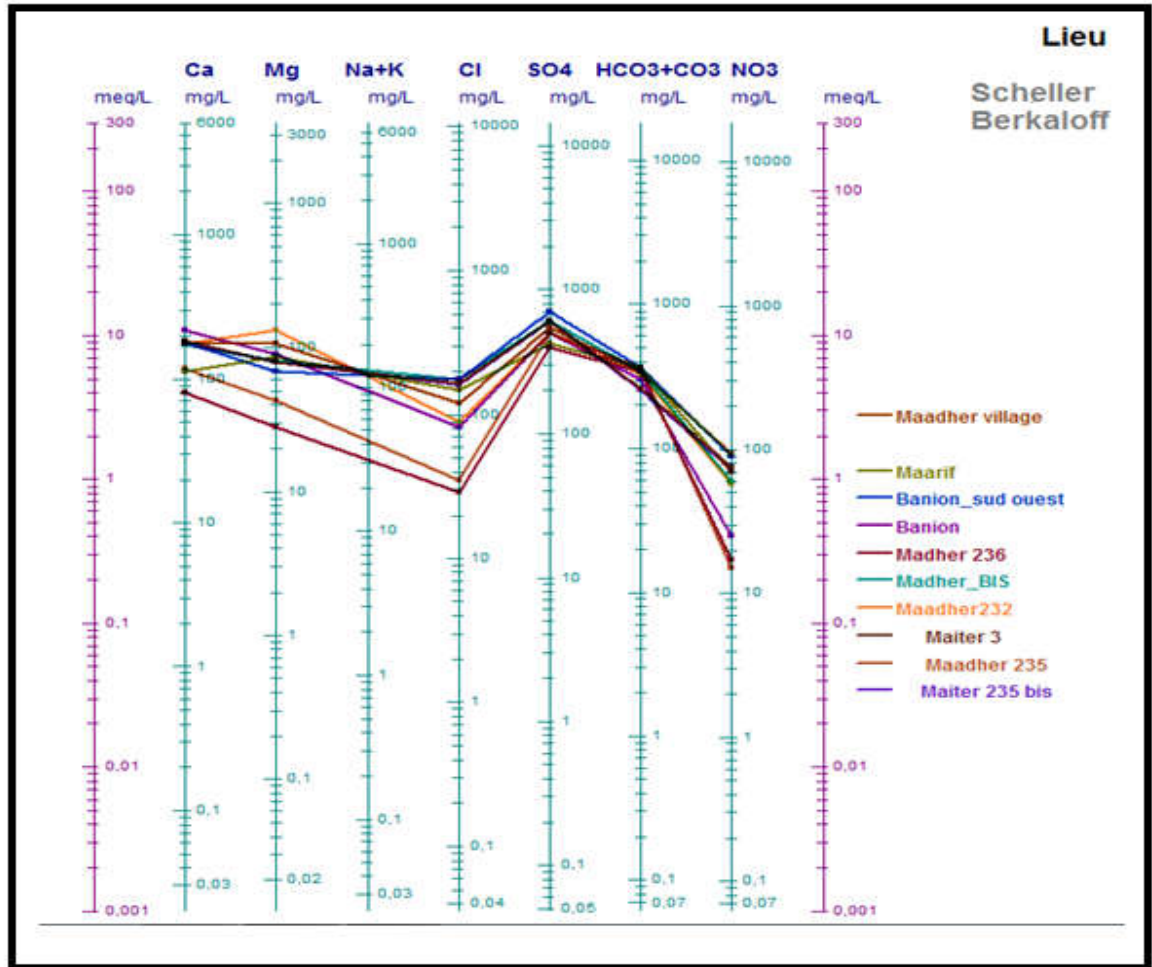


Fig. III.20. Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF 2017

III.2.2.3- Origine des éléments chimiques

Les eaux souterraines qui circulent dans la nappe proviennent des formations calcaires et carbonatées qui bordent la plaine et aussi de l'infiltration des eaux pluviales. Le parcours d'écoulement et les couches traversées influent sur l'acquisition des éléments chimiques. En se basant sur les mesures et les analyses chimiques trouvés, on va essayer de déterminer l'origine probable des ions de ces éléments.

III.2.2.3.1- Origine du calcium (Ca²⁺):

Le calcium tire son origine des carbonates et du gypse (carbonatée et évaporitique), comme il peut provenir des apports d'engrais azotés qui participent à la dissolution des carbonates. La détermination de l'origine de Calcium est nécessaire pour connaître les mécanismes du chimisme de la nappe. La figure (III.21) montre que la majorité des points d'eau pour les deux périodes se trouve dans le domaine évaporitique, cela probablement dû à la dissolution des formations gypsifères (CaSO₄, 2H₂O).

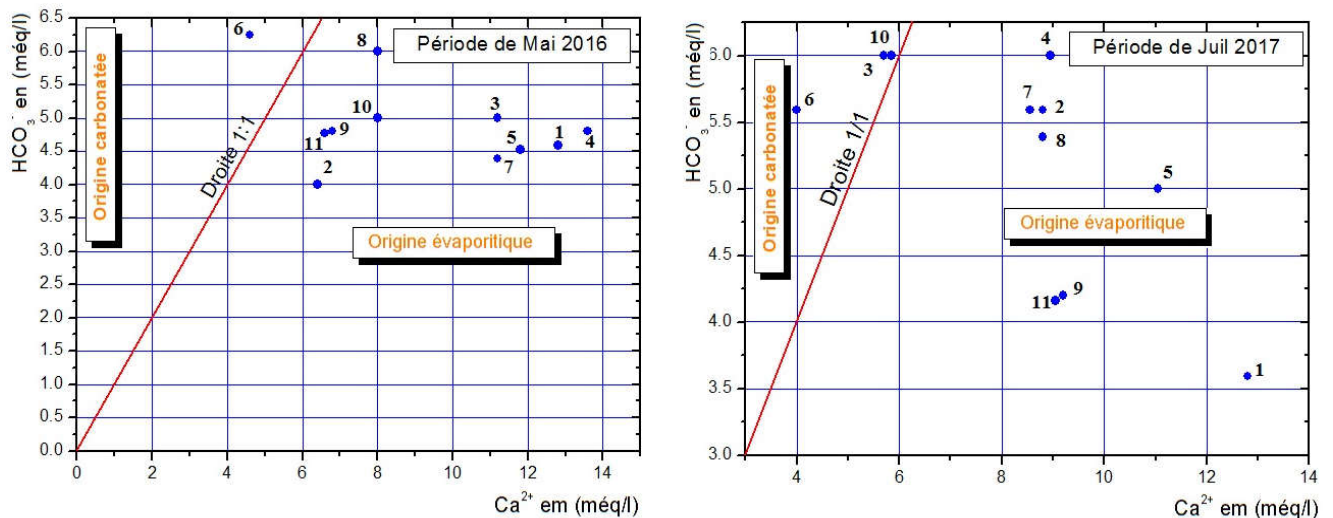


Fig. III.21. L'évolution du Ca²⁺ en fonction de HCO₃⁻ selon la droite de pente (1 / 1)

III.2.2.3.2- Origine du sulfate (SO₄²⁻):

Généralement les sulfates dans les eaux naturelles, ont essentiellement deux origines : géochimique (contact avec du gypse ou d'autres minéraux communs) et anthropique (l'oxydation de H₂S et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère). [18]

La figure (III.22) montre que la majorité des points d'eau pour les deux périodes tirent leurs origines d'autres minéraux communs liés à l'utilisation des engrais chimiques, le lessivage des terrains argileux et marneux, des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère.

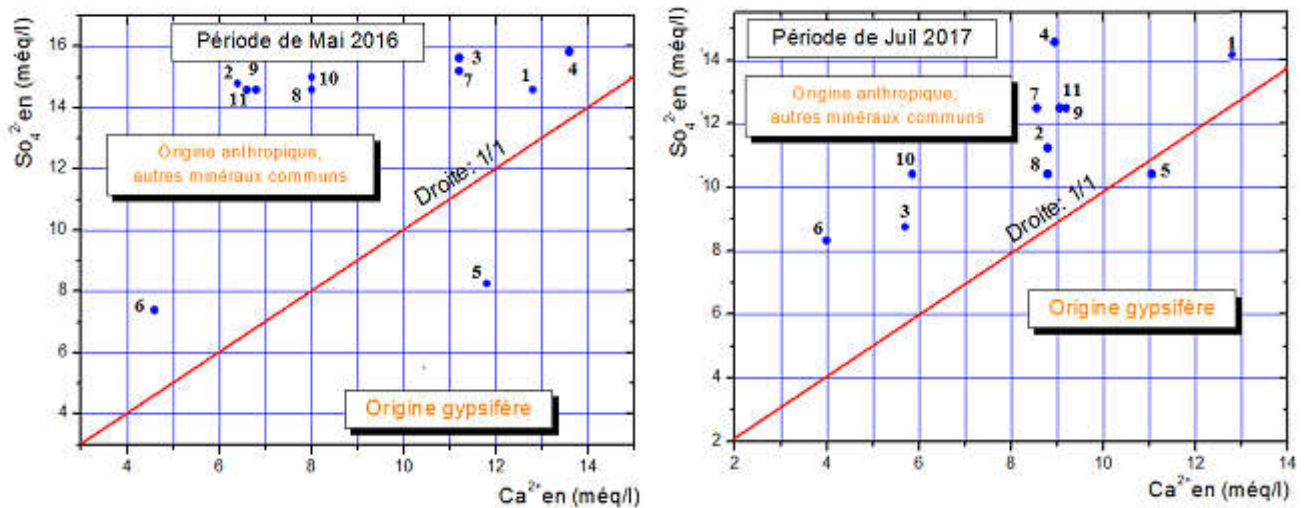


Fig. III.22. L'évolution du Ca²⁺ en fonction de SO₄²⁻ selon la droite de pente (1 / 1)

III.2.2.4- Indices de saturation et équilibres chimiques

L'indice de saturation est un modèle d'équilibre décrit le degré d'équilibre chimique d'une solution aqueuse avec un minéral, et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche. [16]

Le degré de saturation, de sous saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral concerné n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité (**Ksp**) au produit d'activité ionique (**KIAP**) des ions de référence dans la solution. Le degré de saturation peut être estimé à partir de l'équation suivante : [19]

$$IS = \log (KIAP/Ksp)$$

Où :

IS = l'indice de saturation.

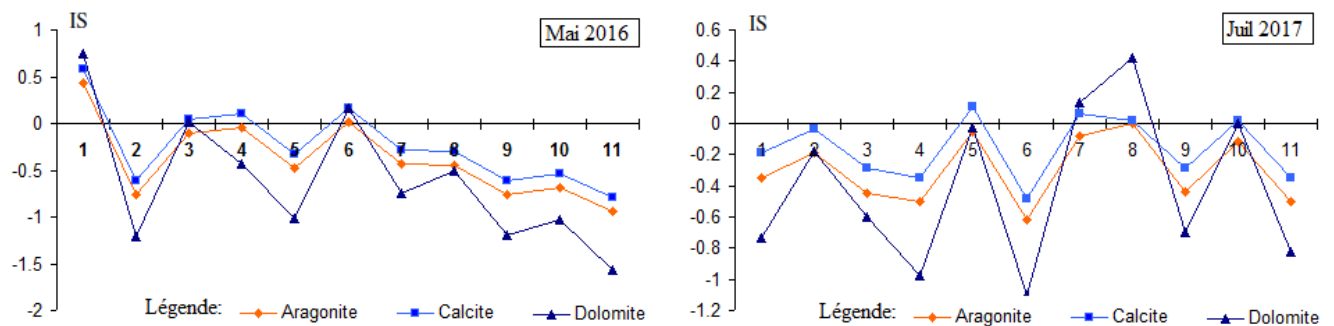
KIAP = le produit d'activité ionique des ions.

Ksp = le produit de la solubilité du minéral.

- Généralement l'équilibre d'eau-roche est atteint quand SI = 0.
- $IS > 0$, l'eau est supposée sursaturée, la précipitation des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre.
- $IS < 0$, l'eau est sous-saturée, la dissolution des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre.

D'après les résultats obtenus par logiciel de calcul géochimique (PhreeqC), la fig.III.23 montre que la majorité des échantillons d'eau sont sous-saturés pour les phases minérales carbonatées et évaporitiques, d'où la dissolution des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre.

✓ **-Minéraux carbonatés**



✓ **Minéraux évaporitiques**

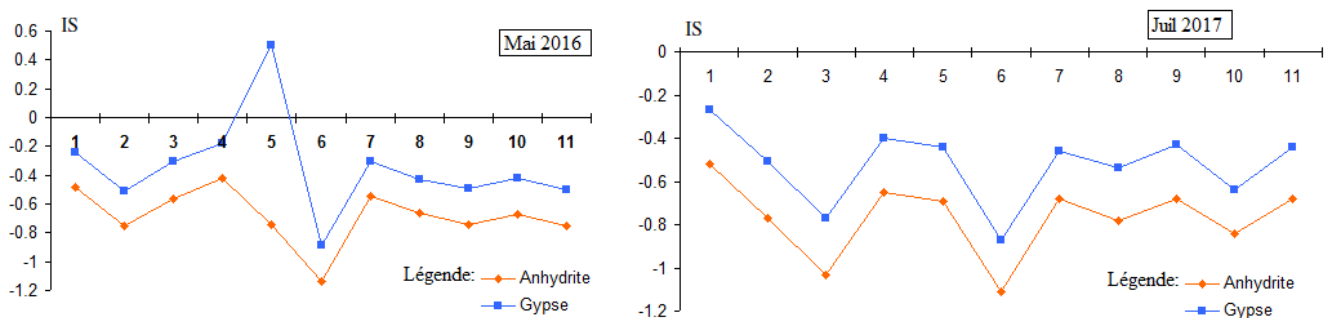


Fig. III.23-Variation de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et évaporitiques

III.3. Analyses statistiques des paramètres physico-chimiques

On traite les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines des forages implantés dans la zone d'étude par l'Analyse en Composantes Principales (ACP), dont l'objectif d'identifier les faciès chimiques et l'interaction eau-roche afin d'expliquer l'occurrence de tel élément par rapport à un autre.

III.3.1.L'Analyse en composantes principales (ACP)

III.3.1.1. Principe de l'ACP

L'analyse en composantes principales, souvent notée ACP, fait partie des techniques descriptives multidimensionnelles. Ces techniques d'exploration sont exécutées dans le cadre d'enchaînements de procédures complémentaires de visualisation et de synthèse utilisées pour démêler la complexité et la redondance des données brutes. L'opération de l'Analyse de Composantes Principales consiste à passer d'un tableau des données brutes, contenant toute l'information recueillie sur le phénomène que nous souhaitons étudier, à certaines représentations visuelles des données. Cette opération entraînera une certaine perte "d'information" que l'on essaie de minimiser. En échange, on obtient un gain en "signification", en particulier grâce aux représentations graphiques. Afin d'avoir un minimum de connaissances sur le fonctionnement de l'ACP et la nature des résultats qu'elle produit, qu'on peut facilement interpréter, [14]

III.3.1.2. Application de L'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude

L'analyse statistique en composantes principales des résultats de mesures et analyses physico-chimiques pour les deux campagnes (Mai 2016, Juil 2017) a été réalisée sur 11 échantillons et 08 variables dont : la conductivité électrique (CE), le pH, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2} et NO_3^-) à l'aide du logiciel XLSTAT 2016 version démo. Cette analyse permet de synthétiser et de classer un nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leur relation réciproque (Biémi, 1992). Elle permet de mettre en évidence les ressemblances entre deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution. Les paramètres statiques des variables (moyennes et écart types) sont consignés dans les (Tableaux III. 7 et 8) suivants :

Tableau III. 7. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes Algériennes (Mai 2016) [20]

Variable	Unités	Norms Algériennes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
CE	(μ S/cm)	2800	680	2240	1751.45	464.75
pH	Mg/l	6.5 - 8.5	6.33	7.43	6.77	0.35
Ca ⁺⁺	Mg/l	200	92	272	183.63	60.49
Mg ⁺⁺	Mg/l	150	34	136	78.09	31.11
HCO ₃ ⁻	Mg/l	/	244	391	300.18	40.35
Cl ⁻	Mg/l	200	77	262	131.90	54.96
SO ₄ ⁻⁻	Mg/l	200	354	760	556.36	140.95
NO ₃ ⁻	Mg/l	50	12	96	58.36	32.55

Tableau III. 8. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes Algériennes (Juil 2017) [20]

Variable	Unités	Norms Algériennes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
CE	(μ S/cm)	2800	736	1876	1425.63	361.40
pH	Mg/l	6.5 - 8.5	6.64	7.09	6.87	0.16
Ca ⁺⁺	Mg/l	200	219	366	316.72	51.48
Mg ⁺⁺	Mg/l	150	29	177	123.50	56.57
HCO ₃ ⁻	Mg/l	/	400	700	685.90	96.89
Cl ⁻	Mg/l	200	15	94	59.72	28.48
SO ₄ ⁻⁻	Mg/l	200	80	256	168.63	49.48
NO ₃ ⁻	Mg/l	50	28	133	79.90	28.09

Les résultats consignés dans les tableaux (III.7 et III.8) montrent que les valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux des points d'eau étudiés sont dans la fourchette de la norme Algérienne de potabilité, sauf pour les sulfates et les nitrates qui présentent des teneurs très élevées à la norme, tandis que pour les concentrations des calciums et des chlorures sont légèrement tolérées.

A. Matrice de corrélation :

La corrélation des éléments est distinguée par une matrice carrée caractérisée selon un coefficient de corrélation entre les variables, deux à deux (Degré d'association entre deux variables).

Les différentes corrélations entre les variables deux à deux peuvent être déterminées sur la base du coefficient de corrélation significatif (critique) tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre d'observations et de variables mis en jeux. [21] La corrélation entre les paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines aide à comprendre certains phénomènes dégagés par l'interaction eau-roche et permet de donner une approche sur l'origine commune de certains paramètres. Du tableau. III.9, ce coefficient pour une erreur 5% sera égal à $r_c = 0.30$.

Tableau III.9. Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson

v / e	0.1	0.05	0.02	v / e	0.1	0.05	0.02
1	0.9877	0.9969	0.9995	17	0.3887	0.4555	0.5285
2	0.9000	0.9500	0.9800	18	0.3783	0.4438	0.5155
3	0.8054	0.8783	0.9343	19	0.3687	0.4329	0.5034
4	0.7293	0.8114	0.8822	20	0.3598	0.4227	0.4921
5	0.6694	0.7545	0.8329	25	0.3233	0.3809	0.4451
6	0.6215	0.7067	0.7887	30	0.2960	0.3494	0.4093
7	0.5822	0.6664	0.7498	35	0.2746	0.3246	0.3810
8	0.5494	0.6319	0.7155	40	0.2573	0.3044	0.3578
9	0.5214	0.6021	0.6851	415	0.2428	0.2875	0.3384
10	0.4973	0.5750	0.6581	50	0.2306	0.2732	0.3218
11	0.4762	0.5529	0.6339	60	0.2108	0.2500	0.2948
12	0.4575	0.5324	0.6120	70	0.1954	0.2319	0.2737
13	0.4409	0.5139	0.5923	80	0.1829	0.2172	0.2565
14	0.4259	0.4973	0.5742	90	0.1726	0.2050	0.2422
15	0.4124	0.4821	0.5577	100	0.1638	0.1946	0.2301
16	0.4000	0.4683	0.5425				

v: le degré de liberté. $v = n-p-1$ avec n: le nombre d'observations.
 p: le nombre de variables explicatives. e : le risque d'erreur.

D'après les résultats obtenus on peut distinguer des (Tableaux. III.10, III.11), selon le coefficient de corrélation les ensembles des couples corrélés suivants (Tableau III.12).

Tableau III. 10. Matrice de corrélation des paramètres chimique -compagne Mai 2016.

Variables	pH	CE	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
pH	1							
CE	-0,070	1						
Ca	0,322	0,774	1					
Mg	-0,287	0,127	-0,033	1				
HCO ₃	0,241	-0,494	-0,393	-0,116	1			
Cl	0,306	0,321	0,448	-0,175	0,170	1		
SO ₄	-0,184	0,387	0,273	0,505	-0,391	-0,637	1	
NO ₃	0,326	0,655	0,951	0,143	-0,359	0,458	0,249	1

Tableau III. 11. Matrice de corrélation des paramètres chimique- compagne Juil 2017

Variables	pH	CE	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
pH	1							
CE	0,163	1						
Ca	0,363	0,653	1					
Mg	0,723	0,602	0,538	1				
HCO ₃	0,087	-0,470	-0,683	-0,163	1			
Cl	-0,141	0,657	0,560	0,355	-0,405	1		
SO ₄	-0,203	0,710	0,716	0,157	-0,462	0,748	1	
NO ₃	-0,028	0,548	0,468	0,519	-0,266	0,839	0,640	1

Les Tableaux. III.10, III.11 des matrices de corrélation pou les deux compagnes présentent des corrélations remarquables entre les couples des paramètres physico-chimiques (tableau III. 12):

III. 12. Les couples des paramètres physico-chimiques corrélés

Période	Mai 2016	Juil 2017
Ensemble des couples corrélés	Ca – pH, Ca –CE, , Ca – Cl, Ca – NO ₃	Ca – pH, Ca – CE
	HCO ₃ – CE, HCO ₃ – Ca	Mg- pH, Mg-CE, Mg-CE
	Cl – pH, Cl – CE, Cl- Ca	HCO ₃ - CE, HCO ₃ - Ca
	SO ₄ -CE, SO ₄ -Mg, SO ₄ - HCO ₃ , SO ₄ - Cl,	Cl – CE, Cl – Ca, Cl – Mg, Cl – HCO ₃
	NO ₃ -pH, NO ₃ -CE, NO ₃ -Ca, NO ₃ - HCO ₃ , NO ₃ - Cl	SO ₄ - CE, SO ₄ - Ca,SO ₄ - HCO ₃ , SO ₄ - Cl NO ₃ – CE, NO ₃ – Ca, NO ₃ – Mg, NO ₃ – Cl, NO ₃ – SO ₄

La disparité entre les corrélations de la matrice de la compagne de Mai 2016 et Juil 2017 Peut-être revient à la solubilité des sels minéraux et la dilution durant la période des hautes eaux.

B .Etude des valeurs propres, variables et des individus (Observations)

B. 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.

- *Pour la campagne de Mai 2016*, le premier axe F1 à une valeur propre égale à 3,56, il explique 39,51% de la variance totale, le second axe F2 exprime 2,42 de valeur propre, correspond à un pourcentage de 26, 90%. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec 66,41% de la variance totale.
- *Pour la campagne de Juillet 2017*, le premier axe F1 à une valeur propre égale à 4,33, il explique 48,06% de la variance totale, le second axe F2 exprime 1,85 de valeur propre, correspond à un pourcentage de 20, 55%. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec 68,60% de la variance totale.

La projection des deux facteurs (axes), traduisent l'essentiel des informations recherchées et permettent de représenter de manière significative le nuage de points. Ces facteurs sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus (Tableau III.13).

Tableau III.13: Valeurs propres et pourcentage de la variance exprimée

Compagnes	Axes	Valeur propre	variance (%)	% variance cumulé (exprimée)
Mai 2016	F1	3.56	39.51	39.51
	F2	2.42	26. 90	66.41
Juil 2017	F1	4.33	48.06	48.06
	F2	1.85	20.55	68.60

B. 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 est importante. Les résultats sont résumés dans le Tableau III.14.

Tableau III. 14. Corrélation entre les variables et les facteurs

Compagnes	Facteurs	CE	Ca	Mg	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
Mai 2016	F1	0.811	0.953	0.009	-0.479	0.488	0.232	0.910
	F2	0.309	0.040	0.635	-0.529	-0.642	0.848	0.060
Juil 2017	F1	0.836	0.862	0.631	-0.598	0.847	0.818	0.805
	F2	-0.074	0.140	0.671	0.283	-0.261	-0.410	-0.043

La figure III. 24, permet de visualiser la projection des variables pour les deux compagnes, selon le plan **F1 – F2**.

- *Pour la compagne de Mai 2016* : Le facteur **F1** exprimé par 39.51 % de la variance totale est Chargé positivement par CE, Ca⁺⁺, NO₃⁻, Le second facteur, F2 exprime 26.90 % de la variance totale est Chargé positivement par SO₄²⁻ et négativement par HCO₃⁻, Cl avec une opposition des sulfates aux Bicarbonates. Il oppose donc les eaux d'origine profonde aux eaux d'origine superficielle.
- *Pour la compagne de Juillet 2017*: Le facteur **F1** exprimé par 48.06 % de la variance totale est Chargé positivement par CE, Ca⁺⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, et négativement par HCO₃⁻, ce facteur est considéré comme facteur de minéralisation et pollué par les nitrates. Le second facteur, F2 exprime 20.55 % de la variance totale est Chargé positivement par Mg⁺⁺.

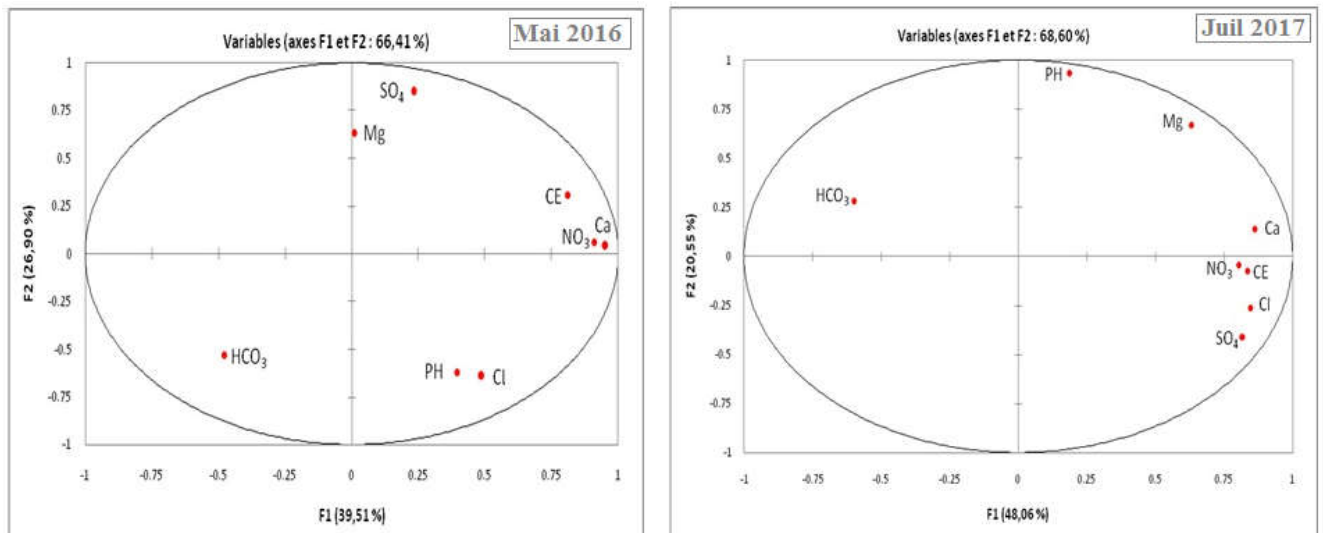


Fig.III.24: Cercle de corrélation des variables sur le plan (F1 et F2)

B. 3- Etude des individus :

La projection des Observations (forages) sur le plan (F1-F2) montre l'existence de trois groupes pour les deux campagnes qui présentent des positions différentes (Fig.III.25)

➤ *Pour la campagne de Mai 2016 :*

- Un premier groupe : correspond aux forages F1, F3, F4, F5, F7.
- Un second groupe: ce groupe est représenté par les forages F2, F8, F9, F10 et F11.
- Un troisième groupe qui correspond au forage F6.

➤ *Pour la campagne de Juillet 2017 :*

- Un premier groupe : correspond aux forages F1, F4, F7, F9 et F11.
- Un second groupe: ce groupe est représenté par les forages F2, F3, F5 et F8.
- Un troisième groupe qui correspond au forage F6 et F10.

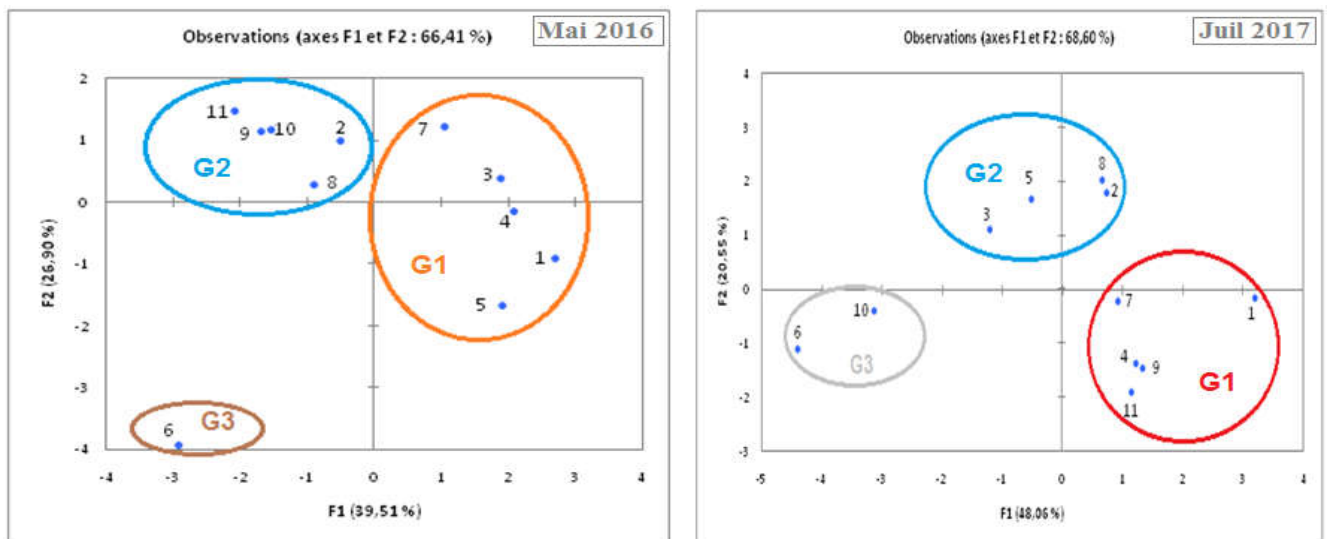


Figure. III.25. Répartition des Individus

L'application de l'ACP nous a permis d'identifier les groupes des eaux suivants :

➤ *Pour la campagne de Mai 2016 :*

Le groupe 1 : est composé de 5 forages (Maadher1, Maadher-BIS, Banion-sud ouest, Banion et Maarif) : $(\text{CE}, \text{Ca}^{++}, \text{NO}_3^-)$, ce groupe enregistre 45.45% du nombre total des échantillons d'eau, d'une eau de tendance calcique due à la dissolution des formations carbonatées, avec une valeur moyenne de conductivité de 2069.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ($\text{CE} < 2800 \mu\text{S}/\text{cm}$ (NA) et $> 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (OMS)), présente une minéralisation élevée traduit par la conductivité élevée, cela s'explique possiblement du rapprochement du Chott el Hodna et l'influence des eaux salées, ainsi par la pollution anthropique des nitrates.

Le groupe 2 :

Le deuxième groupe est représenté les eaux des 5 forages (Maadher1, Maadher-BIS, Banion-Sud ouest, Banion et Maarif) : $(\text{CE}, \text{Ca}^{++}, \text{NO}_3^-)$, représenté par les échantillons et concerne 45.45% du nombre total des échantillons d'eau, avec une valeur moyenne de conductivité de 1647.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce groupe est situé à la partie Sud, loin du lac salé près des formations carbonatées contenant du magnésium et présente un faciès chimique Sulfaté magnésien, influencé par les formations carbonatées contenant du magnésium, la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), lessivage des terrains argileux et marneux.

Le groupe 3 : est composé du seul forage (Maadher 236) : (HCO_3^-) , ce groupe enregistre 9.09% du nombre total des échantillons d'eau, de tendance carbonaté due à la dissolution des formations carbonatées, avec une conductivité de 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$, qui est la caractéristique d'eau moins minéralisée et profonde.

➤ *Pour la campagne de Juillet 2017 :*

Le groupe 1 : Ce groupe est composé de 5 forages (Maadher1, Banion-Sud ouest, Maadher-BIS, Maiter 3 et Maiter 235 bis) : $(\text{CE}, \text{Ca}^{++}, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{NO}_3^-)$, ce groupe enregistre 45.45% du nombre total des échantillons d'eau, avec une valeur moyenne de conductivité de 1673.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, présente une eau minéralisée de faciès chimique Sulfaté calcique cela s'explique possiblement de la dissolution des formation carbonatés et gypsifère ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), lessivage des terrains argileux et marneux, l'influence des eaux salées et la pollution anthropique des nitrates.

Le groupe 2 :

Le deuxième groupe est représenté les eaux des 4 forages (Maadher village, Maarif, Banion et Maadher232,) : (Mg^{++}) , représenté par les échantillons et concerne 36.36% du nombre total des échantillons d'eau, avec une valeur moyenne de conductivité de 1352.50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce groupe est situé à la partie centre de la zone d'étude, présente une tendance magnésienne, influencé par les formations carbonatées contenant du magnésium et la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Le groupe 3 : est composé du seul forage (Maadher 236 et Maadher 235) : (HCO_3^-) , ce groupe enregistre 18.18% du nombre total des échantillons d'eau, de tendance carbonaté due à la dissolution des formations carbonatées, avec une conductivité de 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$, qui est la caractéristique d'eau moins minéralisée et profonde.

La comparaison spatio-temporelle de la composition chimique des eaux souterraines de la zone d'étude pendant les deux campagnes montrent une légère variation entre les groupes d'eau due à la dilution des éléments minéraux pendant la période des hautes eaux et l'influence de l'évaporation durant la période des basses eaux.

III.4.Conclusion

Les analyses et l'interprétation hydrogéochimique des résultats d'analyses physico-chimiques des deux campagnes (Mai 2016 et Juillet 2017) montrent :

- ✓ Le faciès chimique le plus dominé est Chloruré sulfaté calcique et magnésien pour les deux Campagnes.
- ✓ L'analyse cartographique montre que les concentrations élevées du Calcium caractérisent 45% des points d'eau durant Mai 2016 et les Sulfates de 100% dépassant la norme pour les deux campagnes, dues à la dissolution des roches carbonatés et gypsifères (Djebel Kerdada, Djebel Moubakharia ..) d'une part et dissolution, le lessivage des formations argileuses, marneuses et salifères provenant du lac salé d'autre part, et les points d'eau touchés par la pollution par nitrates augmentent de 54.54% durant la campagne Mai 2016 à 72.72% durant Juillet 2017, cela revient à l'activité agricole et l'effet de l'évaporation durant la période des basses eaux.
- ✓ L'Analyse statistique en composantes principales ACP des deux campagnes (Mai 2016 et Juillet 2017) résultent que ; presque les même résultats et renferme trois groupes selon la tendance et dominance des éléments minéraux pour les deux campagnes :
 - Le premier groupe présente les eaux minéralisées, caractérisées par des conductivités élevées traduisent l'influence des eaux salées du Chott-El-Hodna. De tendance calcique et touché par la pollution des Nitrates.
 - Le deuxième groupe est caractérisé par des eaux de faciès Sulfaté magnésien.
 - Le troisième groupe présente les eaux moins minéralisées avec des faibles CE, de tendance carbonatée. Donc il caractérise les eaux profondes.

La qualité des eaux de la zone d'étude appartenant à la région de Boussaâda est influencée directement par la géologie locale et l'interaction eau-roche (Formations carbonatés, calcaires et gypsifères des Djebels Kerdada, Moubakharia...), pendant le séjour et les écoulements souterraines et par la vulnérabilité à la pollution en présence des points de contact avec les eaux de surface (lessivage des terrains argileuses et marneuses et terrains salées –Chott el Hodna-).

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude que nous avons menée dans la région de Boussaâda nous a permis de faire une approche à la connaissance de la qualité des eaux souterraines par différentes méthodes graphiques et statistiques. Cette étude est basée sur des données et connaissances de la région telles que :

- Le climat de Boussaâda est caractérisé par un climat semi-aride, sec et très chaud en été et très froid hiver avec des températures qui varient de 3,7 °C au mois de janvier à 40°C en juillet. Les précipitations annuelles atteignent environ 282 mm.
- La géomorphologie : Le sous bassin versant du Boussaâda 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.
- La géologie : La géologie de la région de Boussaâda présente des formations susceptibles d'être aquifère et renferme les conditions favorables pour l'accumulation des eaux souterraines, à partir des bords de la plaine ou affleurent des barres carbonatées tel que les calcaire et les dolomies.
- L'hydrogéologie: 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-NE.
 - ✓ 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).
- L'étude hydro-chimique de la qualité des eaux souterraines, et soit à travers l'analyse cartographique des paramètres physicochimiques des eaux souterraines des forages, soit par les analyses statistiques en composantes principale (ACP) fait ressortir les points suivants :

Conclusion générale

- L'analyse cartographique montre que les concentrations élevées du Calcium, dues à la dissolution des roches carbonatés et gypsifères, d'une part et dissolution, le lessivage des formations argileuses, marneuses et salifères provenant du lac salé.
- ✓ Suivant le diagramme de Piper et de Scholler Birkaloff, Les faciès chimique le plus dominé est Chloruré sulfaté calcique et magnésien pour les deux Compagnes.
- ✓ Les résultats comparatives par l'Analyse statistique en composantes principales ACP des deux compagnes (Mai 2016 et Juillet 2017) résultent que ; presque les même résultats et renferme trois groupes selon la tendance et dominance des éléments minéraux pour les deux compagnes :
 - Le premier groupe présente les eaux minéralisées, caractérisées par des conductivités élevées traduisent l'influence des eaux salées du Chott-El-Hodna. De tendance calcique et touché par la pollution des Nitrates.
 - Le deuxième groupe est caractérisé par des eaux de faciès Sulfaté magnésien.
 - Le troisième groupe présente les eaux moins minéralisées avec des faibles CE, de tendance carbonatée. Donc il caractérise les eaux profondes.

La qualité des eaux de la zone d'étude appartenant à la région de Boussaâda est influencée directement par la géologie locale et l'interaction eau-roche (Formations carbonatés, calcaires et gypsifères des Djebels Kerdada, Moubakharia...), pendant le séjour et les écoulements souterraines et par la vulnérabilité à la pollution en présence des points de contact avec les eaux de surface (lessivage des terrains argileuses et marneuses et terrains salées –Chott el Hodna-).

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

[1]: Blum A., Barbier J., Chery L., Petelet-Giraud E., 2001. *Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie*. BRGM / RP-51093-FR.

[2] : A. Benrabia. Mémoire de master en hydraulique «Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda Wilaya de M'Sila» université de M'sila (2012/2013).

[3] : Source : Weather on line, statistiques de 2000 à 2012.

[4] : www.boussada.com Page consultée le 05/02/2016 Adresse URL :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Bou_Sa%C3%A2da

[5] : L'ANRH Agence nationale des ressources hydriques.

[6] : S.RIAD. « Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc » thèse doctorat, université des sciences et technologies de Lille & université ibnou zohr d'Agadir, France, Maroc. (2002).

[7] : A.GHACHI. « Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie ». Office des publications universitaires, Alger. (1986).

[8] : SARI AHMED.A. « L'hydrologie de surface ». Editions distribution Houma Alger. (2002).

[9] : A.Hattab. Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique «Modélisation des écoulements du bassin versant du K'sob par l'analyse corrélative et spectrale (ACS) et les ondelettes des pluies et débits » en hydraulique université de M'sila. (2007).

[10] : A.BOUANANI. « Hydrologie, transport solide et modélisation Etude de quelques sous bassins de la Tafna » thèse doctorat, Algérie. 2004.

[11] : B.ABDELKADER. Mémoire Master « Analyse statistique multi variée des eaux souterraines de la région de Boussaâda » en Hydraulique urbaine, université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA (2013).

[12] : F.Mansouri. Mémoire de master en hydraulique « Etude de la qualité des eaux souterraines de la région de chemora w. de Batna» université de M'sila Université de M'sila. (2011).

[13] : K.AYACHE. Etude hydrogéologique de la plaine d'Ain Azel. (1991).

- [14] : A.Hattab. Mémoire de master en hydraulique « Etude hydrogéologique du bassin versant du bordj ghdir » université de m'sila université de m'sila. (2015).
- [15]: **GÜLER. C, THYNE. G.D, MCCRAY. J.E, TURNER. A.K, (2002).** Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology. Journal.10, 455-474.*
- [16]: **DREVER. J.I, (1997).** The geochemistry of natural waters, *3rd edn, Prentice Hall, New Jersey, 436p.*
- [17] : **BEAUDRY. T, TARDAT HENRY. M, (1984).** Chimie des eaux, édition. Les griffons d' argiles, *1ère édition, INC Canada.*
- [18] : **Deliste C.E.et Schmidt J.W.** The effects of sulphur on water and aquatic life in Canada.Dans: *Sulphur and itsinorganic derivatives in the Canadian environnement,* NRCC No. 15015, comité associé sur les critères
- [19] : **APPELO C.A.J. et POSTMA. D, (1993).** Geochemistry, groundwater and pollution. *Journal of Hydrology, 155, 1-2, 295-296.*
- [20] : ADE : Algérienne Des Eaux de la willaya de M'Sila. (2016).
- [21] : **LEFEBVRE. J, (1988).** Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles avec exemples d' applications, *3ième édition, 273p.*

ملخص

هذه الدراسة تهدف من خلال الدراسات المرفومترية و المناخية وكذا الجيولوجية و الهيدروجيولوجية و التحاليل الفيزيوكيميائية و الإحصائية للعناصر المكونة للعينات المائية للآبار المدروسة على مستوى الحوض الساكب لبوسعادة إلى إبراز مدى تأثير تضاريس المنطقة و عوامل المناخ على الحوض الساكب، سيما درجة الحرارة و من جهة أخرى تحديد نوعية المياه الجوفية و طبيعتها الغالبة في العمق و علاقتها بطبيعة الصخور من خلال إجراء طرق إحصائية تحليلية ذات جدوى جد فعالة على سبيل المثال (التحليل بالعناصر الأساسية) وذلك بمقارنة النتائج للعينات المدروسة في الفترتين مايو 2016 و جويلية 2017.

Résumé

Notre travail consiste en se basant sur les études : morphométriques du bassin versant de Boussaâda, géologique, hydrogéologique et Analyses physico-chimiques et statistiques des échantillons d'eau prélevés des forages au niveau de la zone d'étude à déterminer l'influence du climat sur le comportement hydrique du notre bassin ; ensuite les études statistiques et hydrochimiques réalisées à l'aide des diagrammes (Piper et Schoeller) et les logiciels XLstat2016 (ACP : Analyse en composantes principales) et PhreeqC (Indices de saturation et équilibre chimique), montrent clairement les paramètres dominants (majors) et leur influence sur la qualité chimique des eaux souterraines, ainsi leurs faciès chimiques révélés des processus d'acquisition de la minéralisation sous l'effet de contact eau-roches et la comparaison des résultats obtenus pour les périodes étudiées (Mai 2016 et Juillet 2017).

Abstract

Our work consists of being based on the studies: morphometric of the area catchment of Boussaâda, geological, hydrogeologic and physicochemical and statistical Analyzes of the water samples taken of drillings on the level of the zone of study to determine the influence of the climate on the hydrous behavior of our basin; then statistical studies and hydrochimic carried out using the diagrams (Piper and Schoeller) and the XLstat2016 software (ACP: Analyzes in principal components) and PhreeqC (Indices of saturation and chemical balance), show the dominant parameters clearly (majors) and their influence on the chemical quality of subterranean water, thus their revealed chemical facies of the processes of acquisition of mineralization under the effect of contact water rocks and the comparison of the results obtained for the periods studied (May 2016 and July 2017).