

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme

MASTER

FILIERE : Hydraulique

Option : Hydraulique urbaine

THEME

**ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIEE DES
EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE
BOUSSAADA**

Dirigé par :
Mr. GHODBANE.M

Présenté par :
HELALI N. EL HOUDA

Promotion : 2015/2016

Remerciements

Au terme de cette étude, je veux d'abord remercier mon encadreur monsieur GHODBANE Massoud pour ses précieux conseils, et ses orientations tout le long d'année.

Je remercie vivement monsieur Ali HATTAB pour sa gentillesse et sa spontanéité avec lesquelles il a bien voulu m'aider à terminer ce travail.

Ensuite, je tenu à remercier aussi mes Professeurs et mes enseignants sur tous monsieur Mezali Farouk, pour l'intérêt qu'ils m'on accordé.

Enfin, mes reconnaissances iront aussi à toute personne qui, de loin ou de près, a participé à l'achèvement

De ce travail ...

Dédicace

Je dédie cette thèse

`A mes très chers parents HELALI Mohamed et ZERROUAK Noura. Qui peuvent être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.

Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je les porte.

Chaque ligne de cette thèse chaque mot et chaque lettre vous exprime la reconnaissance, le respect et l'estime.

Dieu merci d'être mes parents.

`A ceux qui ont toujours été à mes côtés; mes adorables sœurs et frères ; Asma, Leila, Soussou, Mohamed, Saleh, et Sid Ahmed.

`A les plus mignonnes du monde ; mes neveux Mohamed Amine et Siradj Eddine, qu'ALLAH les gardes.

`A ceux qui malgré la distance m'ont toujours accordé leur soutiens mes oncles et mes tantes.

`A mes chères amies Hayem et Marwa avec qui j'ai partagé des moments les plus agréables.

`A tous les étudiantes et les étudiants de ma promotion, sans citer des noms. Que chacun trouve à travers ces lignes ma sincère amitié.

`A mes collègues de travail au C.T.H.

Et à tous ceux qui m'aiment.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Présentation du site d'étude	4
I.1. Introduction	4
I.2. Aperçu géographique:	4
I.2.1. Localisation géographique:	4
I.2.2. Développement et économie	4
I.2.3. Habitats et activités	6
I.2.4. Relief :	6
I. 3.Démographie	8
I.4. Répartition administrative	8
I.5.Le climat	10
I.6.Caractéristiques morphométriques et physiques du B.V	11
I.6.1.Zone étudié B.V de Boussaâda.	11
I.6.2.Surface	11
I.6.3.Périmètre	12
I.6.4.Indice de compacité de Gravelius	12
I.6.5.Courbe hypsométrique et diagramme de fréquence	14
I.6.6.Rectangle équivalent	15
I.6.7.Les indices de pente :	15
I.6.8.Pente moyenne	16
I.6.9.Longueur du cours d'eau principal	17
I.7.Les caractéristiques du réseau hydrographique	17
I.7.1.Densité de drainage	17
I.7.2.Dénivelée spécifique (DS)	18
I.7.3.Temps de concentration (TC)	19
I.7.4.Vitesse d'écoulement de l'eau (VC)	19
I.7.5.Réseau hydrographique:	20
I.7.6.Récapitulatif des caractéristiques principales du B.V Boussaâda	21

I.8.Conclusion	21
Chapitre II : Aperçu géologique	23
II.1.Introduction	23
II.2.Zone de Bou Saada	23
II.3.ELEMENTS de STRATIGRAPHIE :	24
II.4.Conclusion :	26
Chapitre III : Aperçu hydrogéologique	28
III.1.Introduction	28
III.2.Zone de Boussaâda	28
III.2.1.Les cartes structurales	28
III.2.2. Les cartes piézométriques	28
III.2.3.Inventaire des points d'eau:	29
III.2.4.Etude piézométrique :	29
III.2.5.Interprétation des cartes piézométriques :	29
III.3.Conclusion	31
Chapitre IV : Hydrochimie	33
IV.1. Introduction	33
IV.2. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines	34
IV.2.1.Représentation graphique des paramètres physiques.	34
IV.3. Etablissement des cartes hydro-chimiques	37
IV.3.1. Carte iso-teneur en Potentiel hydrogène (Ph)	37
IV.3.2. Carte iso-valeurs de conductivité électrique (CE)	38
IV.3.3. Carte iso-teneur en calcium (Ca^{+2} mg/l)	39
IV.3.4. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2} mg/l)	41
IV.3.5. Carte iso-teneur en chlorure (Cl mg/l)	43
IV.3.6. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^- mg/l)	44
IV.3.7. Carte iso-teneur en Sulfate (SO_4^{--} mg/l)	46
IV.3.8. Carte iso-teneur en Nitrate (NO_3^- mg/l)	48
IV.4.Faciès hydro-chimiques	51

Sommaire

<i>IV.4.1. Classification de Piper</i>	51
<i>IV.4.2. Classification de Schoeller et Berkloff</i>	52
<i>IV.5. Analyses statistiques multivariées des variables physico-chimiques</i>	54
<i>IV.5.1. L'Analyse en composantes principales (ACP)</i>	54
<i>IV.5.1.1. Méthodologie</i>	54
<i>IV.5.1.2. Application de L'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude</i>	55
<i>IV.5.2. L'analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH)</i>	62
<i>IV.5.2.1. Principe de la méthode</i>	62
<i>IV.5.2.2. Avantages de la classification ascendante hiérarchique</i>	62
<i>IV.5.2.3. Application de CAH sur les résultats d'analyses de la région de Boussaâda</i>	62
<i>IV.7. Conclusion</i>	65
<i>Conclusion générale</i>	67

Liste des figures

Figure. I. 1. Carte de la situation géographique de la ville de Boussaâda _____	5
Figure. I.2. Situation géographique de la ville de M'sila. [04] _____	7
Figure. I.3. Situation géographique de la ville de Boussaâda. [04] _____	9
Figure. I.4. B.V de Boussaâda par satellite [07] _____	11
Figure. I.5. Carte du bassin versant étudié _____	12
Figure. I.6. Courbe hypsométrique _____	14
Figure. I.7. Carte hypsométrique du B.V de Boussaâda _____	18
Figure. I.8. Le réseau hydrographique du sous bassin de Bou-Saada. _____	20
Figure. II.1. extrait de la carte géologique du Boussaâda [07].....	23
Figure. II.2. Coupe géologique de la zone de Boussaâda. [04].....	25
Figure. III. 1: Carte de position des forages étudié 2015.....	29
Figure. III. 2: la Carte piézométrique du B.V de Boussaada 2012	30
Figure. III.3: la Carte piézométrique du B.V de Boussaada 2015	31
Figure. IV.1. Répartition de pH des eaux souterraines pour les périodes.....	34
Figure. IV.2. Répartition de CE des eaux souterraines pour les périodes.....	35
Figure. IV.3. Répartition de la Température des eaux souterraines pour les campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015)	36
Figure. IV.4. Carte iso-teneur en Potentiel hydrogène (Ph) 2012.....	37
Figure. IV.5. Carte iso-teneur en Potentiel hydrogène (Ph) 2015.....	37
Figure. IV.6. Carte iso-valeur de conductivité électrique CE (μ S/cm) Mai 2012	38
Figure. IV.7. Carte iso-valeur de conductivité électrique CE (μ S/cm) décembre 2015	39
Figure. IV.8. Carte iso-teneur en calcium (Ca^{+2} en mg/l) 2012	40
Figure. IV.9. Carte iso-teneur en calcium (Ca^{+2} en mg/l) 2015	40
Figure. IV.10. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2} mg/l) 2012	42
Figure. IV.11. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2} mg/l) 2015	42
Figure. IV.12. Carte iso-teneur en chlorure (Cl^- mg/l) 2012	43

Liste des figures

Figure. IV.13.Carte iso-teneur en chlorure (Cl^- mg/l) 2015	44
Figure. IV.14.Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^- mg/l) 2012	45
Figure. IV. 15.Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^- mg/l) 2015	46
Figure. IV.16.Carte iso-teneur en sulfate SO_4 Mai 2012	47
Figure. IV.17.Carte iso-teneur en sulfate SO_4 Mai 2015	48
Figure. IV.18.Carte iso-teneur en Nitrate (No_3^- mg/l) 2012	49
Figure. IV.19. Carte iso-teneur en Nitrate (No_3^- mg/l) 2015	50
Figure. IV.20.Diagramme de Piper Compagne de (Mai 2012).....	51
Figure. IV.21.Diagramme de Piper Compagne de (Décembre 2015).....	52
Figure. IV.22.Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF (Mai 2012).....	53
Figure. IV.23.Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF (Décembre 2015).....	53
Figure. IV.24.Cercle de corrélation (Mai 2012).....	59
Figure. IV.25.Répartition des Individus (Mai 2012).....	59
Figure. IV.26.cercle de corrélation (Décembre 2015)	61
Figure. IV.27.Répartition des Individus (Décembre 2015).....	61
Figure. IV.28. Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique (Q-mode).....	63

Liste des tableaux

Tableau.I.1: Evaluation de la population du Boussaâda.....	8
Tableau.I.2: Données climatiques à Boussaâda	10
Tableau.I.3: Calcul des surfaces partielles et cumulées	13
Tableau.I.4: classification des Reliefs	19
Tableau.I.5: Principales caractéristiques morphométriques du B.V du Boussaâda	21
Tableau IV. 1.Statistiques de pH des eaux souterraines de la zone d'étude.....	34
Tableau IV. 2.Statistiques de C.E des eaux souterraines de la zone d'étude.....	35
Tableau IV. 3. Statistiques de Température des eaux souterraine de la zone d'étude.....	36
Tableau IV. 4.Statistique du calcium dans les eaux souterraines de Boussaâda 2015.....	39
Tableau IV. 5.Statistiques de Magnésium dans les eaux souterraines de Boussaâda 2015.....	41
Tableau IV. 6.Statistique de Chlorure dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015.....	43
Tableau IV. 7.Statistique de Bicarbonate dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015.....	44
Tableau IV. 8. Statistique de sulfaté dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015.....	46
Tableau IV.9.Statistique de Nitrate dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015.....	48
Tableau IV. 10. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes Algériennes	55
Tableau IV. 11.Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes Algériennes.....	56
Tableau IV. 12.Matrice de corrélation des paramètres chimique Mai 2012.....	56
Tableau IV. 13.Matrice de corrélation des paramètres chimique Décembre 2015.....	57
Tableau IV. 14. Corrélation entre les couples des paramètres physico-chimiques.....	57
Tableau IV. 15.Corrélation entre les couples des paramètres physico-chimiques.....	57
Tableau IV. 16. Pourcentage de variance exprimée.....	58
Tableau IV. 17. Corrélation entre les variables et les facteurs.....	58
Tableau IV. 18.Pourcentage de variance exprimée.....	60
Tableau IV. 19.Corrélation entre les variables et les facteurs.....	60
Tableau IV. 20. Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques pour les trois principaux groupes.....	64

ملخص

هذه الدراسة تهدف من خلال الدراسات المرفومترية و المناخية وكذا التحاليل الاحصائية و الكيمائية لعينات العناصر الفيزيوكيميائية للآبار المدروسة على مستوى الحوض الساكب لبوسعادة الى ابراز تضاريس المنطقة و تأثير عوامل المناخ على الحوض الساكب سيما درجة الحرارة, ومن جهة أخرى تحديد نوعية المياه الجوفية و طبيعتها الغالبة في العمق و علاقتها بطبيعة الصخور من خلال اجراء التحاليل الاحصائية و بطرق جديدة ذات جدوى جد فعالة على سبيل المثال (التحليل بالعناصر الاساسية) و (الترتيب الهرمي التصاعدي) وذلك بمقارنة النتائج للعينات المدروسة في الفترتين 2012 و 2015.

Résumé

Notre travail consiste à déterminer en premier lieu les principaux paramètres morphométriques du bassin versant de Boussaâda et l'influence du climat sur le comportement hydrique du notre bassin ; ensuite les études statistiques et hydro-chimique montrent clairement les paramètres dominants (major) et leur influence dans la circulation des eaux souterraines ainsi que la qualité chimique des eaux et leurs faciès chimique à l'aide d'un logiciel diagramme et XLstat et son relation avec les types des roches qui traversé (analyse en composantes principales et la classification ascendante hiérarchique) et la comparaison des résultats obtenus pour les périodes étudié (2012-2015).

Abstract

Our job is to first determine the main morpho-metric parameters Watershed Boussaâda and the influence of climate on water behavior of our basin; then the statistical studies and hydro-chemical parameters clearly show the dominant (major) and their influence on the groundwater flow and the chemical quality of water and chemical profile with a diagram and xlstat software and its relationship with the types of rocks that crossed (principal component analysis and hierarchical clustering) and the comparison of results for the periods studied (2012-2015).

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle vitale pour la survie de l'humanité et de toutes les espèces sur terre. En tant que bien de la création, l'eau est destinée à tous les êtres humains et à leurs communautés. [01]

L'eau souterraine est l'eau qui existe dans les pores, les fissures des roches et dans les sédiments sous la terre. Elle est issue des précipitations ou de la neige et puis, infiltre les sols dans les systèmes d'eaux souterraines. Par la suite, elle peut éventuellement remonter à la surface, ou rejoindre des lacs ou des océans. Elle est naturellement alimentée par la surface, grâce aux précipitations, aux cours d'eau et aux infiltrations d'eaux provenant des rivières. Mais ces dernières années même les eaux souterraines ne sont pas protégées de la Pollution, un danger qui menace notre environnement par l'être humaine. [02]

L'exploitation non rationnelle des ressources, les rejets domestiques et industriels non contrôlés, utilisation excessive de fertilisants chimiques ont un impact néfaste sur la qualité des eaux souterraines.

Les causes de la pollution sont variées. Mais celle qui m'on attiré les causes qui sont liées à l'activité humaine et notamment :

- L'industrialisation est l'une des causes majeures de la pollution de l'eau dans nos villes surtout avant rejet dans le milieu naturel. En absence des dispositions de traitement.
- Les autres causes de pollution de l'eau sont liées à la mauvaise gestion des eaux usées et au mauvais drainage de certaines villes.

A présent, avec l'accélération du développement démographique et économique ainsi que l'évolution du mode de vie oblige de prendre en considération l'étude de la qualité et quantité des eaux souterraines destinée aux consommations.

Pour donner de la matière nous prendrons comme exemple la commune de Boussaâda.

Cette dernière se trouve dans la Wilaya de m'sila est un endroit parmi les endroits touchés par le problème de pollution de l'eau souterraine.

Dans ce cadre, notre étude proposée est pour l'objet de connaitre les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, et hydro chimiques avec une mise en relief des différentes sources de pollution et leur impact sur les eaux souterraines. [03]

Cette étude est basée sur trois axes principaux :

En premier axe notre étude présente les caractéristiques morphologiques de site d'étude de la zone de Boussaâda et suivi d'une présentation démographique ainsi description hydrologique.

En suite une présentation géologique et hydrogéologique qui définit les formations aquifères ainsi que de connaitre les types de nappes et le sens des écoulements principaux.

Et en fin une analyse statistique multi-varie de la qualité des eaux souterraines de la région à l'aide d'un logiciel **XLSTAT 2013**, cette analyse faite sur un échantillon de dix forages implantés dans la zone d'étude.

Chapitre I :

Présentation du site d'étude

Chapitre I : Présentation du site d'étude

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 morphométriques.

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 et des cascades d'ailleurs on dit "oasis Boussaâda", connue de ses palmeraies et ses plaines cultivées, irriguées à partir de la nappe phréatique ainsi que les oueds de Maiter et Boussaâda.

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

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

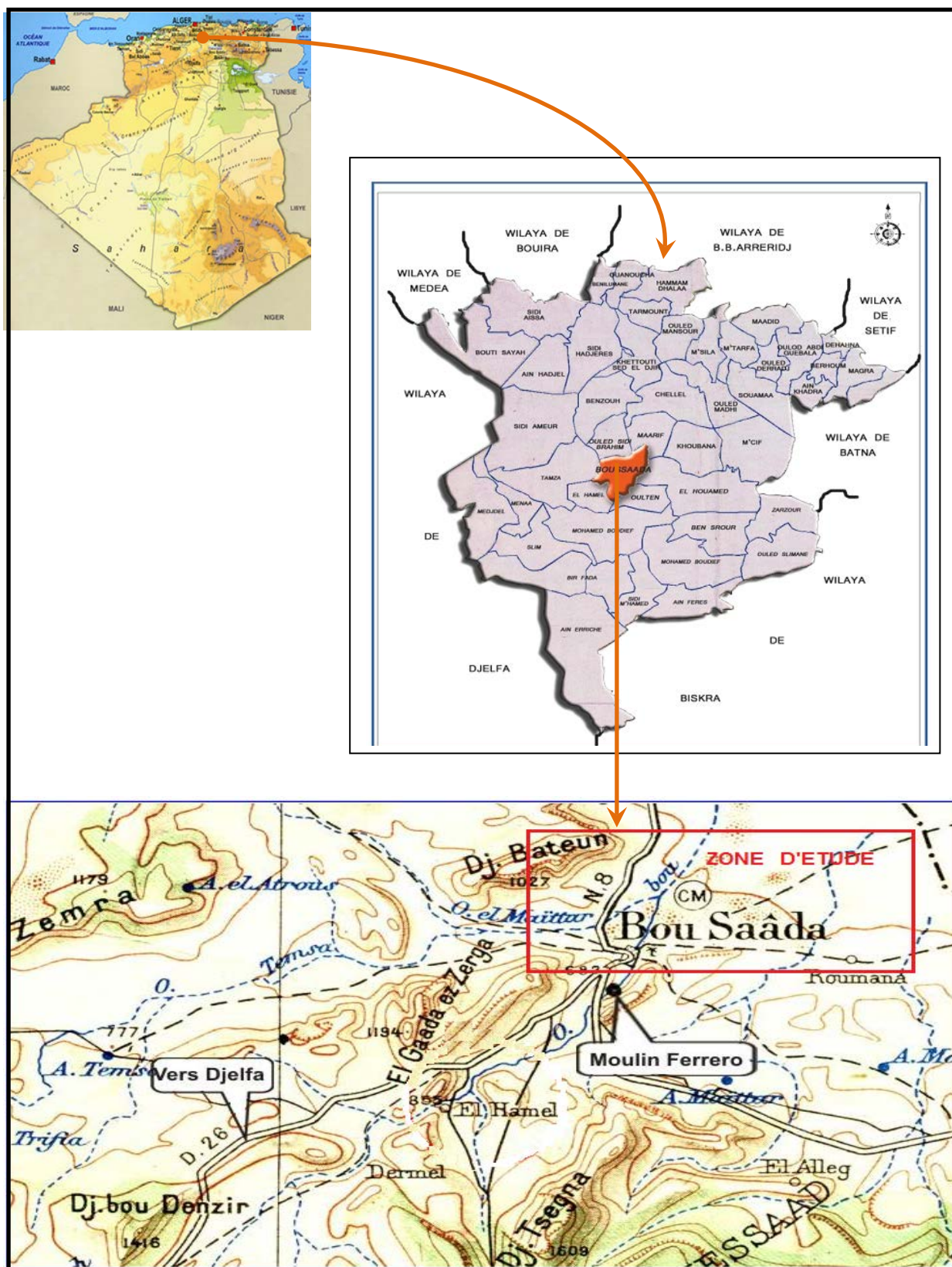


Figure. I. 1. Carte de la situation géographique de la ville de Boussaâda

- ✓ L'axe Bou Saada –Alger sur la RN08 : il structure la ville de Bou Saada, notamment dans la partie Nord-Ouest, le long duquel s'allonge le pôle urbain (la ZHUN), qui contient certains équipements structurants.
- ✓ Axe Bou Saada- Biskra RN46 :c'est un axe structurant la partie Sud- Est le long duquel se localise la zone d'activité, ainsi certains équipements.
- ✓ Axe Bou Saada -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 Bou Saada et notamment oued Maïter
- ✓ Les terrains sableuse sur les rives d'oued Maïter, situé sur le côté Ouest et côté Nord-est de la ville.

I.2.3. Habitats et activités

La plupart des agriculteurs sont concentriez 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 chaines 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). [04]
- ✓ 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 Sebchas où les larges lits de l'Oued sont souvent à sec et sont soumis à la déflation des vents de l'Ouest.



Figure.I.2.Situation géographique de la ville de M'sila. [04]

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 (152306 habitants), la population de la commune est évaluée à 152306 habitants en 2015 (Tableau. I. 1):

Évolution démographique			
1987	1998	2008	2015
66 688	104 029	125 573	152306

Tableau. I. 1: Evaluation de la population du Boussaâda. [05]

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. [04]

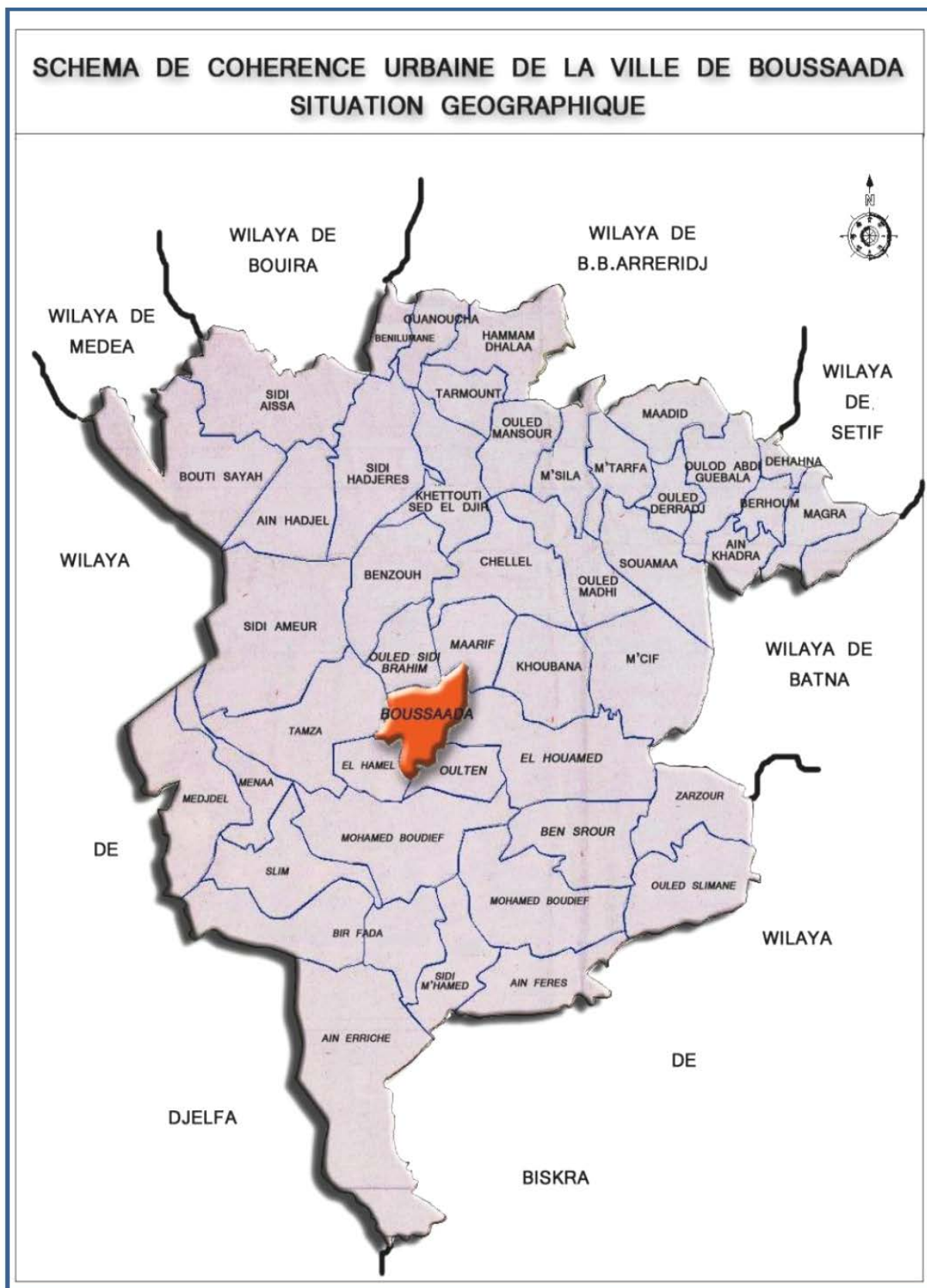


Figure.I.3.Situation géographique de la ville de Boussaâda. [04]

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. [06]

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

Tableau. I.2.Données climatiques à Boussaâda.[06]

I.6.Caractéristiques morphométriques et physiques du B.V

I.6.1.Zone étudié B.V de Boussaâda.



Figure. I.4.B.V de Boussaâda par satellite [07]

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 km^2 , 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 du B.V du Boussaâda été mesurée grâce au logiciel mapInfo

Elle est de l'ordre $187,4 \text{ km}^2$

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 "Map-info" est de **59,54 km**.

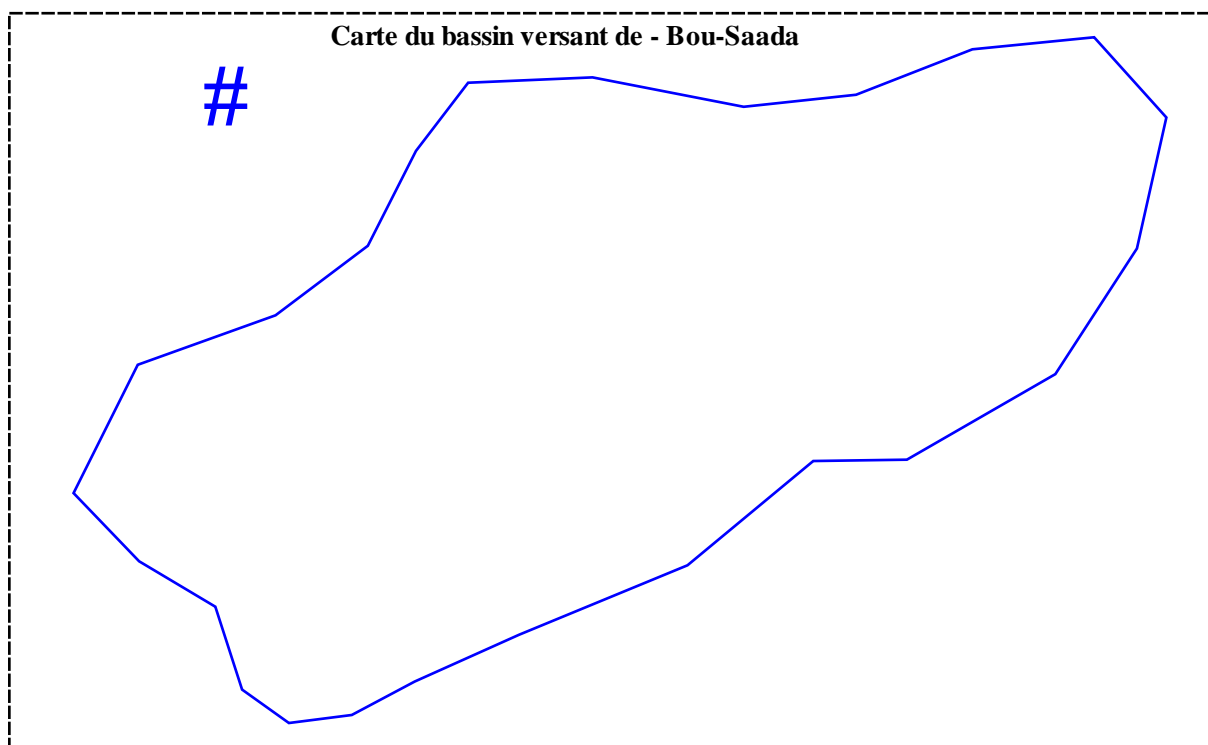


Figure.I.5.Carte du bassin versant étudié

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) :

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

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km^2 .

Le coefficient de Gravelius du B.V du Boussaâda est de 1,218

* 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 [08]

Altitude (m)	Altitude moy (m)	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
		S_i en km^2	%	S_i en km^2	%
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

Tableau. I.3. Calcul des surfaces partielles et cumulées

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 à été réalisé par le logiciel AutoCAD2004. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau (I.3) ; et les courbes de niveau du bassin versant sont données dans la figure (I.6).

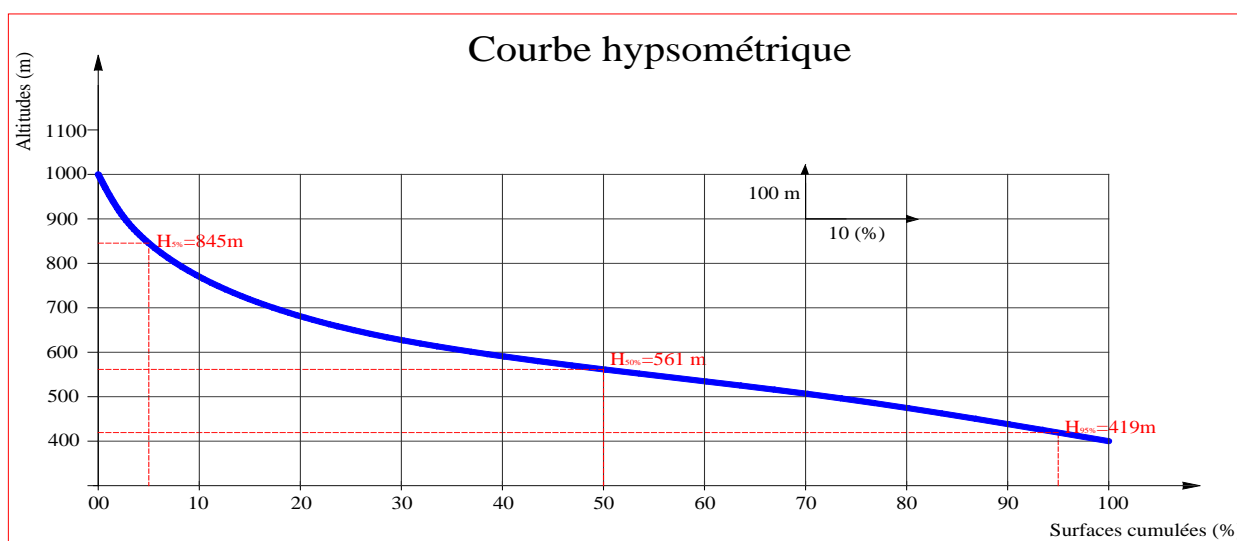


Figure. I.6. Courbe hypsométrique

Pour le bassin versant du Boussaâda, le planimétrage des surfaces comprises entre les différentes courbes de niveau, est donné dans le tableau (I.3) où sont représentés les surfaces cumulées et leurs pourcentages respectifs

La courbe hypsométrique représentée en figure (I.6) montre que **72,32 %** de la surface totale du B.V est comprise entre les altitudes **500** et **800 m**.

Au dessous de **800 m** le pourcentage des surfaces du B.V est très faible par rapport à la surface totale. Il est de l'ordre de **7,73 %**.

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

Si : 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) :

La longueur L :

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

Pour application, la longueur du rectangle équivalent du B.V est de l'ordre de **16.07 Km**

Sa largeur l est : **13.68 Km [09]**

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 :

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

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

Si : Surface partielle correspondante (%).

Soit :

$$I_p = 0.18$$

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 bassin versant du Boussaâda est de : **I_g = 0.026** ; d'après I_g obtenu le B.V du Boussaâda est de relief modéré [10].

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 :

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

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 **15,8 ‰**

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. [11]

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. [11]

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 : $\sum L_i = 150,44$ Km

Et leur surface $A = 187,4$ km²

Donc : $D_d = 0,80 \frac{\text{Km}}{\text{Km}^2}$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant dans une certaine mesure, des conditions 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 [08.13]

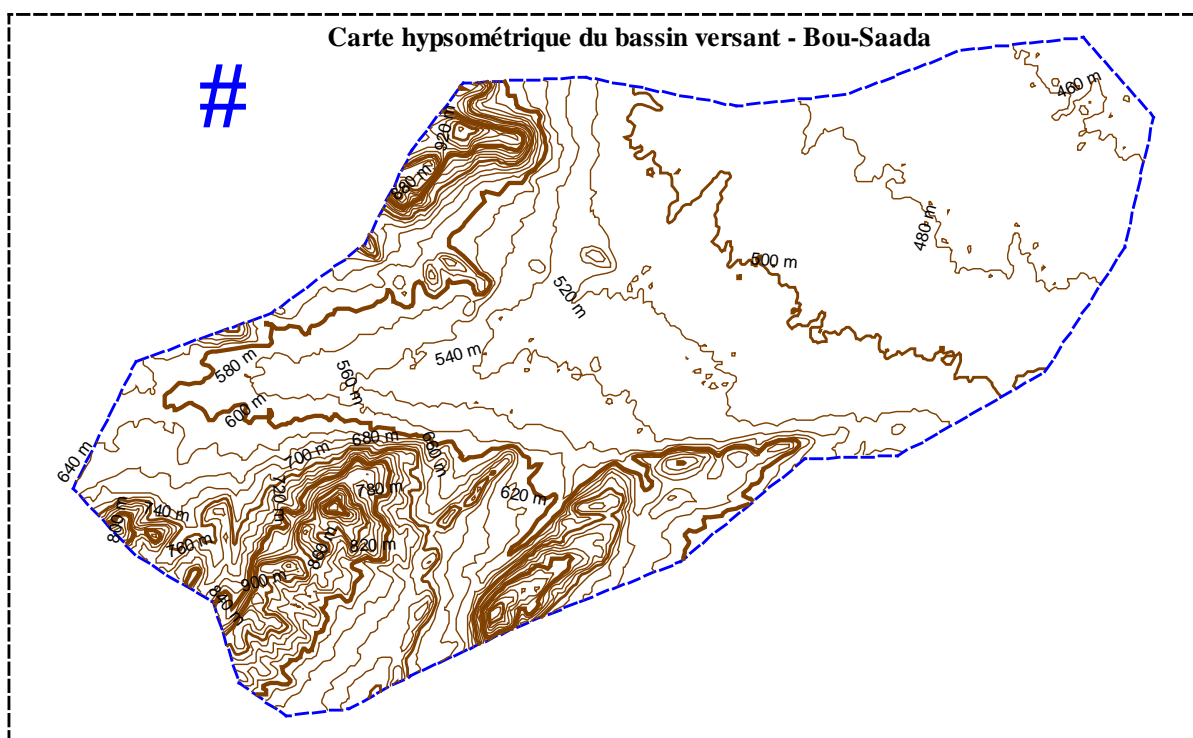


Figure. I.7. Carte hypsométrique du B.V de Boussaâda

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).

$$D_s = D/L * \sqrt{A} \longrightarrow D_s = 26.50 \sqrt{187.4} = 362.52 \text{ m}$$

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 03). [04]

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	$500 < D_s < 750 \text{ m}$

Tableau.I.4.classification des Reliefs

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 :

$$\mathbf{T_c = 4.06 \text{ heures}}$$

Avec :

A : Superficie du sous bassin = 187,4 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 (V_c)

Langueur du talweg principal : 21,430 km = 21430 m (L)

Temps de concentration 4.6 heures = 14760 (Tc)

Donc : $V_c = 1.45\text{m/s}$

I.7.5. Réseau hydrographique:

Le réseau hydrographique de Bou-Saada est marqué par deux oueds, c'est l'oued Maitar issu du versant sud de djebel Mobakhria, et l'autre oued Bou-Saada est issu du djebel Kardada.

Et les eaux pluviales qui traversent ces deux Oueds se déversent dans le chott du Hodna. [4]

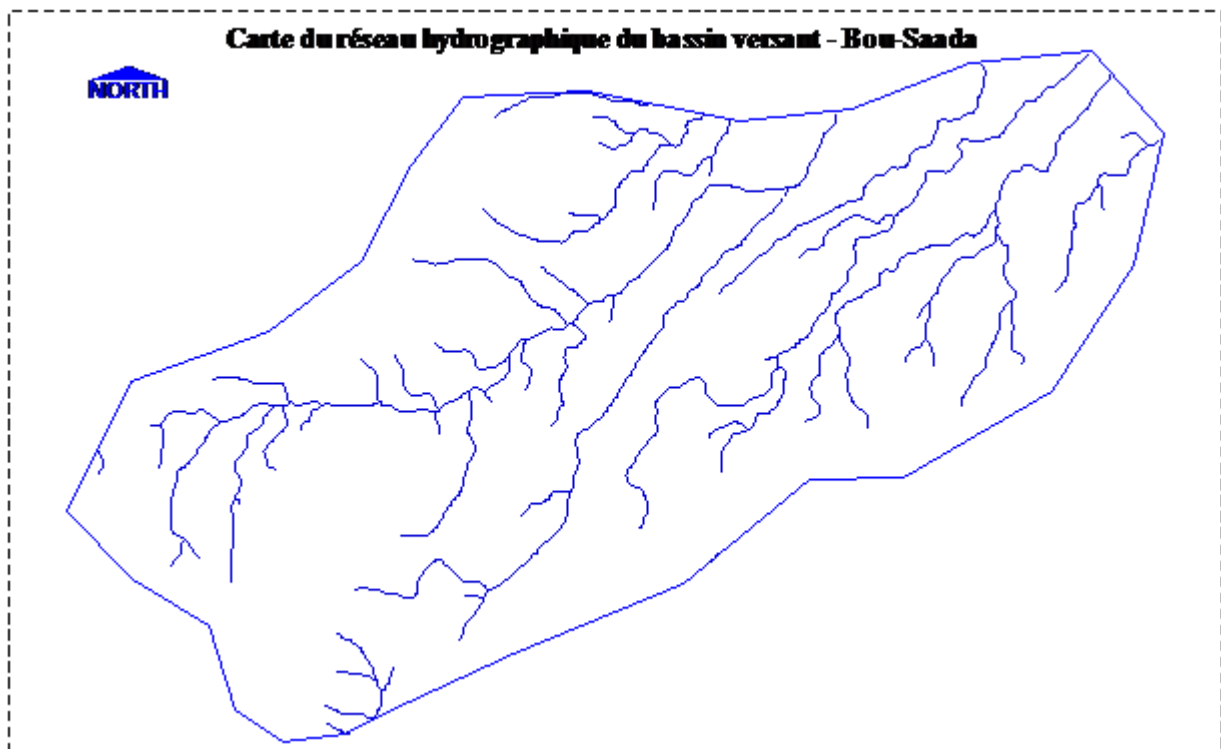


Figure.I.8. Le réseau hydrographique du sous bassin de Bou-Saada.

I.7.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du B.V Boussaâda

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

Caractéristiques morphométriques	Résultats	Unité	Observation
Surface	187.4	Km ²	-----
Périmètre	59,54	Km	-----
Altitude max	1000	m	-----
Altitude moyenne	700	m	-----
Altitude min	400	m	-----
Indice de Gravelius	1,218	-----	Forme allongée
Indice de pente globale	0.026	m/Km	Relief modéré
Longueur du rectangle équivalent	16.07	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	13.68	Km	-----
Longueur du cours d'eau principal	21,43	Km	
Pente moyenne	15,8	m/Km	-----
Dénivelée spécifique	362.52	m	-----
Densité de drainage	0.80	Km ⁻¹	Réseau moins dense
Temps de concentration	4.06	heures	
Vitesse d'écoulement d'eau	1.45	(m/s)	

Tableau.I.5.Principales caractéristiques morpho-métriques du B.V du Boussaâda

I.8. Conclusion

La région de Boussaâda est caractérisée par un climat semi-aride, sec et très chaud en été et très froid hiver.

Le 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.

Chapitre II :
Aperçu géologique

Chapitre II : Aperçu géologique

II.1.Introduction

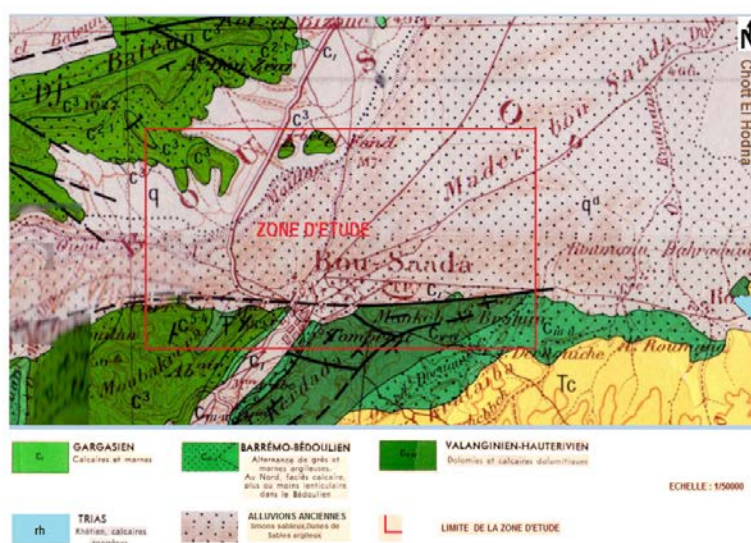
L'étude géologique nous permettons d'identifier les formations perméables détritiques et les informations résistantes fissurées ou karstique susceptibles d'être aquifères, ainsi que les formations imperméable qui constituent soit le toit, soit le substratum de ces informations ; leurs épaisseurs, et 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. [04]

II.2.Zone de Bou Saada

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 SW l'anticlinal du Dj Kerdala,
 - c) à l'Ouest les Dj Zemra et Selat. Par ailleurs, la ville de Bou Saada 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-W sépare les deux zones. [07]



II.3.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 BOU-SAADA, 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 BOU-SAADA, elles sont à prédominance carbonatée, dans lesquelles les horizons gypseux sont réduits.

- **Barrémo-Bédoulien :**

Dans la région de Bou Saada, 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 Bou Saada : 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.

- **Cénomanién**

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 Bou Saada, 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 BouSaada par d'épais calcaires et marnes. Les marnes ont 600m d'épaisseur au Dj Metlili

- **Tertiaire indéterminé**

Dans la région de Bou Saada, le Tertiaire est formé uniquement de dépôts continentaux : argiles rouges et conglomérats d'âge indéterminé

- **Quaternaire**

Alluvions récentes et formations dunaires ; limons sableux et niveaux grossiers à galets en périphérie des formations pontiennes. [07]

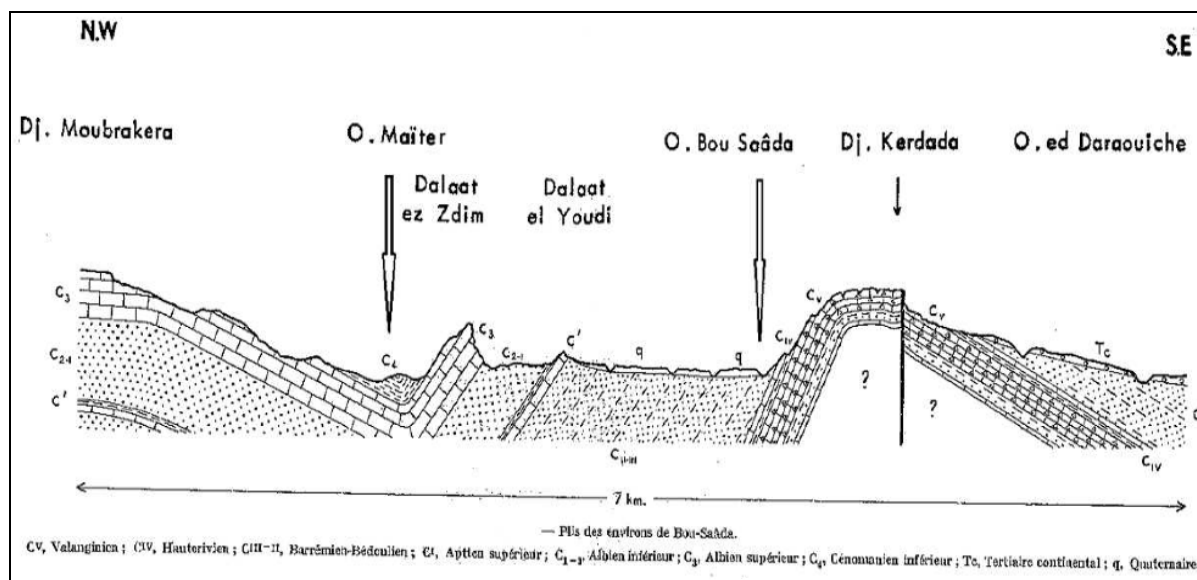


Figure.II.2.Coupe géologique de la zone de Boussaâda. [04]

II.4.Conclusion

La détermination des différents endroits favorable à l'implantation des forages est basée sur une bonne connaissance de la géologie locale et 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. **[04]**

Chapitre III:

Aperçu Hydrogéologie

Chapitre III : Aperçu hydrogéologique

III.1.Introduction

L'hydrogéologie est une branche de la géologie appliquée à l'étude, exploitation et planification des ressources en eau. Pour cela, la géologie est importante pour le domaine de l'hydraulique.

III.2.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 (20L/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. [07]

III.2.1.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'emménagement ne sera déterminé qu'à partir des essais de débits. [14]

III.2.2. Les cartes piézométriques

- ✓ Les cartes en courbes constituent la synthèse de l'étude hydrogéologique, elles schématisent la fonction du réservoir le comportement hydrodynamique de l'aquifère, avec la configuration des conditions aux limites. [15]

III.2.3. Inventaire des points d'eau

La piézométrie joue un rôle déterminant quant à la connaissance des écoulements souterrains, elle permet également de connaître et de fixer les conditions aux limites d'une nappe. Pour arriver à cerner les problèmes posés dans la zone d'étude, nous avons effectué : une campagne piézométrique en Décembre 2015 comparé a une autre en Mai 2012. [4]

III.2.4. Etude piézométrique

Afin d'étudier le comportement de la nappe superficielle du Quaternaire de la plaine de Boussaâda, on a effectué deux campagnes de mesures.

Les niveaux piézométriques mesurés ont permis de tracer :

- ✓ Une carte piézométrique de mois de Mai 2012
- ✓ Une carte piézométrique de mois de Décembre 2015

L'établissement des cartes piézométriques s'est basé sur le traitement des données par le logiciel Mapper global15 et surfer8.

III.2.5. Interprétation des cartes piézométriques

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. [04]

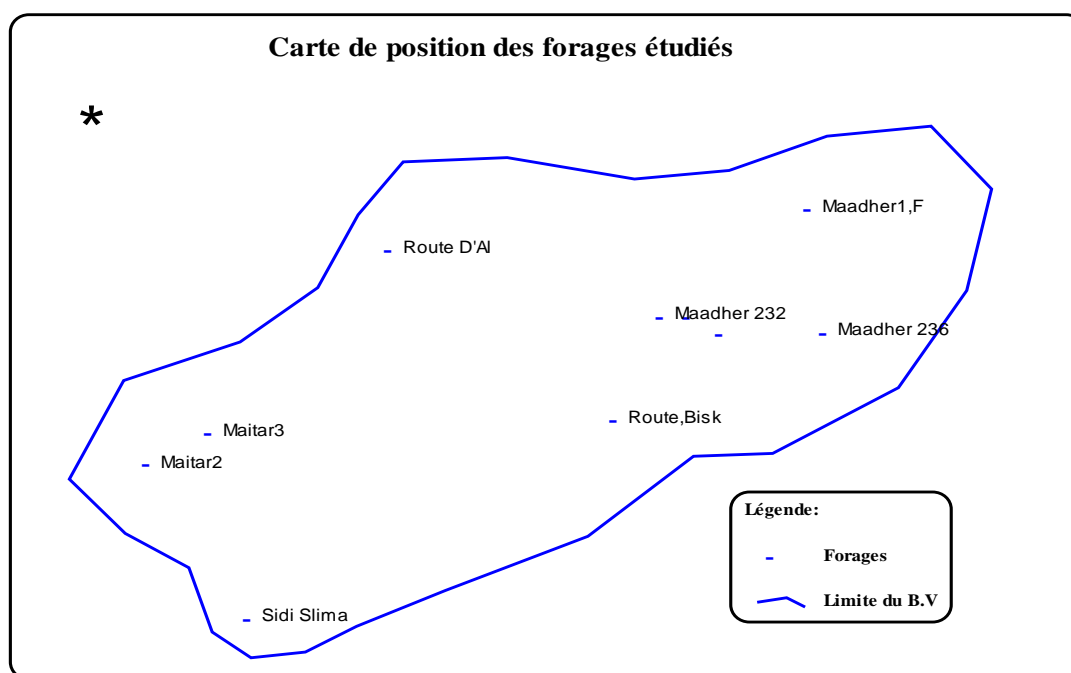


Figure.III. 1. Carte de position des forages étudié 2015

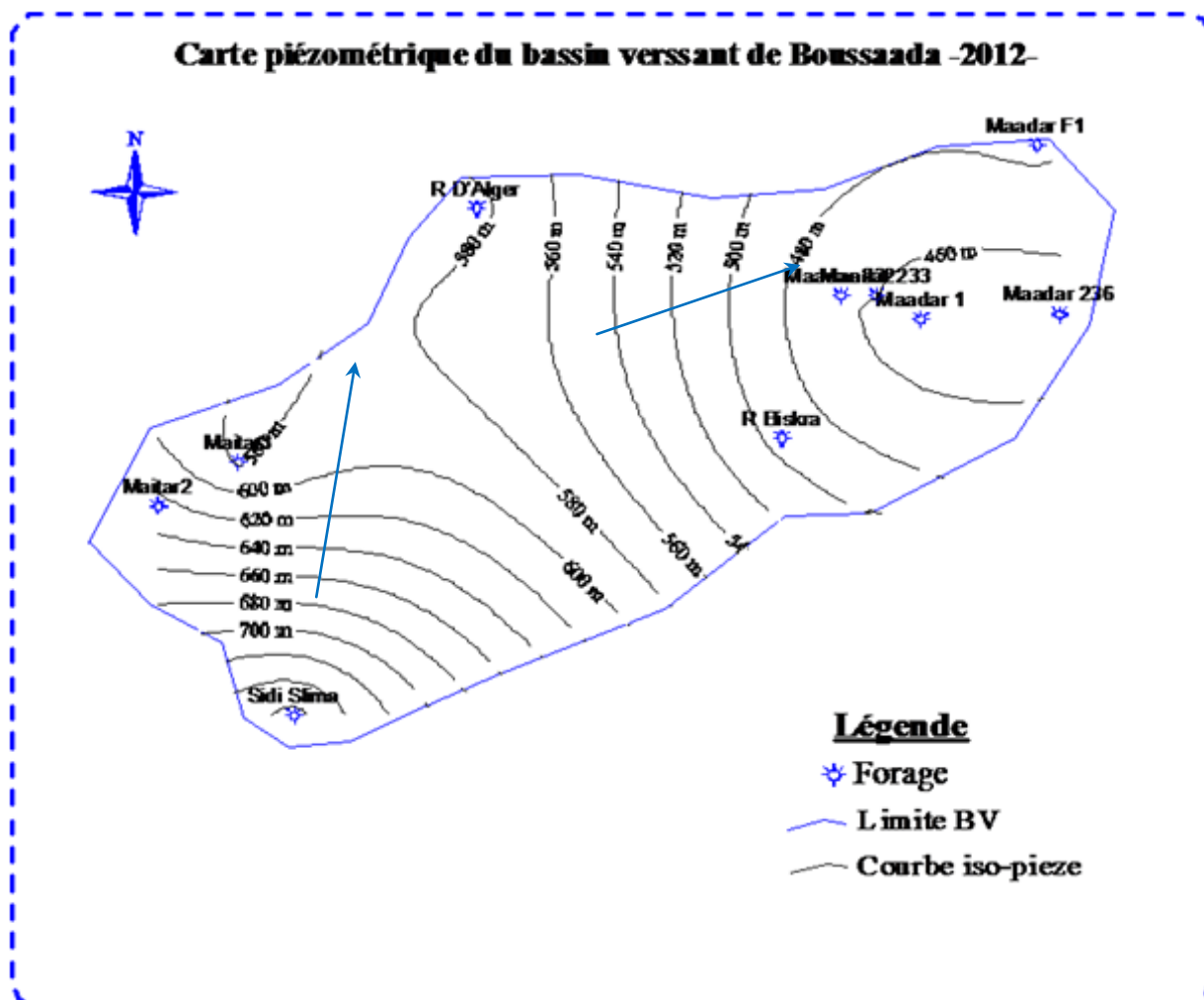


Figure.III. 2.la Carte piézométrique du B.V de Boussaada 2012

La carte peizométrique étudié pour période Mai 2012 présnte deux directions majors de l'écoulement souterraine :la première zone (SW) et l'écoulement orienté suivant la direction (SW – N) vers le centre de la zone d'étude (depression Maitar). La deuxième zone (NE) l'écoulement de direction (W-E) du centre vers la dépression de chott el Hodna.

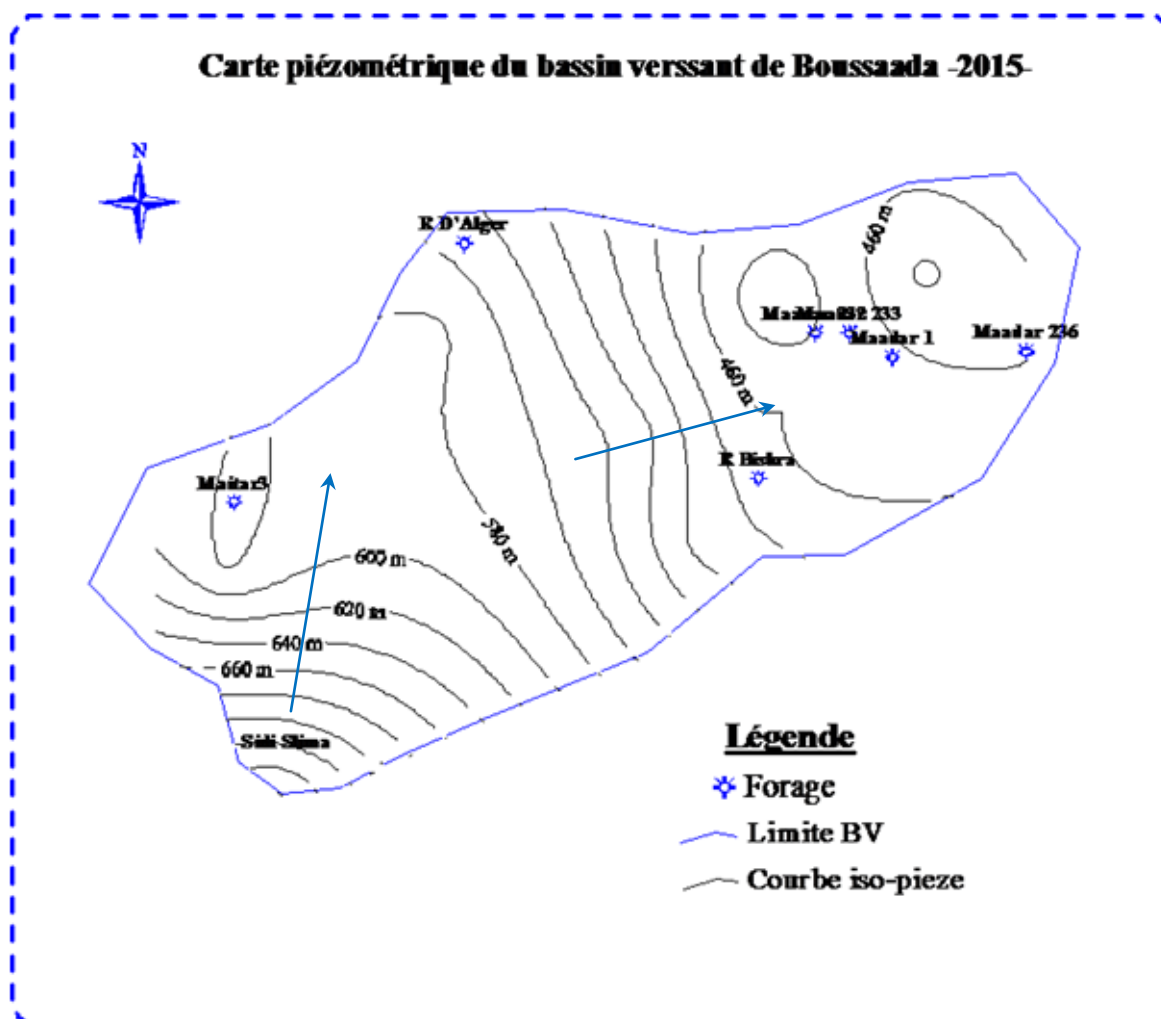


Figure.III.3.la Carte piézométrique du B.V de Boussaada 2015

On constate que la carte piézométrique pour la période 2015 présente le même comportement physique pour l'écoulement et orientation.

III.3.Conclusion

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

- Zone (SW) :
 - L'écoulement est de (SW-N) vers la dépression de Maiter et de (SW-NE) vers le Centre de la zone d'étude.
- Zone (NE) :
 - L'écoulement est de Centre de la zone d'étude vers la dépression de Maadher (C-Est) et de direction (W-E).

Chapitre IV :

Hydrochimie

Chapitre IV : Hydrochimie

IV.1. Introduction

L'eau de pluie, au cours de son infiltration dans le sol et le sous-sol, se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent la nature géologique des aquifères réservoirs. Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction:

- ✓ De la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration.
- ✓ Du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol.
- ✓ Du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.
- ✓ On voit l'importance des minéraux solubles des roches et de la perméabilité de l'aquifère dans la minéralisation de l'eau.
- ✓ Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches: l'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydro-chimique.
- ✓ Dans les réservoirs calcaires, les eaux sont dures, moyennement à fortement minéralisées en sels de calcium et magnésium; elles entartrent les conduites. C'est le cas des eaux de la nappe de la craie. Dans les réseaux karstiques, l'eau peut se charger de particules argileuses en suspension au cours des fortes pluies.

Afin de déterminer le chimisme et la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda, nous a avons procédé à une étude analytique par des méthodes d'analyses statistiques multivariées, telles que l'analyse de la composante principale (ACP) et l'analyse de la classification ascendante hiérarchique (CAH).

Cette approche d'analyse et d'interprétation a été effectuée sur des analyses chimiques de 10 échantillons prélevés des forages de la région pendant deux périodes. [16]

IV.2. Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Dix(10) échantillons prélevés au niveau de 10 forages (Compagne Décembre 2015) font l’objet d’une étude de la qualité des eaux souterraines de la région de Boussaâda. Les résultats d’analyse de cette compagne sont comparés à celle de Mai 2012 (A. Benrabia).

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

IV.2.1.Représentation graphique des paramètres physiques.

A. Potentiel hydrogène pH

Le potentiel hydrogène (pH) est une mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes H⁺ en solution, Le pH d’une solution est le logarithme décimal négatif de l’activité des ions hydrogènes H⁺ : $\text{pH} = -\log_{10} (\text{H}^+)$. Le pH mesure l’acidité ou la basicité d’une solution. Ainsi, dans un milieu aqueux à 25 °C :

- Une solution de pH = 7 est dite neutre ;
- Une solution de pH < 7 est dite acide ; plus son pH s'éloigne de 7 (diminue) et plus elle est acide ;
- Une solution de pH > 7 est dite basique ; plus son pH s'éloigne de 7 (augmente) et plus elle est basique.

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	6.32	6.09	7.28	2.15	6.5 < pH < 8.5
2015	6,61	6,79	7,19	0 ,22	

Tableau IV. 1.Statistiques de pH des eaux souterraines de la zone d’étude

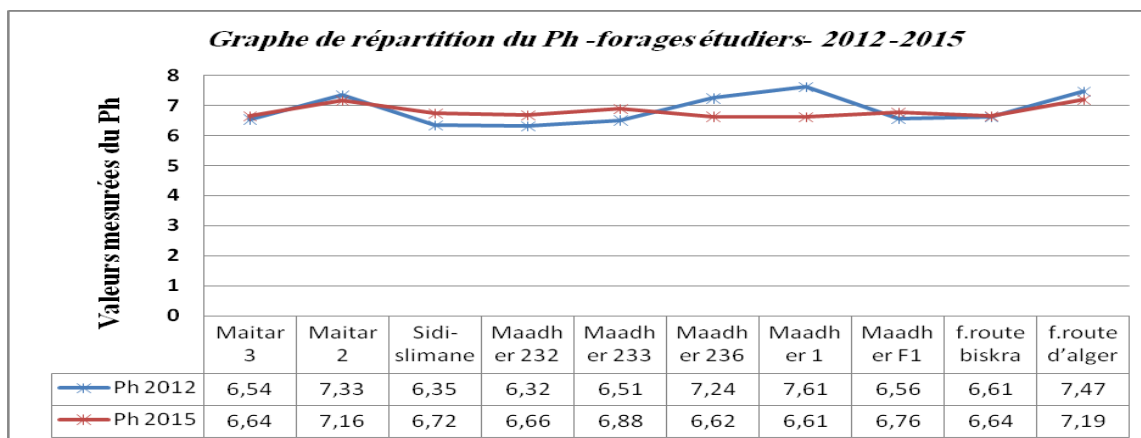


Figure. IV.1.Répartition de pH des eaux souterraines pour les périodes

De (Mai 2012 et Décembre2015)

L'examen des valeurs de pH testé durant les campagnes 2012 et 2015 présentées dans le tableau (IV.01) montrent que les valeurs moyennes, minimales et maximales ne dépassent pas la norme de potabilité fixée par l'OMS.

B. la conductivité électrique (CE) :

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	660	1949,222	2630	562,342	CE ≤ 1500 µs/cm
2015	737	1854,5	2190	424,707	

Tableau IV. 2.Statistiques de C.E des eaux souterraines de la zone d'étude

Le tableau précédent (IV. 2) présente des valeurs de la conductivité électrique moyennes et maximales qui dépassent la norme de l'OMS et sous la norme Algérienne tolérée (2800 µs/cm) en deux campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015).

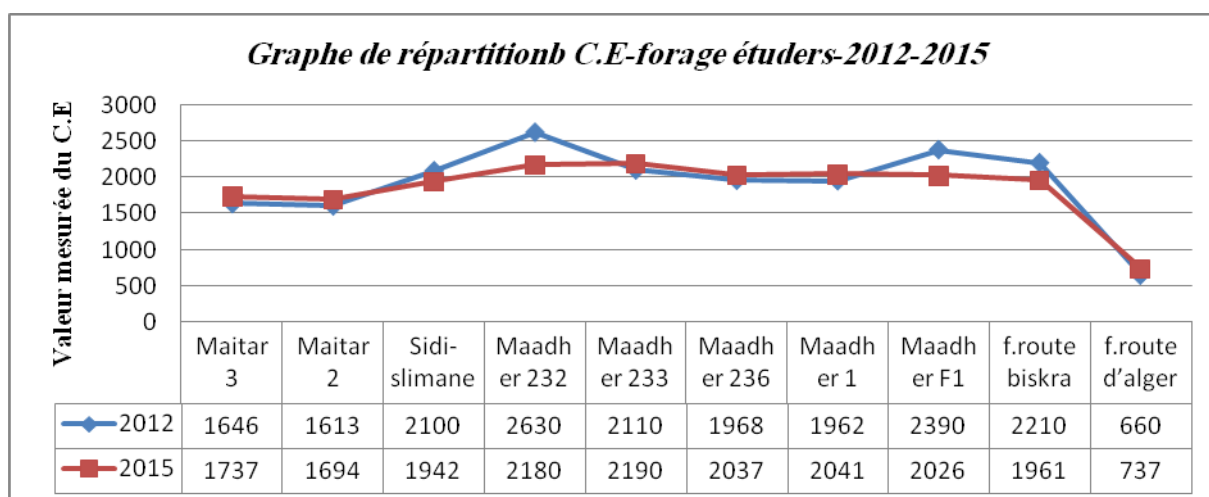


Figure. IV.2.Répartition de CE des eaux souterraines pour les périodes (Mai 2012 et Décembre 2015)

Le graphe montre que presque tous les points d'eau pendant les deux campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015) ont une légère variation des valeurs des concentrations de la conductivité entre eux.

C. La Température

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	14.5	19.05	21.8	2.60	T ≤ 25°c
2015	12	17.94	23	3.577	

Tableau IV. 3. Statistiques de Température des eaux souterraine de la zone d'étude

Le tableau précédent (IV.3) présente des valeurs de la température moyennes et maximales qui ne dépassent pas la norme en deux campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015).

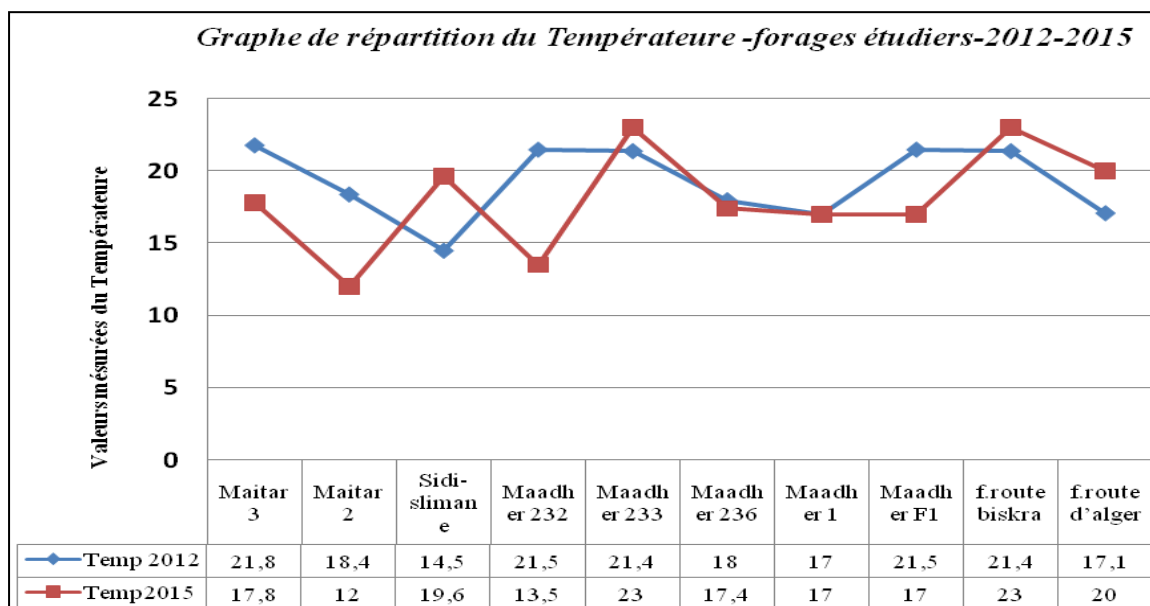


Figure. IV.3. Répartition de la Température des eaux souterraines pour les campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015)

IV.3. Etablissement des cartes hydro-chimiques

IV.3.1. Carte iso-teneur en Potentiel hydrogène (Ph)

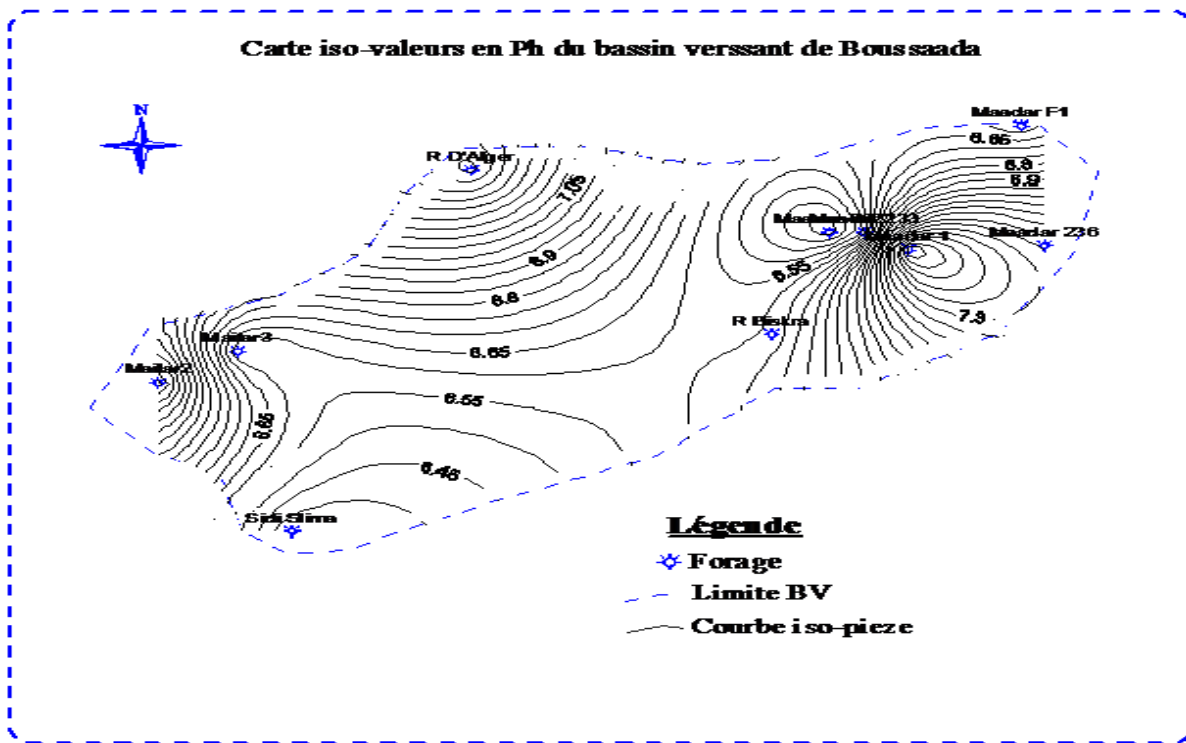


Figure. IV.4. Carte iso-teneur en Potentiel hydrogène (Ph) 2012

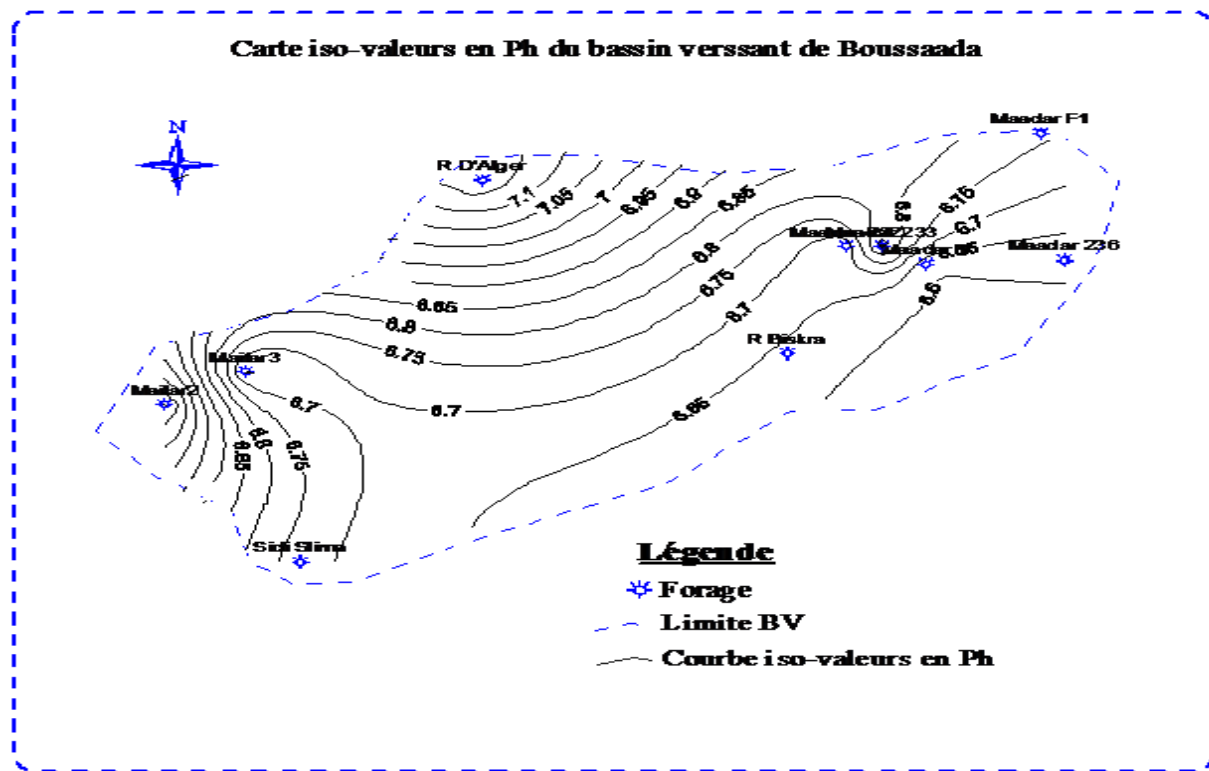


Figure. IV.5. Carte iso-teneur en Potentiel hydrogène (Ph) 2015

La carte iso – valeur du pH pour la campagne de Décembre 2015 (Fig.IV. 5) présente une homogénéité très importante du pH pour les eaux des forages testés; par contre la carte de la campagne de Mai 2012(Fig.IV.2) présente des exceptions dans la distribution des valeurs testées. Et L'analyse des cartes des deux périodes montrent que les valeurs élevées du pH se trouvent au centre de la zone d'étude, mais elles restent dans l'intervalle de la norme l'OMS.

IV.3.2. Carte iso-valeurs de conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique reflète la minéralisation totale des eaux. La représentation spatiale des valeurs de la conductivité sur l'aire d'étude est présentée dans les figures (IV.6 et IV. 7).

L'analyse des cartes des deux campagnes donnent presque le même comportement et montrent une augmentation dans la direction N-S et les valeurs élevées se trouvent au niveau des forages (Sidi-Slimen, R.Biskara) et cela probablement à cause de l'augmentation des éléments minéraux solubles a partir des roches de ces endroits (Dj. Bateun et Dj. Kardada), la valeur maximale est enregistrée à la partie Nord-est de la zone d'étude (El-Maadher) possiblement influencée par la zone de dépression (Lac salé- Chott El Hodna-).

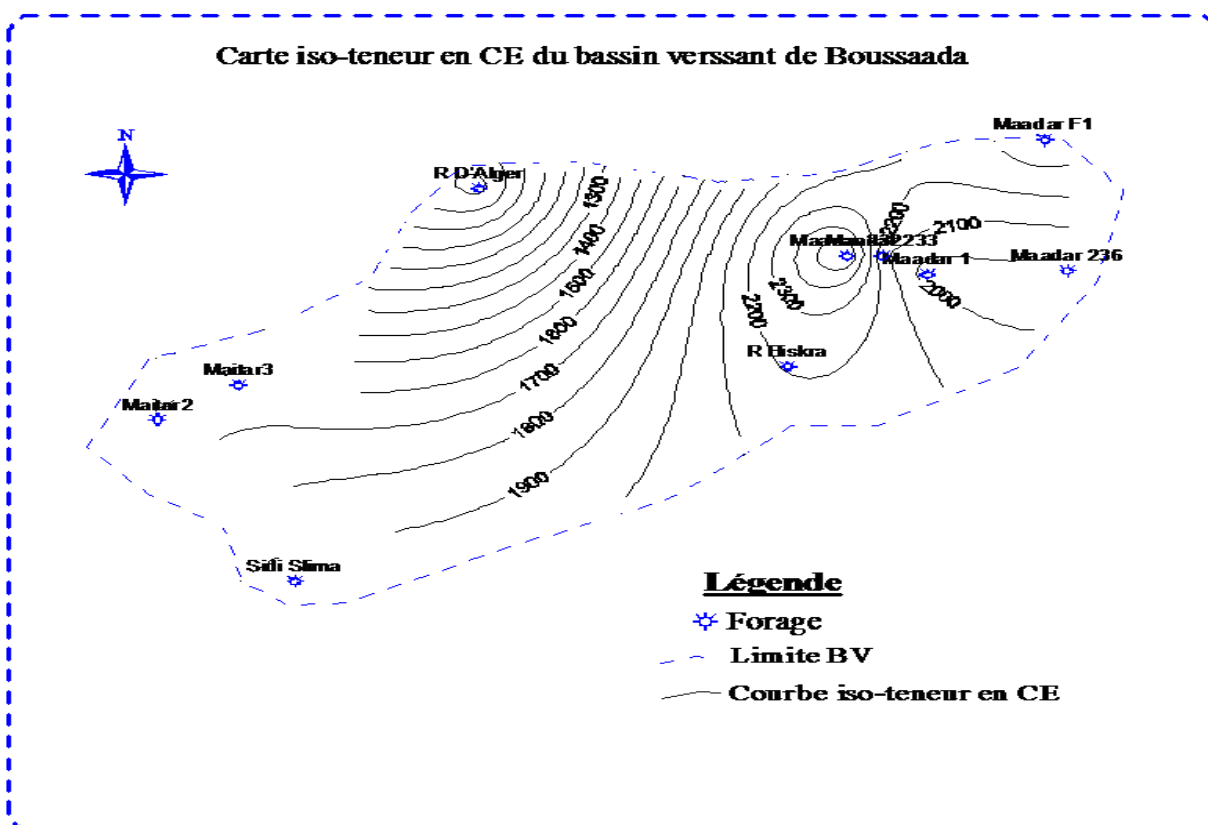


Figure. IV.6.Carte iso-valeur de conductivité électrique CE (μ S/cm) Mai 2012

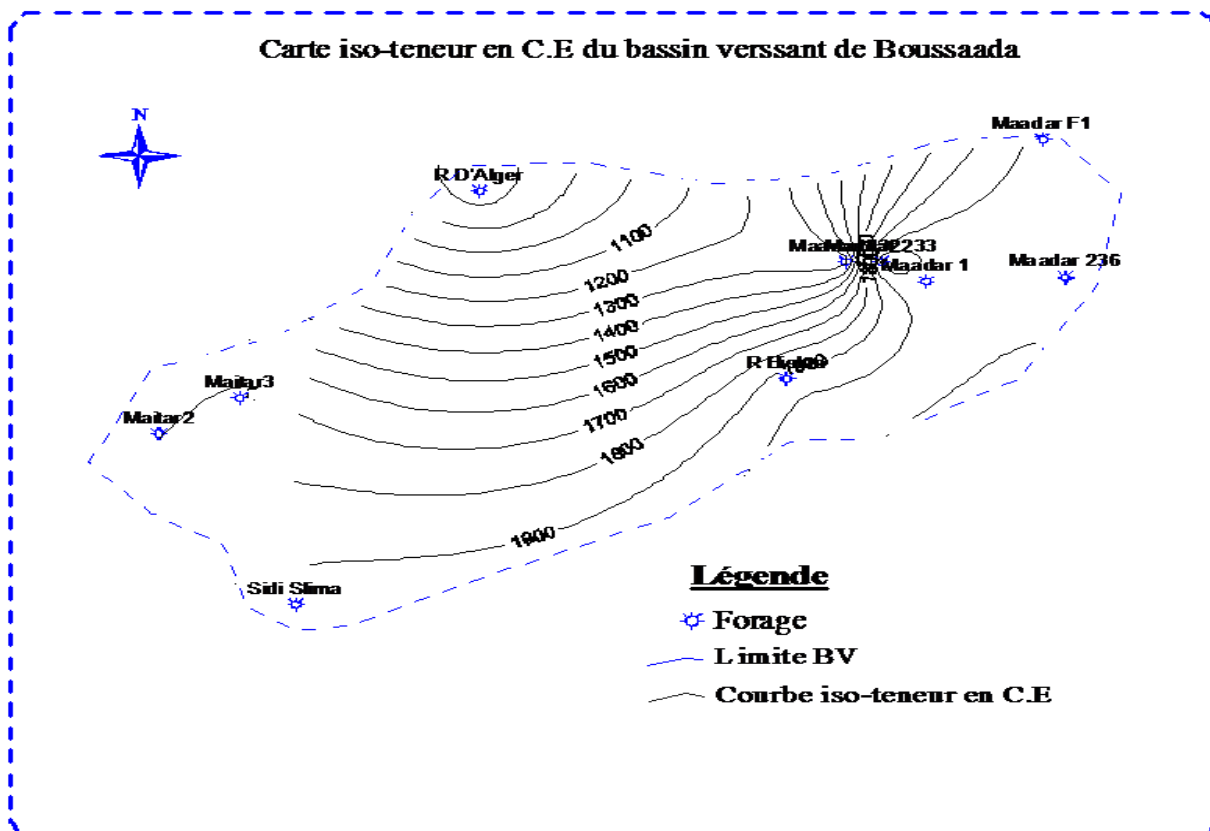


Figure. IV.7. Carte iso-valeur de conductivité électrique CE (μ S/cm) décembre 2015

IV.3.3. Carte iso-teneur en calcium (Ca^{+2} mg/l)

Le Calcium (Ca^{++})

Les sels de calcium sont très fréquents dans les eaux naturelles. La teneur en calcium dépend 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.

L'examen du tableau (IV.4) suivant montre des valeurs des teneurs en calcium qui dépassent la norme en deux compagnes (Mai 2012 et Décembre 2015).

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS) 75-200 (mg/l)
	2012	92	220.70	272	
2015	157	190,27	224	19,06	

Tableau IV.4. Statistique du calcium dans les eaux souterraines de Boussaâda 2015

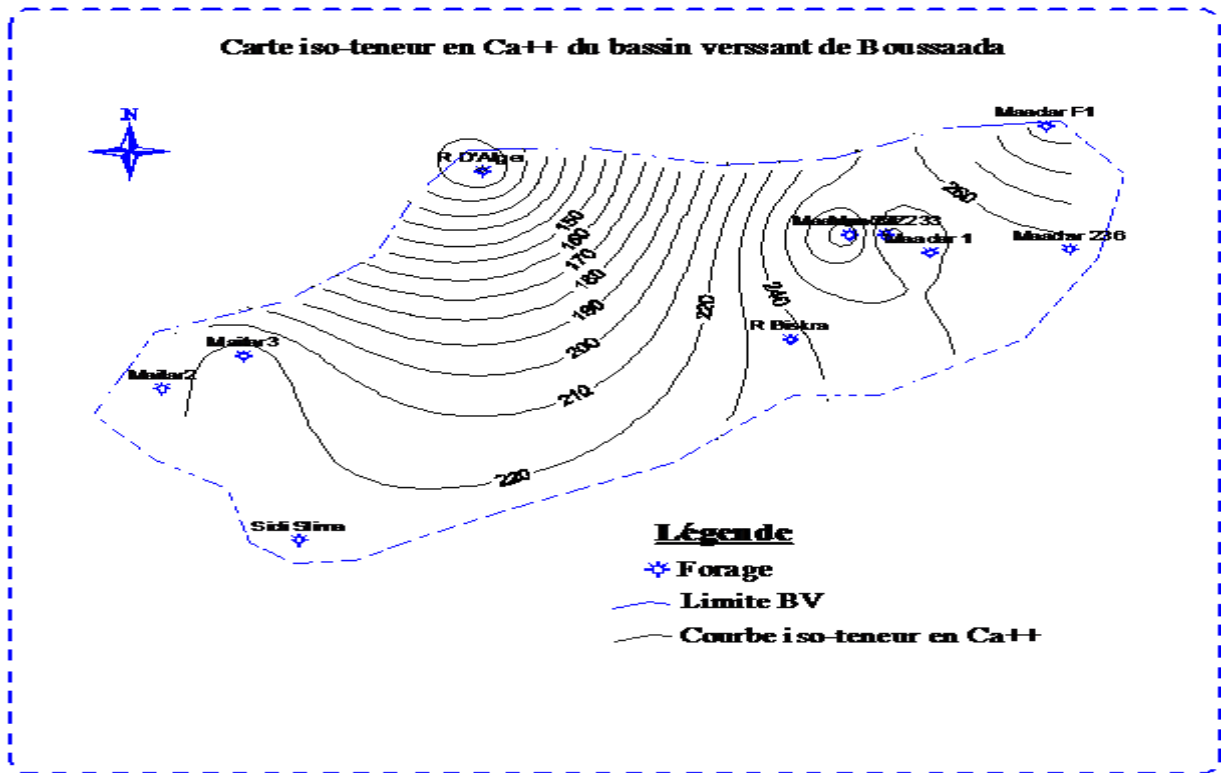


Figure. IV.8. Carte iso-teneur en calcium (Ca⁺² en mg/l) 2012

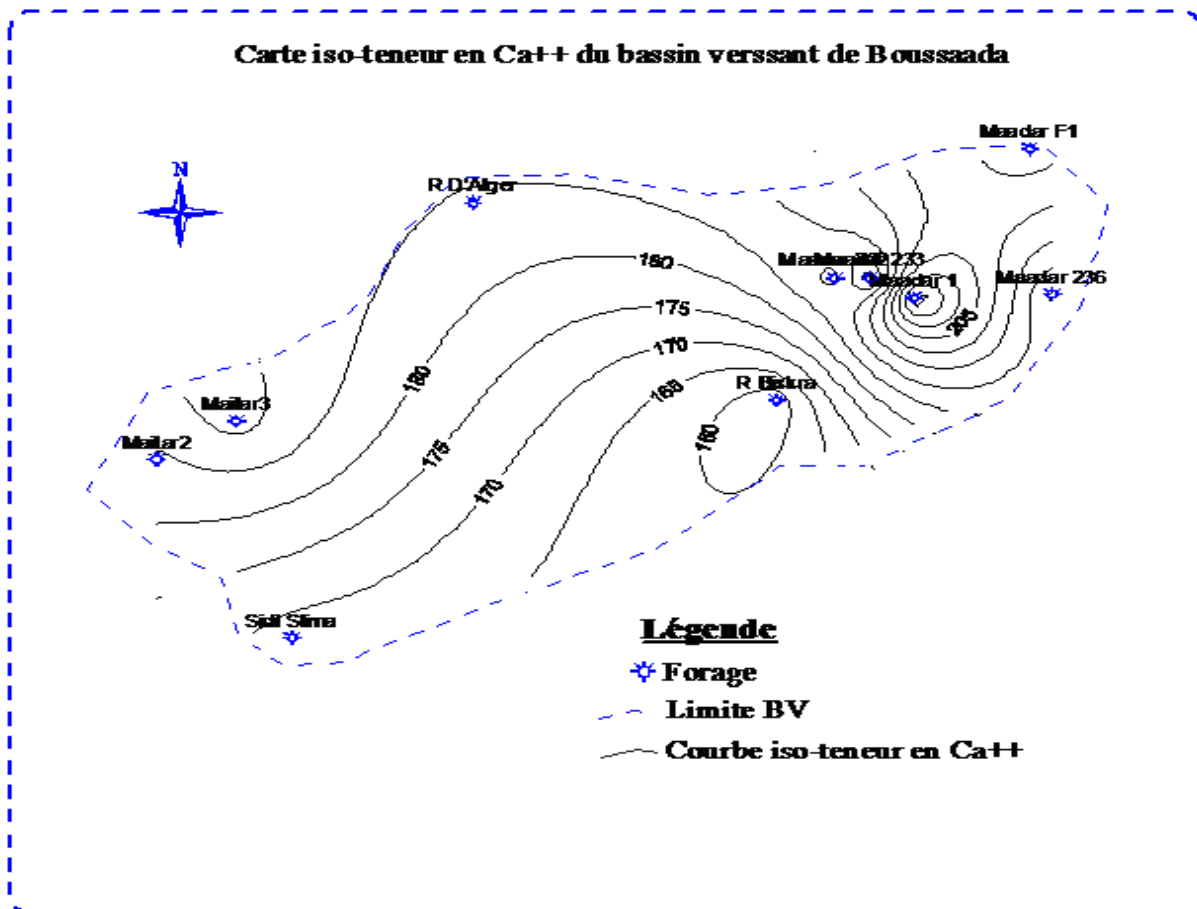


Figure. IV.9. Carte iso-teneur en calcium (Ca⁺² en mg/l) 2015

L'examen des cartes des deux campagnes (Figures .IV.8 et IV.9) montrent que pour la période (Mai 2012) les concentrations en Ca^{++} présentent des valeurs supérieures à la norme de potabilité (200 mg/l) sauf en deux points (R. Alger et Madher1) d'origine possible de la dissolution des formations minérales et des eaux d'irrigation et usées (terrains agricoles, oueds (Boussaâda et Maitar)).

Par contre la carte de la période Décembre 2015 présente les valeurs les plus élevées et qui dépassent la norme au niveau des forages (R Biskra et Maadher 236). Cette régression s'explique peut être de la période des hautes eaux et la dilution des éléments minéraux dans le reste des points d'eau.

IV.3.4. Carte iso-teneur en magnésium (Mg^{+2} mg/l)

Le Magnésium (Mg^{2+})

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

Le tableau (IV.5) suivant montre que les valeurs des teneurs en magnésium sont dans la norme pour la Compagne (Mai 2012) et un seul point d'eau dont la concentration est hors l'intervalle de l'O.M.S en Compagne (Décembre 2015).

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	36	93.40	142	31.96	150 mg /l
2015	107	127,10	155	16.54	

Tableau IV. 5.Statistiques de Magnésium dans les eaux souterraines de Boussaâda 2015

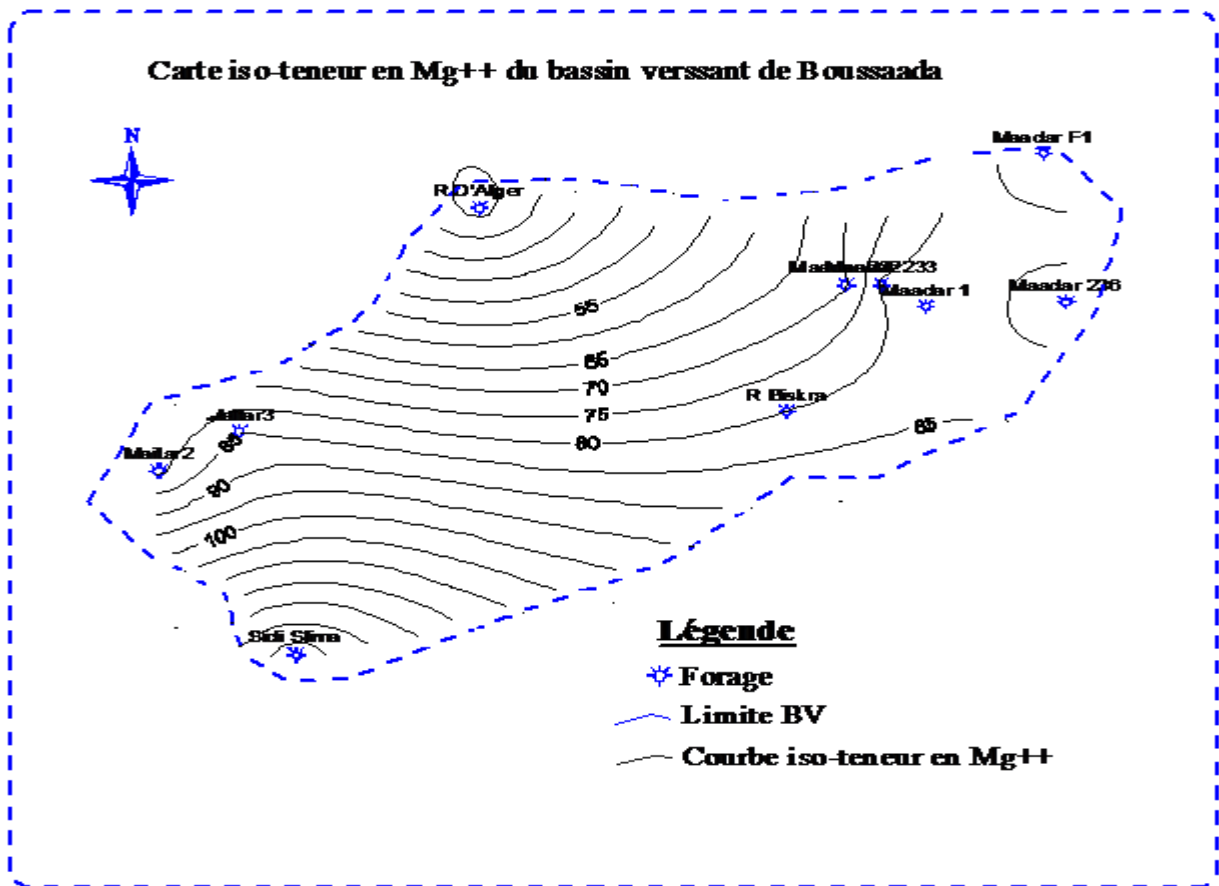


Figure. IV.10. Carte iso-teneur en magnésium (Mg²⁺ mg/l) 2012

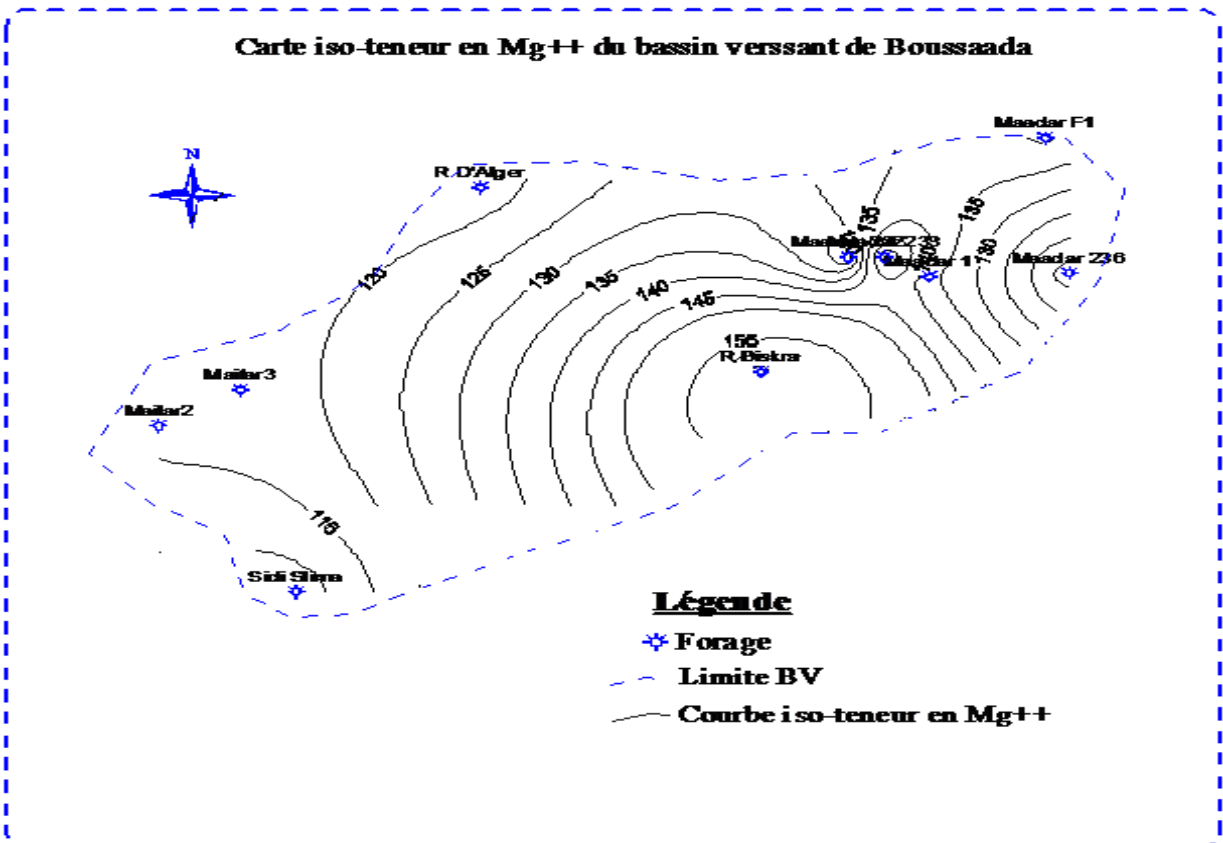


Figure. IV.11. Carte iso-teneur en magnésium (Mg²⁺ mg/l) 2015

La comparaison entre les cartes iso-teneurs en magnésium pour les Compagnes (Mai 2012- Décembre 2015) montre que la compagne (Décembre 2015) donne les mêmes observations sauf l'exception du forage (Madher 233) situé à l'Est présente des concentrations élevées hors la norme, dû peut être à la solubilité des roches Silicatées et d'origine calcaire (Dj Kardada).

IV.3.5. Carte iso-teneur en chlorure (Cl⁻ mg/l)

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	139	208.8	294	53.55	200-500 mg/l
2015	77	157	235	51,27	

Tableau IV. 6.Statistique de Chlorure dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015

Les teneurs des Chlorures varient entre 77 à 294 mg/l en deux périodes, dépassent la concentration maximale et sous la concentration maximale admissible de l'OMS.

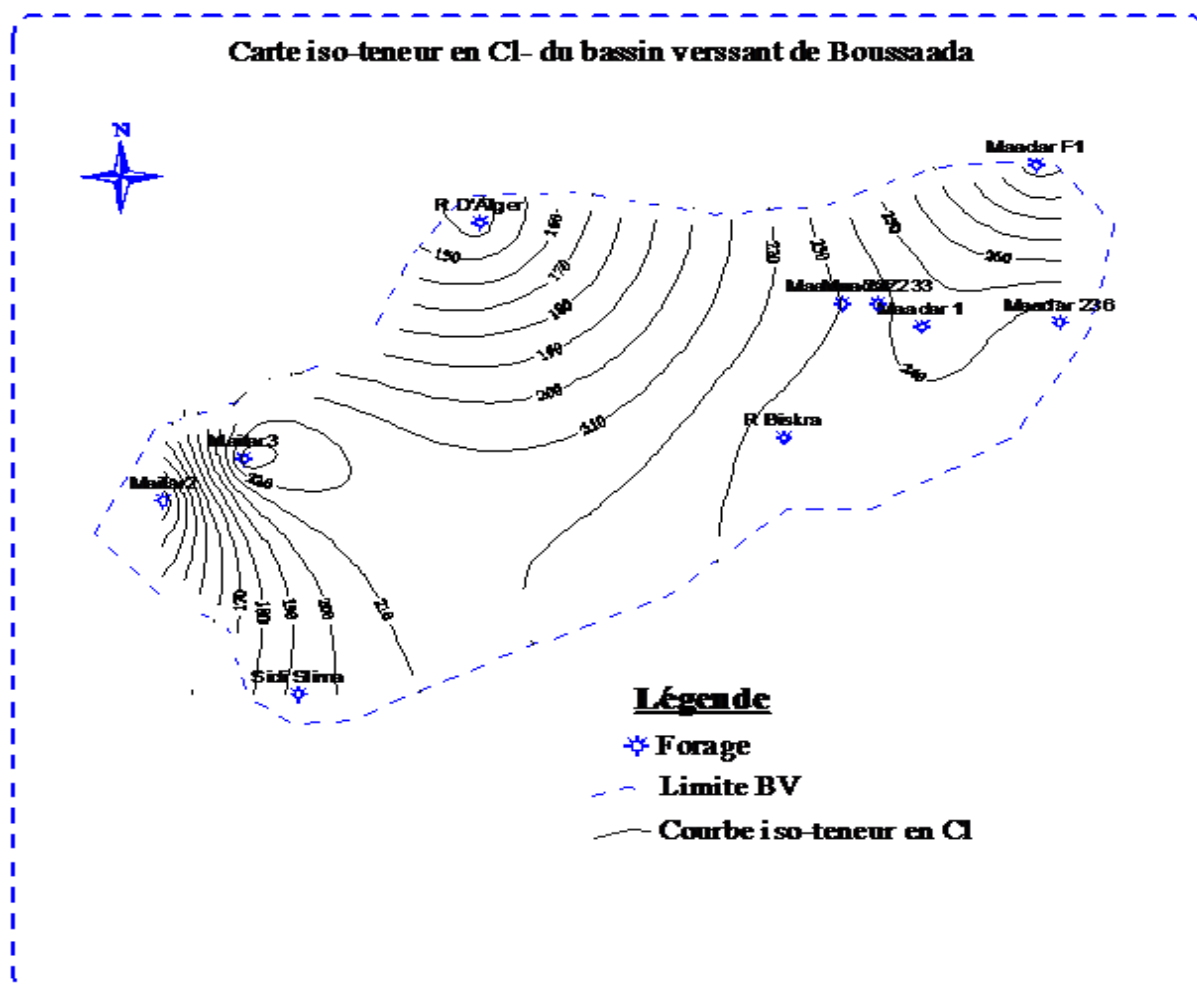


Figure. IV.12.Carte iso-teneur en chlorure (Cl⁻ mg/l) 2012

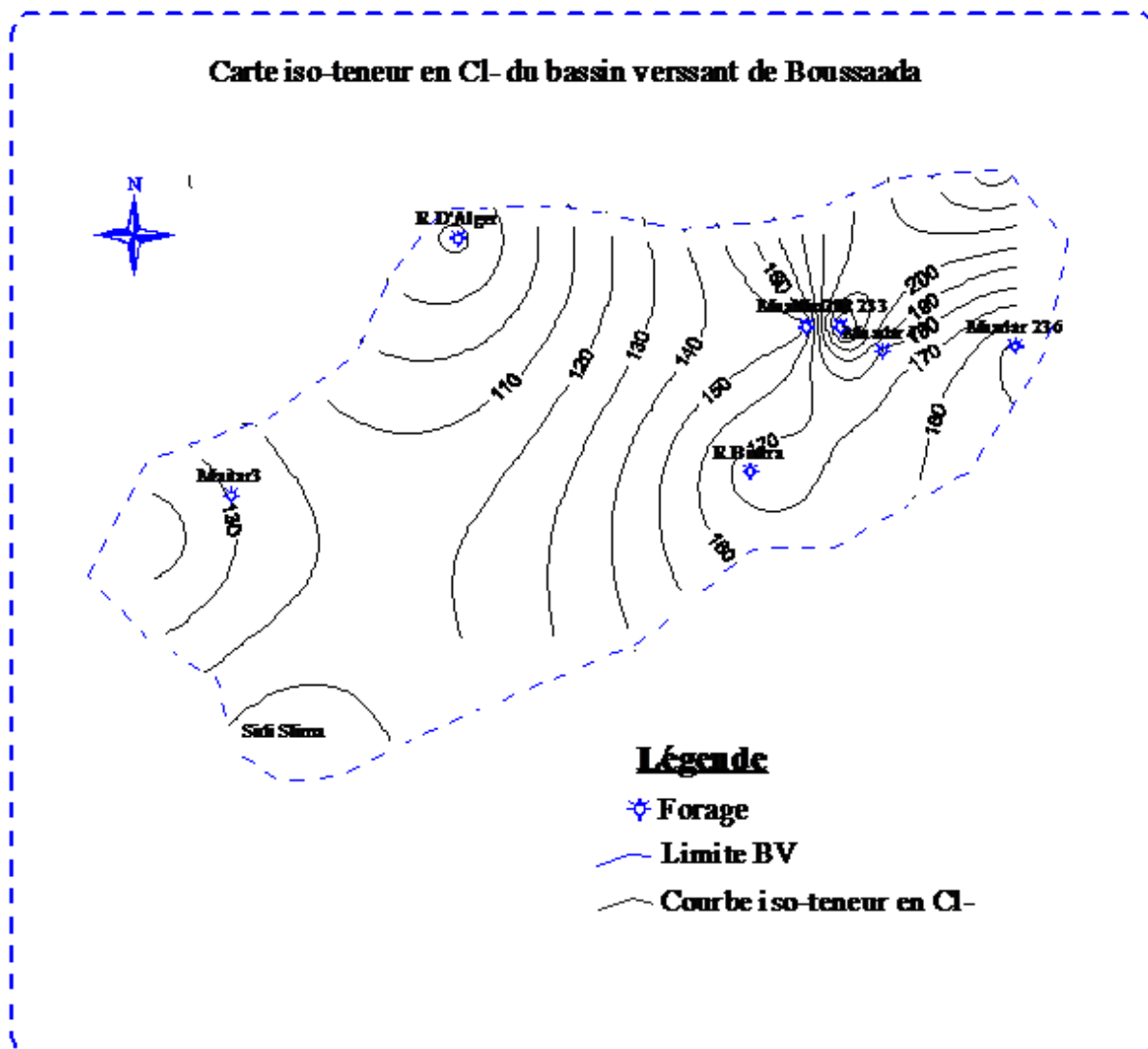


Figure. IV.13. Carte iso-teneur en chlorure (Cl⁻ mg/l) 2015

Les fortes concentrations apparaissent dans la partie Nord-est de la zone d'étude (El-Maadhar) et la partie Sud-est (R.Biskra) sur les deux Compagnes, suite possiblement à la dissolution des formations carbonatés, et lessivage des terrains argileux et les marneux.

IV.3.6. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO₃⁻ mg/l)

Valeurs Périodes	Valeurs				Valeurs normatives (OMS)
	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	
2012	219	310.5	381	56.24	/
2015	220	311	451	72.19	

Tableau IV. 7. Statistique de Bicarbonate dans les eaux souterraine de Boussaada 2015

Le tableau (IV.3) présente les valeurs de la moyenne, minimale et maximale de Bicarbonate testé durant les Campagnes 2012- 2015 et leur comparaison avec les valeurs normatives.

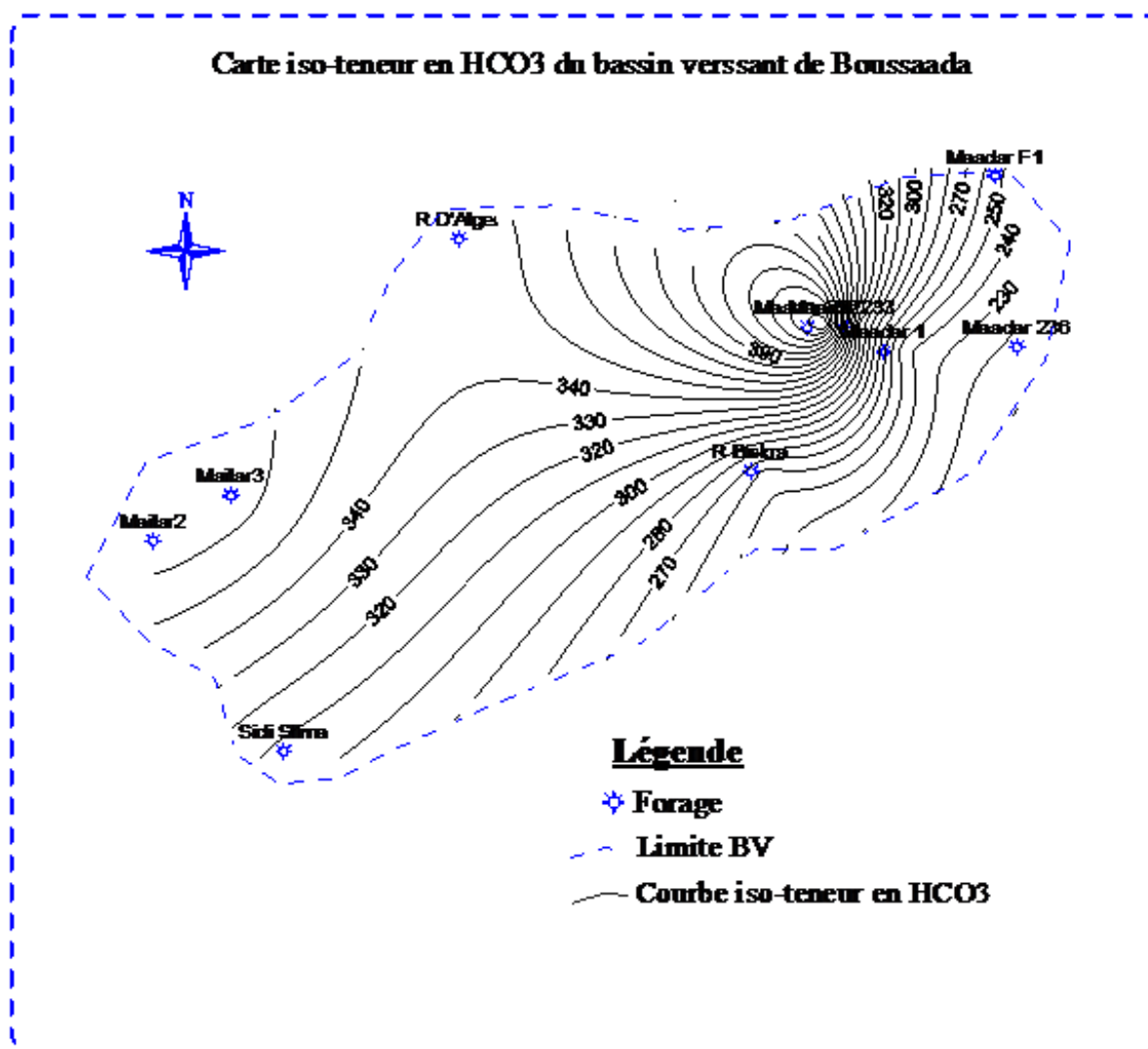


Figure. IV.14. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO₃⁻ mg/l) 2012

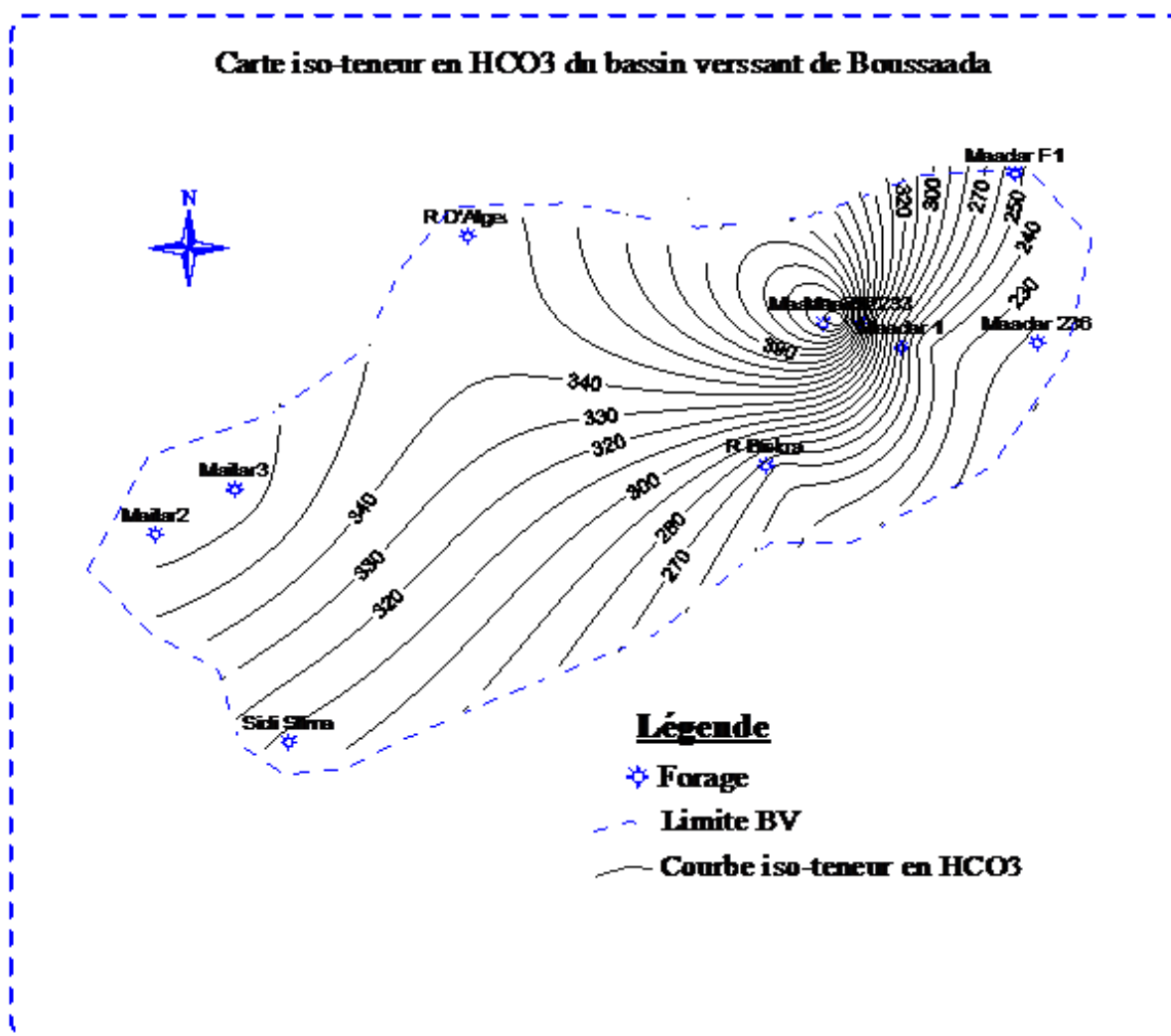


Figure. IV. 15. Carte iso-teneur en bicarbonate (HCO_3^- mg/l) 2015

Les fortes concentrations en bicarbonates sont liées à la présence de formations carbonatées, elles sont représentées par l'Aptien calcaire de la zone d'étude. Les valeurs maximales sont aux environs de 450 mg/l dans la zone d'El-Maadher et durant les deux Compagnes. On remarque alors qu'on est en présence d'un processus de dissolution continu et plus accentué.

IV.3.7. Carte iso-teneur en Sulfate (SO_4^{2-} mg/l)

Le tableau (IV. 8) présente les valeurs de teneurs moyenne et maximale des Sulfates qui dépassent la concentration maximale et la concentration maximale admissible de l'OMS pour les deux Compagnes.

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	312	633.80	1201	290.53	200- 400 mg/l
2015	327	685.90	976	279.80	

Tableau IV. 8. Statistique de sulfaté dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015

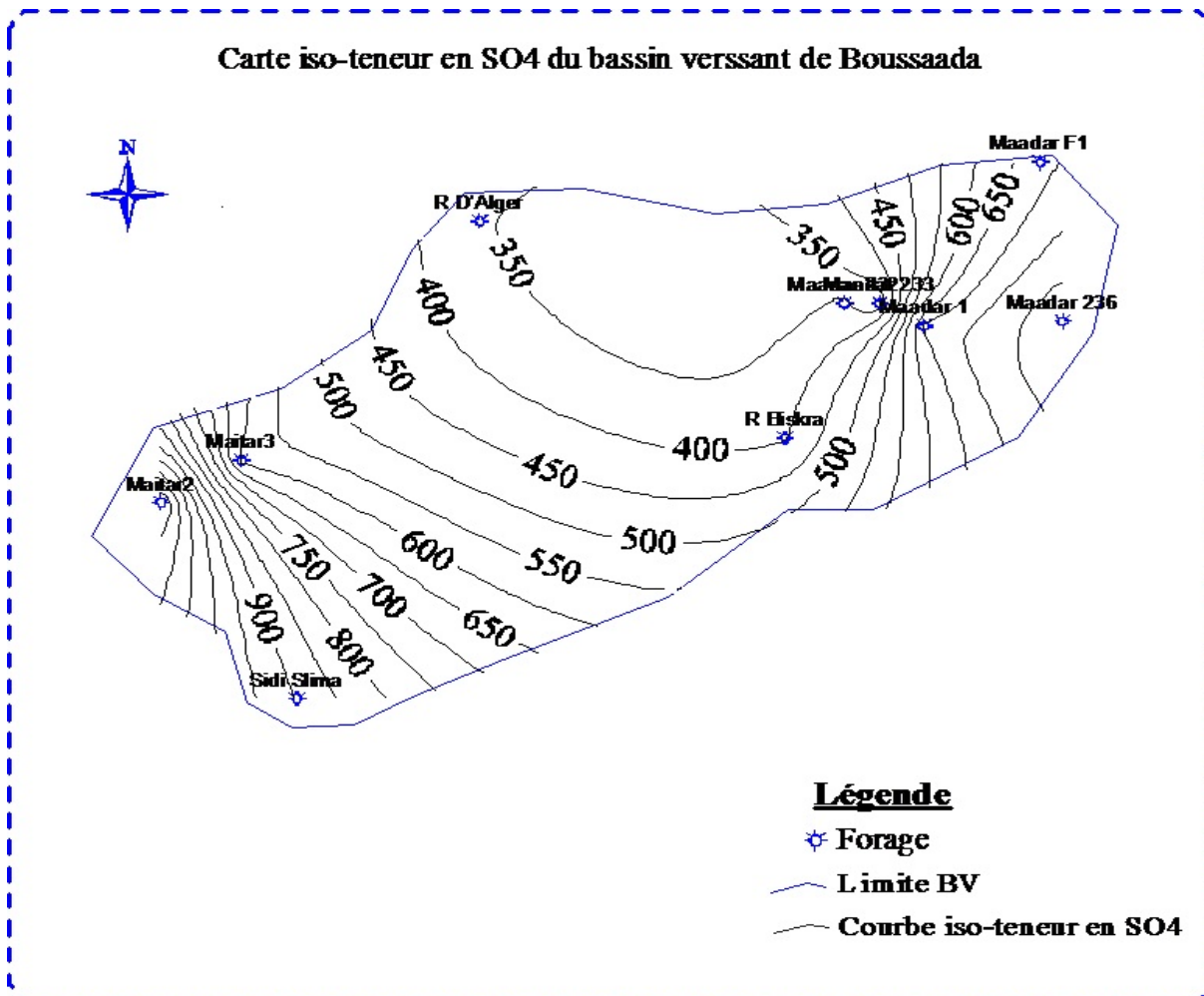


Figure. IV.16. Carte iso-teneur en sulfate SO4 Mai 2012

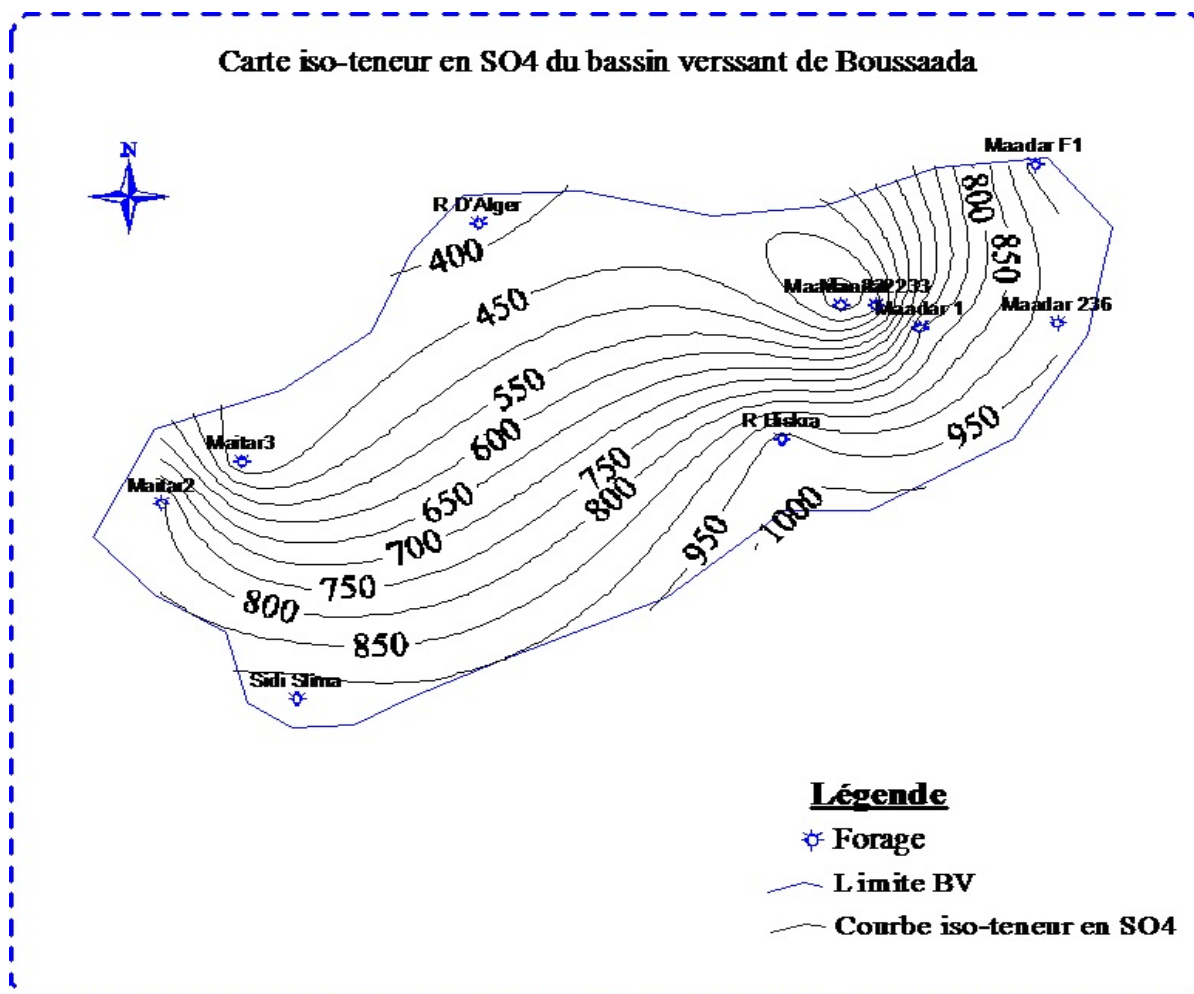


Figure. IV.17. Carte iso-teneur en sulfate SO4 Mai 2015

Les fortes concentrations en sulfaté SO_4 sont localisées au Nord-est (Nord d’El-Maadhar) et Sud-ouest (Maitar) .Elles varient de 312 à 1201 mg/l durant la Compagne de Mai 2012 et avec des valeurs extrêmes de 327 à 976 mg/l durant la Compagnes de Décembre 2015. Ces concentrations sont le résultat de la dissolution des marnes et des argiles appartenant à la série des alternances calcaires et marnes de la zone d’étude ainsi en présence des terrains agricoles d’où l’utilisation des engrais et les fumiers.

IV.3.8. Carte iso-teneur en Nitrate (NO_3^- mg/l)

Le tableau (IV. 9) présente les valeurs de teneurs moyenne et maximale de Nitrate qui dépassent la norme pour les deux Compagnes.

Valeurs Périodes	Min.	Moy.	Max	Ecart-type	Valeurs normatives (OMS)
2012	12	79.2	123	35.70	50 mg/l
2015	18	75,10	150	44,68	

Tableau IV.9.Statistique de Nitrate dans les eaux souterraine de Boussaâda 2015

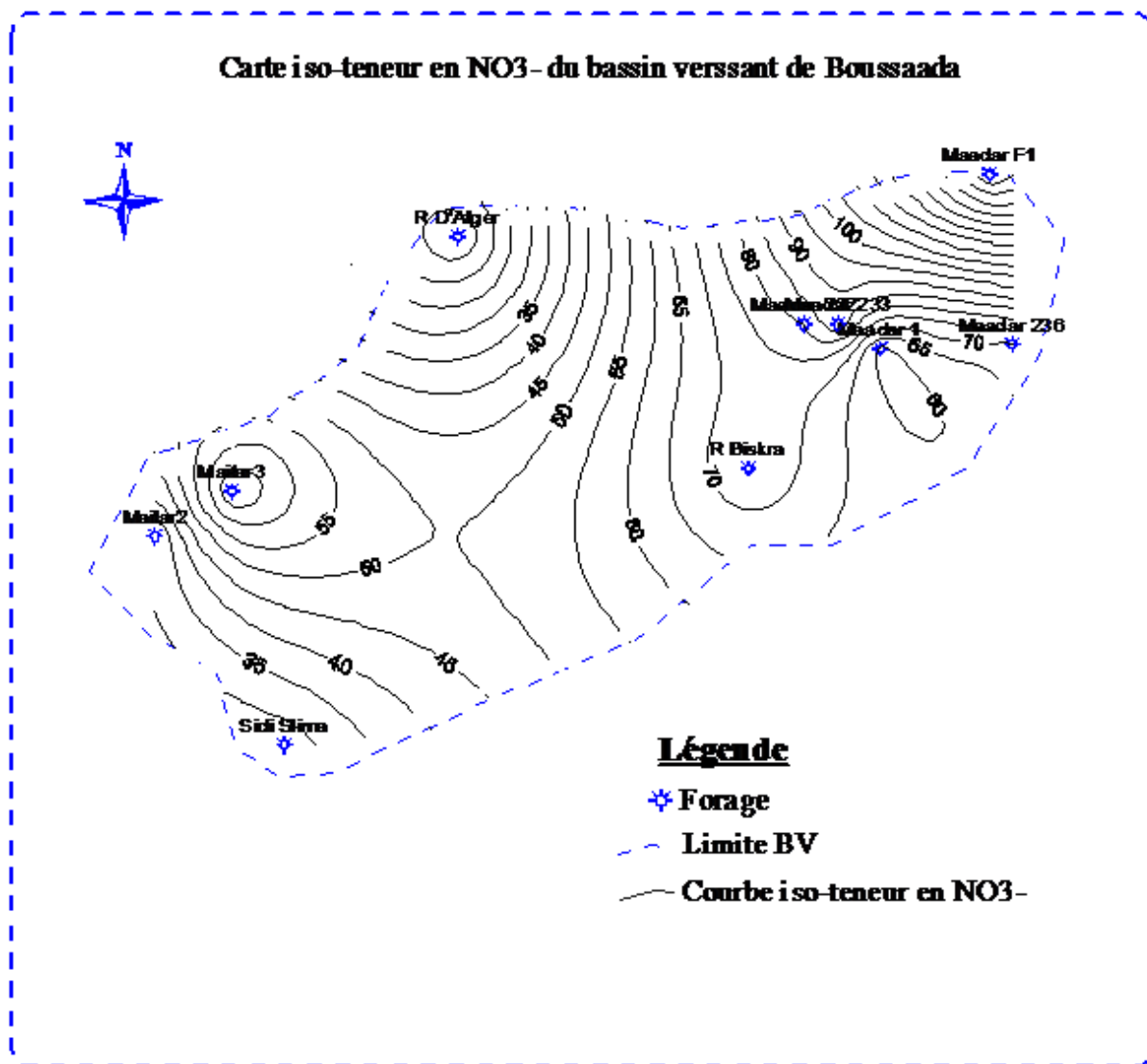


Figure. IV.18. Carte iso-teneur en Nitrate (No₃⁻ mg/l) 2012

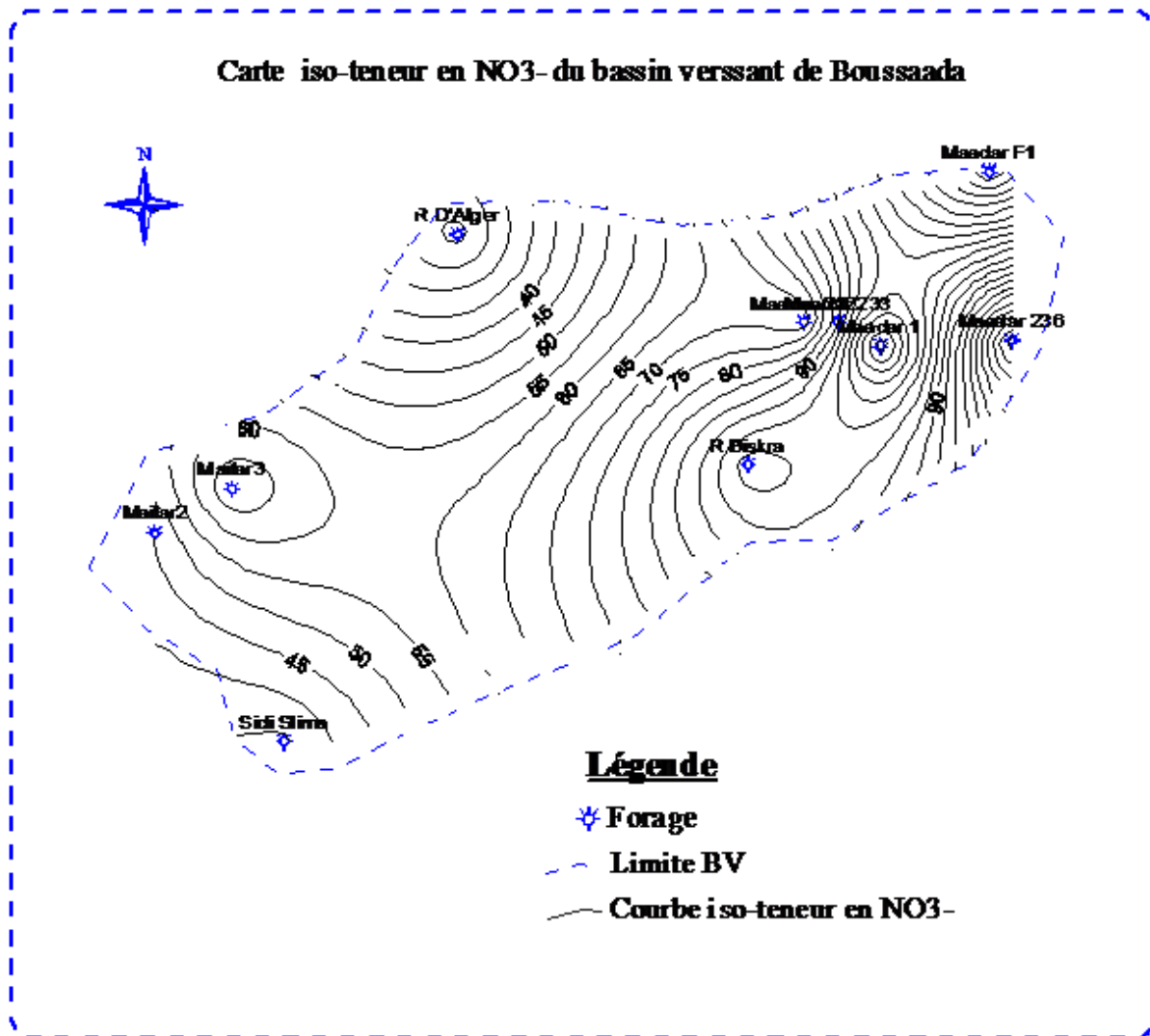


Figure. IV.19. Carte iso-teneur en Nitrate (No₃⁻ mg/l) 2015

On remarque sur les cartes des deux Compagnes une grande concordance soit dans le coté graphique ou les valeurs .Les teneurs élevées des nitrates au N-E sont en liaison avec la répartition des terrains agricoles (El-Maadher) d'où l'utilisation des engrais et aux rejets des eaux usées.

IV.4.Faciès hydro-chimiques

IV.4.1.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. IV. 20 et IV. 21) montrent que la plus part des eaux analysées ont un faciès chimique ; Chloruré sulfaté calcique et magnésien pour les deux Compagnes (Mai 2012 et Décembre 2015).

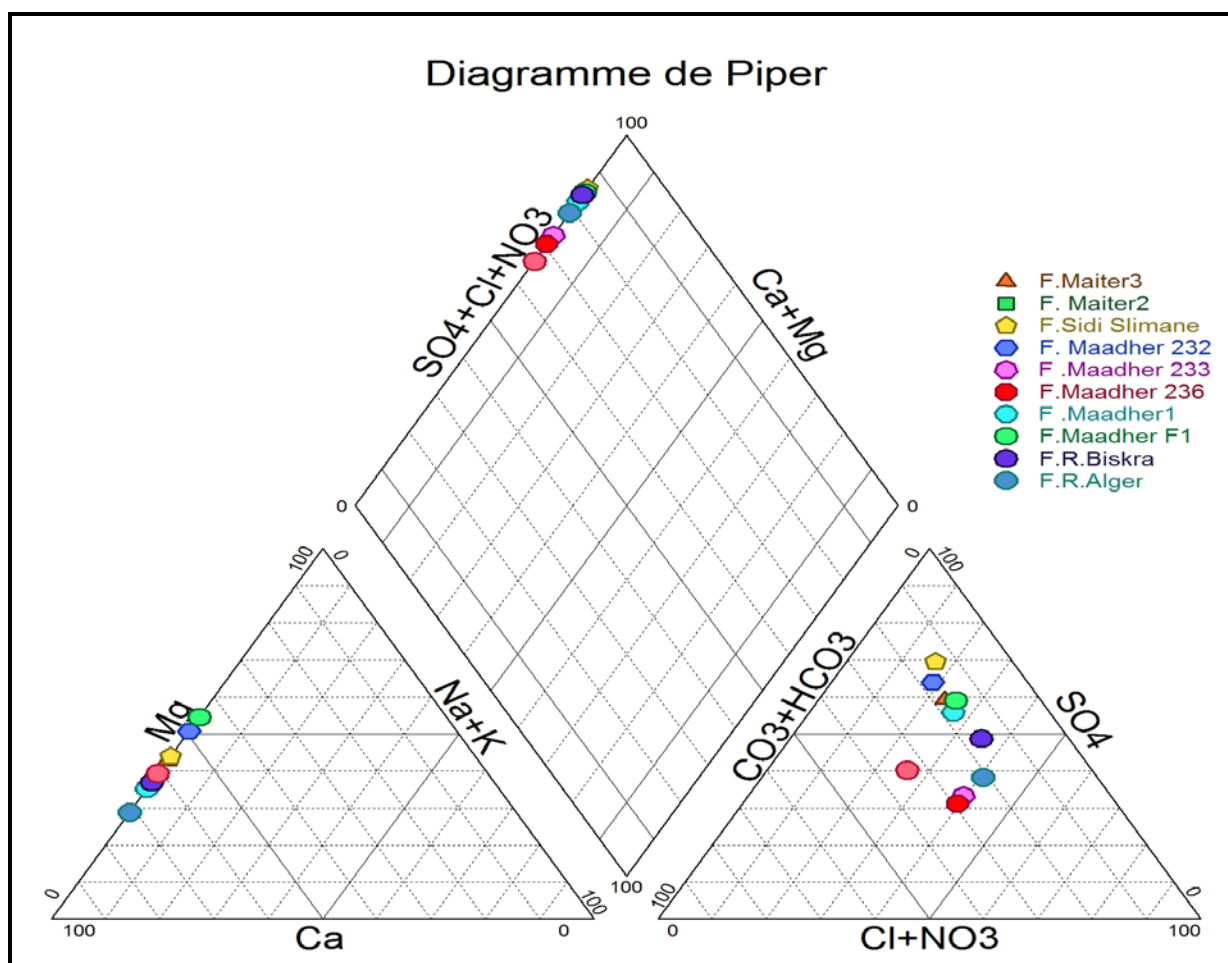


Figure. IV.20.Diagramme de Piper Compagne de (Mai 2012)

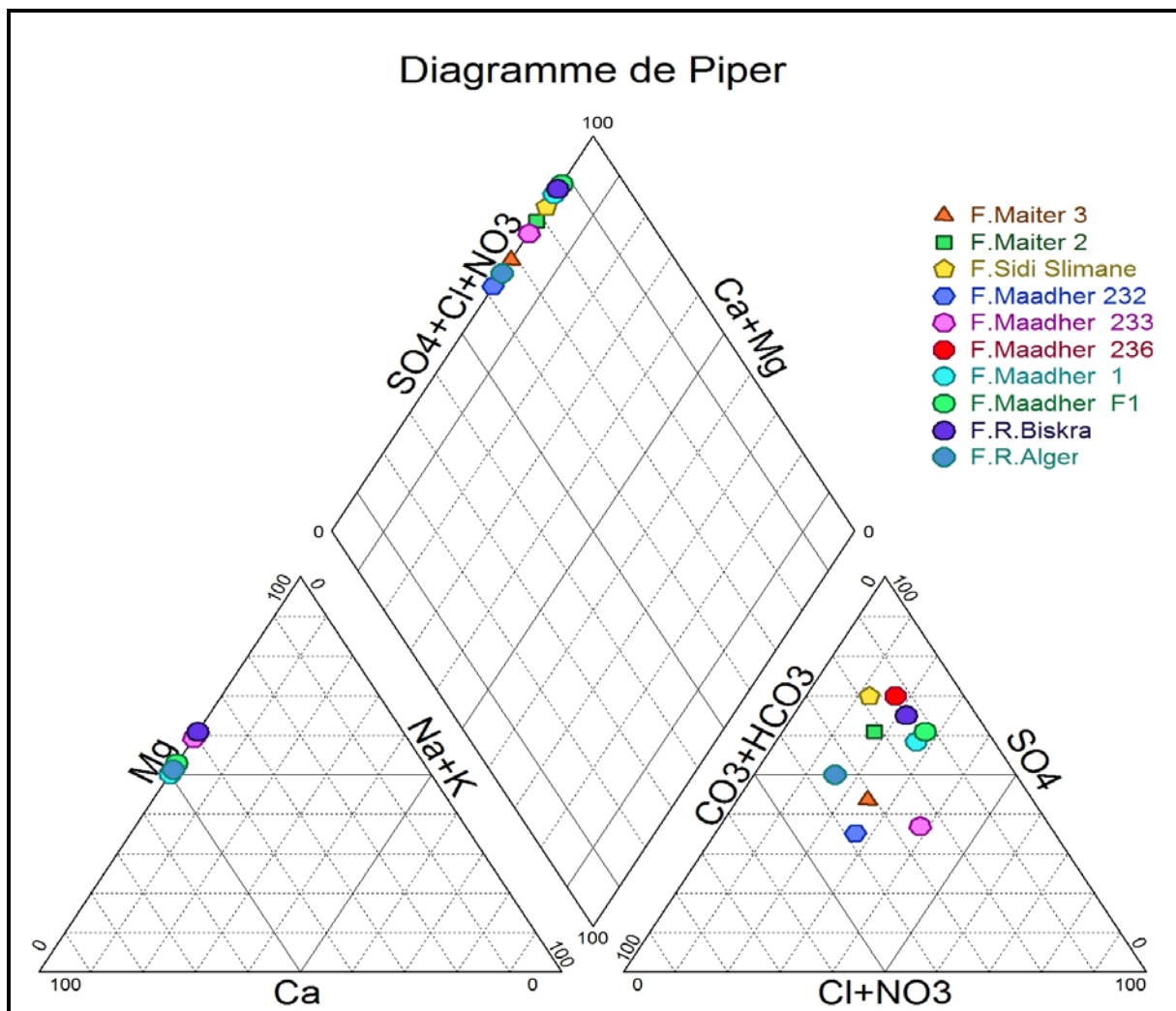


Figure. IV.21. Diagramme de Piper Compagne de (Décembre 2015)

IV.4.2. Classification de Schoeller et Berkaloff

Les diagrammes semi-logarithmiques verticaux mis au point par E- Berkaloff et Schoeller permettent de connaître les faciès hydro-chimiques. Ils sont en échelles logarithmiques verticales équidistantes qui servent au rapport des valeurs représentatives de Ca, Mg, (Na+K), Cl, SO₄, (HCO₃+CO₃), NO₃ et le pH. Chaque échelle est une grandeur en (mg/l) et (meq/l).

L'analyse des diagrammes de SCHOELLER – BERKALOFF (Figures. IV.22 et IV.23) montrent que la majorité des eaux de la zone d'étude donnent un faciès chimique ; Chloruré sulfaté calcique et magnésien pour les deux Compagnes (Mai 2012 et Décembre 2015).

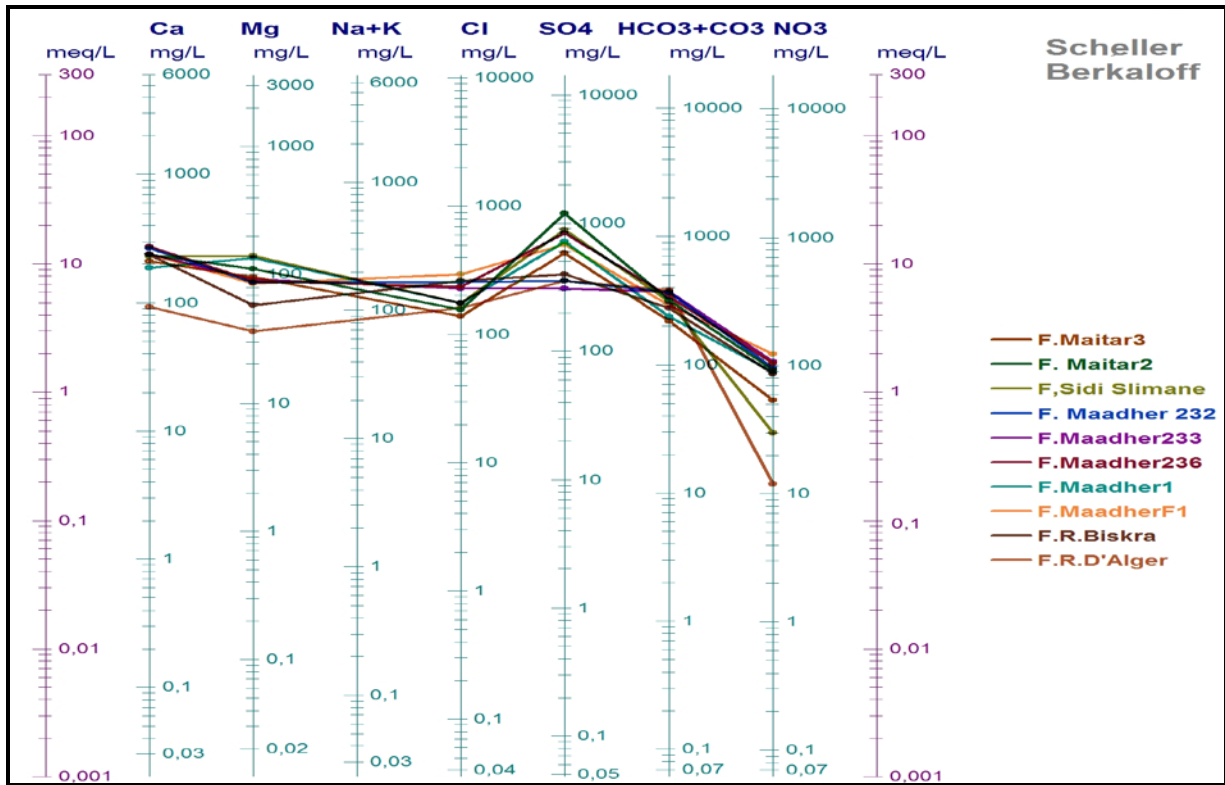


Figure. IV.22.Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF (Mai 2012)

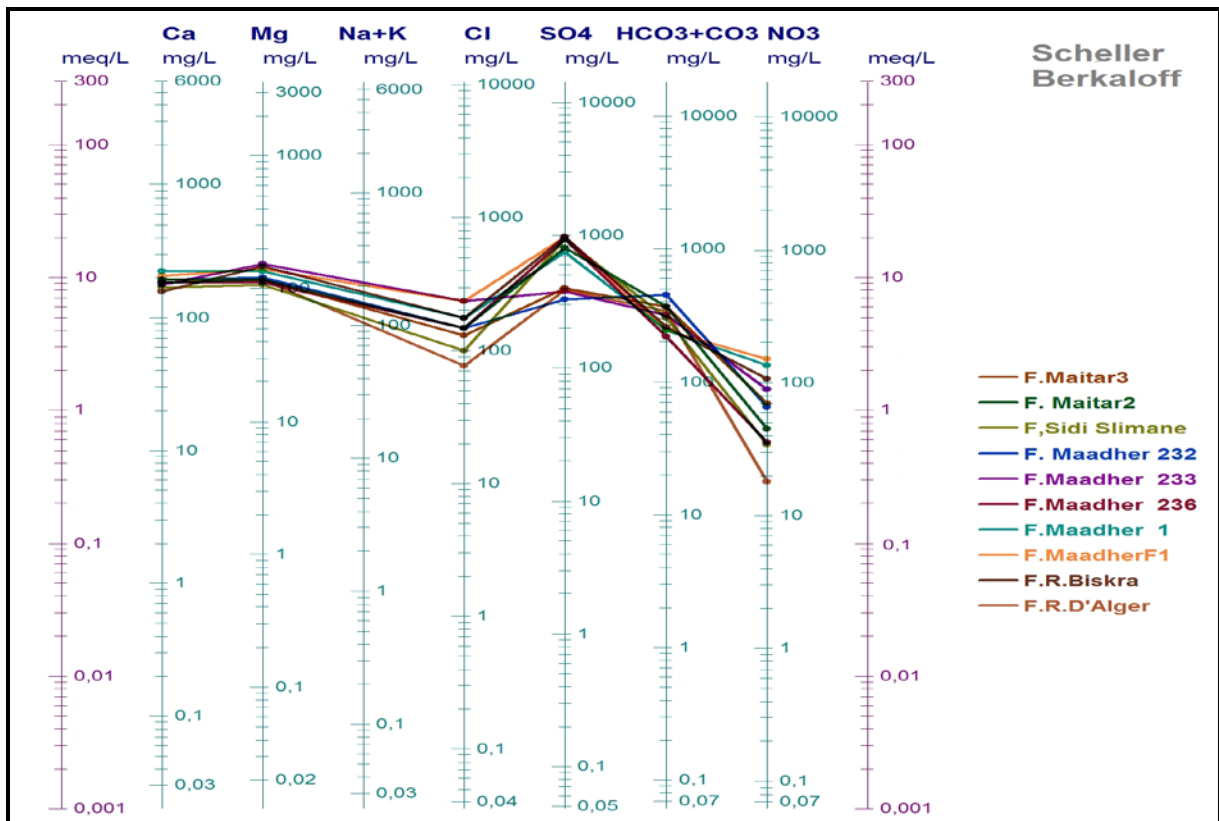


Figure. IV.23.Diagramme du SCHOELLER – BERKALOFF (Décembre 2015)

IV.5. Analyses statistiques multivariées des variables physico-chimiques

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

IV.5.1. L'Analyse en composantes principales (ACP)

IV.5.1.1. Méthodologie

Conçue par Karl Pearson en 1901, intégrée à la statistique mathématique par (Harold Hotelling en 1933), l'analyse en composantes principales (ACP) n'est vraiment utilisée que depuis la large diffusion des moyens de calcul informatique.

La technique d'analyse en composantes principales peut être présentée de divers points de vue. Pour le statisticien classique, il s'agit de la recherche des axes principaux de l'ellipsoïde d'une distribution normale multidimensionnelle, ces axes étant estimés à partir d'un échantillon. C'est la présentation initiale de Hotelling (1933), puis celle des manuels classiques d'analyse multi variée.

Pour le factorialiste classique, il s'agit d'un cas particulier de la méthode d'analyse factorielle des psychométriciens (cas de variances spécifiques nulles ou égales).

Enfin, du point de vue plus récent des analystes de données, il s'agit d'une technique de représentation des données, ayant un caractère optimal selon certains critères algébriques et géométriques, et que l'on utilise en général sans référence à des hypothèses de nature statistique ni à un modèle particulier.

Ce point de vue, fort répandu actuellement est peut-être le plus ancien. C'est celui qui avait été adopté par Pearson (1901). Bien entendu, il ne s'agissait pas de l'analyse en composantes principales telle que nous la présentons, mais les idées essentielles de la méthode étaient déjà présentées par cet auteur.

L'analyse en composantes principales présente de nombreuses variantes selon les transformations apportées au tableau de données : le nuage des points-individus peut être centré ou non, réduit ou non. Parmi ces variantes, l'analyse en composantes principales normée (nuage centré-réduit) est certainement la plus utilisée et c'est celle-ci que nous choisissons pour présenter les principes de l'analyse.

L'analyse en composantes principales, souvent notée ACP, fait partie des techniques descriptives multidimensionnelles. Elle appartient aussi au domaine du Datamining tel qu'il est

mis en œuvre par exemple dans le logiciel SPAD dont nous avons dirigé le développement jusqu'en 2004. 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 et faire émerger des informations cachées dans les données.

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. Autrement dit, on passe du "magma" des données d'origine à des graphiques interprétables par l'utilisateur. Pour l'interprétation, il est important d'avoir un minimum de connaissances sur le fonctionnement de l'ACP et la nature des résultats qu'elle produit. [16]

IV.5.1.2. Application de L'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude

L'analyse statistique en composantes principales pour les deux périodes (Mai 2012, Décembre 2015) a été réalisée sur 10 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 2014 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 le (Tableau IV. 10 et 11) suivant :

Variable	Unités	Normes Algériennes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
CE	(μ S/cm)	2800	660	2630	1928,90	541,38
pH	Mg/l	6.5—8.5	6,32	7,61	6,966	0,50
HCO_3^-	Mg/l	-	219	381	310,5	56,24
Cl^-	Mg/l	500	139	294	208,8	53,56
SO_4	Mg/l	500	312	1201	633,8	290,53
NO_3^-	Mg/l	50	12	123	79,2	35,7
Ca^{++}	Mg/l	200	92	272	220,7	51,11
Mg^{++}	Mg/l	150	36	142	93.4	31,96

Tableau IV. 10. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes Algériennes (Compagne Mai 2012)

Variable	Unités	Normes Algériennes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
CE	(μ S/cm)	2800	737.00	2190	1854.50	424.707
pH	Mg/l	6.5—8.5	6.610	7.190	6.788	0.220
HCO ₃ ⁻	Mg/l	-	220	451	311	72.193
Cl ⁻	Mg/l	500	77.00	235	157	51.275
SO ₄	Mg/l	500	327,00	976	685,90	279,803
NO ₃ ⁻	Mg/l	50	18.00	150	75.10	44.680
Ca ⁺⁺	Mg/l	200	157.00	224	186.90	424.707
Mg ⁺⁺	Mg/l	150	107.00	155	127.10	16.543

Tableau IV. 11. Statistiques et comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes Algériennes (Compagne Décembre 2015) [17]

Les résultats consignés dans les tableaux (IV. 10 et IV. 11) 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 de la norme, tandis que pour les concentrations des calciums et des magnésiums sont légèrement tolérées.

A . Matrice de corrélation

Variabes	pH	C.E	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
pH	1							
C.E	-0,552	1						
Ca ⁺⁺	-0,478	0,848	1					
Mg ⁺⁺	0,334	0,370	0,365	1				
HCO ₃ ⁻	-0,024	-0,133	-0,057	-0,407	1			
Cl ⁻	-0,582	0,702	0,538	-0,292	0,239	1		
NO ₃ ⁻	-0,465	0,688	0,727	0,117	-0,044	0,683	1	
SO ₄ ⁻	0,550	-0,037	0,252	0,621	-0,275	-0,349	0,076	1

Tableau IV. 12. Matrice de corrélation des paramètres chimique Mai 2012

Variables	pH	CE	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻
pH	1							
CE	-0,706	1						
Ca ⁺⁺	-0,150	0,086	1					
Mg ⁺⁺	-0,127	0,367	0,033	1				
HCO ₃ ⁻	0,313	-0,175	-0,097	-0,305	1			
Cl ⁻	-0,259	0,661	0,244	0,836	-0,354	1		
NO ₃ ⁻	-0,444	0,514	0,488	0,760	-0,409	0,804	1	
SO ₄ ⁻⁻	-0,245	0,267	-0,106	0,001	-0,732	0,173	0,255	1

Tableau IV. 13. Matrice de corrélation des paramètres chimique Décembre 2015

Le tableau (IV. 13) de la matrice de corrélation (compagne Mai 2012) présente une corrélation remarquable entre les couples des paramètres physico-chimiques (tableau IV. 14):

Couples	Coefficient de corrélation (Cr)	Corrélation du couple	Pourcentage de corrélation
CE - pH	Corrélation au seuil de 50% Cr = 0.5	0.552	55.2%
Ca - CE		0.848	84.8%
Cl - pH		0.582	58.2%
Cl - CE		0.702	70.2%
Cl - Ca		0.538	54.8%
NO ₃ - CE		0.686	68.6%
NO ₃ - Ca		0.727	72.7%
NO ₃ - Cl		0.683	68.3%
SO ₄ - pH		0.550	55%
SO ₄ - Mg		0.621	62.1%

Tableau IV. 14. Corrélation entre les couples des paramètres physico-chimiques

Le tableau (IV. 14) de la matrice de corrélation (compagne Décembre 2015) présente une corrélation remarquable entre les couples des paramètres physico-chimiques (tableau IV. 15):

Couples	Coefficient de corrélation (Cr)	Corrélation du couple	Pourcentage de corrélation
CE - pH	Corrélation au seuil de 50% Cr = 0.5	0.706	70.6%
Cl - CE		0.661	66.1%
Cl - Mg		0.836	83.6%
NO ₃ - CE		0.514	51.4%
NO ₃ - Mg		0.760	76%
NO ₃ - Cl		0.804	80.4%
SO ₄ - HCO ₃		0.732	73.2%

Tableau IV. 15. Corrélation entre les couples des paramètres physico-chimiques

La disparité entre les corrélations de la matrice de la campagne de Mai 2012 et Décembre 2015 peut-être revient à la solubilité des sels minéraux et la dilution durant la période des hautes eaux.

B .Etude des variables et des individus (Campagne Mai 2012).

La variance expliquée est de 73.96 % pour les deux axes F1 et F2, 44.35 pour l'axe F1 et 29.61 pour F2 (Tableau n°16).

Axes	Valeur propre	Variabilité (%)	% cumulé
F1	3,548	44,353	44,353
F2	2,369	29,612	73,964

Tableau IV. 16. Pourcentage de variance exprimée

Du tableau n°17, les meilleures corrélations se font selon le facteur F2 respectivement avec les ions Mg et SO₄.

Facteurs	CE μS/cm	Ca (mg/)	Mg (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
F1	0,484	0,452	0,031	0,007	0,447	-0,087	0,449
F2	0,161	0,247	0,589	-0,358	-0,215	0,552	0,103

Tableau IV. 17. Corrélation entre les variables et les facteurs.

Les Figures (IV. 24 et 25) permettent de visualiser la projection des variables et des individus selon le plan F1 – F2. Dans l'espace des variables, le facteur F₁ exprime 44.35 % de la variance. Ce facteur est déterminé par, CE, Cl⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et NO₃⁻. Ceci nous permet de considérer le facteur F₁ comme facteur de minéralisation. Le second facteur, F₂ exprime 29.61% de la variance et oppose les sulfates au Bicarbonates. Il oppose donc les eaux d'origine profonde aux eaux d'origine superficielle.

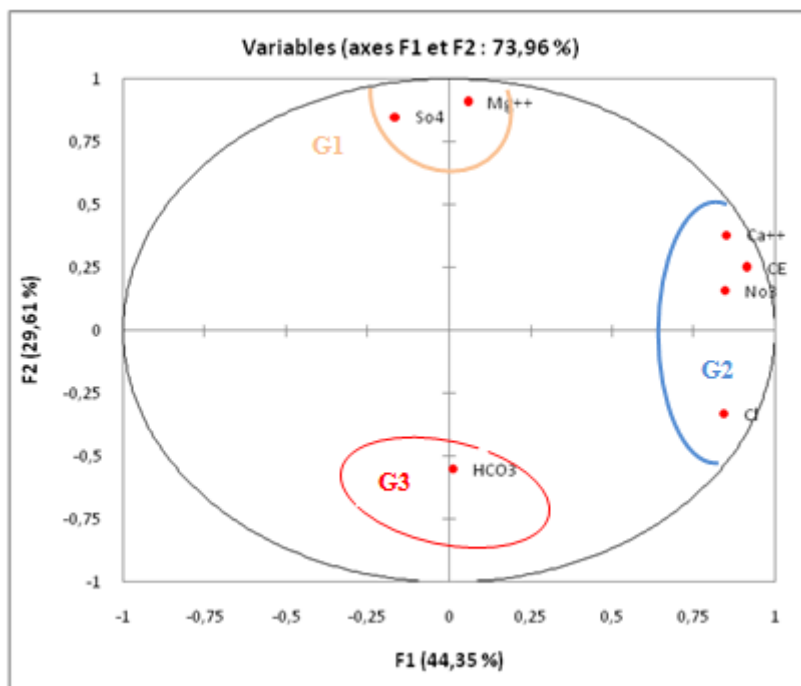


Figure. IV.24.Cercle de corrélation (Mai 2012)

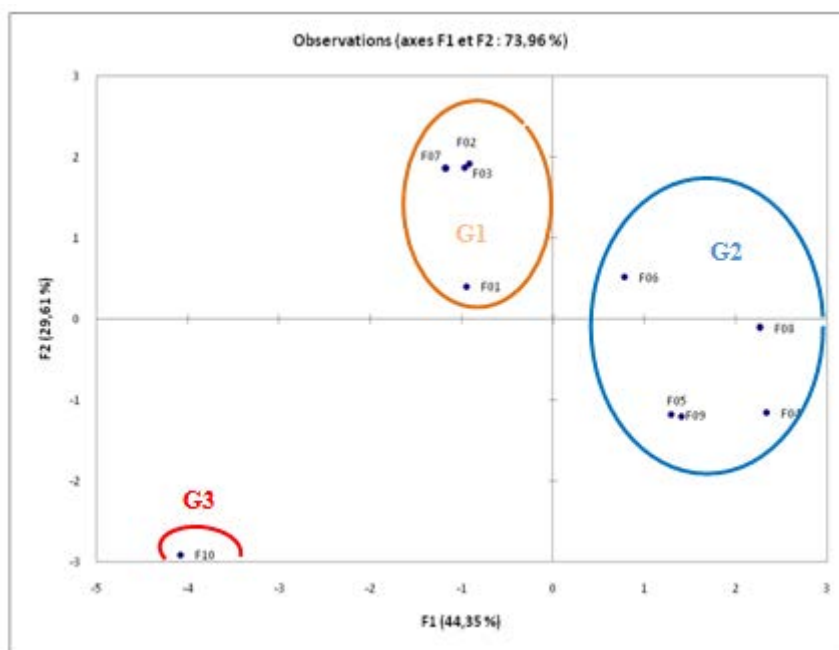


Figure. IV.25.Répartition des Individus (Mai 2012)

L'application de l'ACP (Mai 2012) nous a permis d'identifier les groupes suivants :

- **le groupe n° 01** : ce groupe renferme 4 forages : Maiter 3, Maiter2, Sidi Slimane et Maadher1, ces forages captent les eaux sulfatées magnésiennes.
- **le groupe n° 02** : ce groupe comporte les forages Maadher (232, 233, 236, F1) et R.Biskra. Ces forages captent des eaux chlorurées calciques et 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.

- **le groupe n° 03** : ce groupe comporte le forage R.Alger. Ce dernier capte les eaux carboniques.

C .Etude des variables et des individus (Compagne Décembre 2015).

La variance expliquée est de 65.02 % pour les deux axes F1 et F2, 45.82 pour l'axe F1 et 19.21 pour F2 (Tableau n°18).

Axes	Valeur propre	Variabilité (%)	% cumulé
F1	3,666	45,82	45,82
F2	1,536	19,21	65,02

Tableau IV. 18.Pourcentage de variance exprimée

Du tableau n°19, les meilleures corrélations du facteur F1 se font respectivement avec les ions Mg, HCO₃, Mg, Cl et NO₃. Concernant le facteur F2, il est bien corrélé avec les ions de HCO₃ et SO₄.

Facteurs	CE μS/cm	Ca (mg/)	Mg (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
F1	0,743	0,317	0,736	-0,586	0,881	0,422	0,906
F2	0,020	-0,351	-0,388	-0,618	-0,296	0,826	-0,231

Tableau IV. 19.Corrélation entre les variables et les facteurs.

Les Figures (IV. 26 et 27) permettent de visualiser la projection des variables et des individus selon le plan F1 – F2. Dans l'espace des variables, le facteur F₁ exprime 45.82 % de la variance. Ce facteur est déterminé par, CE, Cl⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁻⁻ et NO₃⁻. Ceci nous permet de considérer le facteur F₁ comme facteur de minéralisation. Le second facteur, F₂ exprime 19.21% de la variance est déterminé par HCO₃⁻.

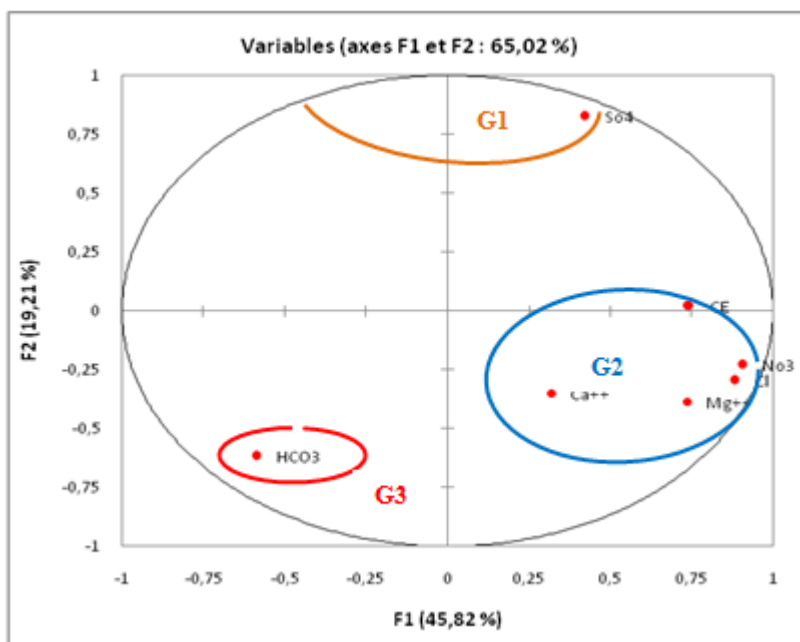


Figure. IV.26.cercle de corrélation (Décembre 2015)

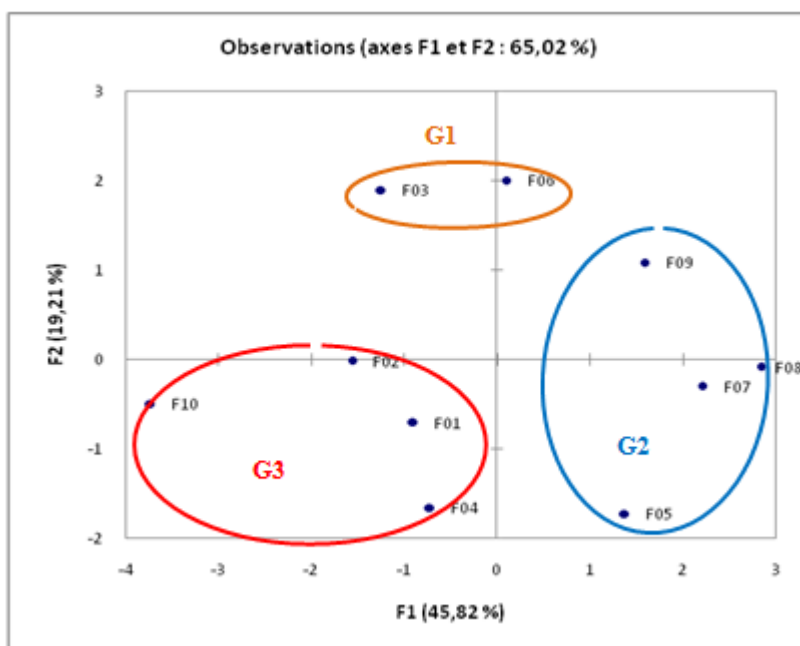


Figure. IV.27.Répartition des Individus (Décembre 2015)

L'application de l'ACP (Mai 2012) montre les groupes suivants :

- **le groupe n° 01** : ce groupe renferme 2 forages : Sidi Slimane et Maadher 236., ces forages captent les eaux beaucoup sulfatées.
- **le groupe n° 02** : ce groupe comporte les forages Maadher 233, Maadher (1, F1) et R.Biskra.Ces forages captent des eaux chlorurées calcique et magnésiennes, présente une minéralisation moins élevée par rapport à l'ACP de la campagne (Mai 2012), cela s'explique possiblement du s'explique par la dilution durant la période des hautes eaux.

- **le groupe n° 03** : ce groupe comporte les forages Maiter 3, Maiter2, Maadher232 et R.Alger. Ce dernier groupe capte des eaux carboniques.

IV.5.2 .L'analyse par la méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH)

IV.5.2.1.Principe de la méthode

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple. On commence par le calcul de la dis-similarité des (N) objets. Puis on regroupe les deux objets dont le groupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.

On calcule ensuite la dis-similarité entre cette classe et les N-2 autre objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classe d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.

On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus.

Ce dendrogramme représente une hiérarchie des partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant d'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur, soit des critères de plus objectifs.

IV.5.2.2.Avantages de la classification ascendante hiérarchique

La méthode de classification hiérarchique (CAH) porte les avantages suivants :

On travaille à partir des dis-similarités entre les objets que l'on veut regrouper. Donc on peut choisir un type de dis-similarité adapté au sujet étudié et à la nature des données.

L'un des résultats est le dendrogramme, qui permet de visualiser le regroupement progressif des données. On peut alors se faire une idée d'un nombre adéquat de classe dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

IV.5.2.3.Application de CAH sur les résultats d'analyses de la région de Boussaâda

Dans la présente étude en CAH, a été utilisée pour classer les échantillons en groupes hydro-chimiques distinctes par la méthode d'agrégation de Ward (Ward, 1963).

Un schéma (dendrogramme) de classification en utilisant la distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace c-dimensions défini par des variables c) pour la mesure de similarité, produit les groupes les plus distinctifs où chaque membre dans le

groupe est plus similaire à ses membres que tout membre en dehors du groupe (Güler. 2002).

L'analyse de faisceau du dendrogramme a été employée pour déterminer si les échantillons peuvent être groupés dans les groupes hydro-chimiques statistiquement distincts qui peuvent être significatifs dans le contexte géologique.

Les comparaisons basées sur des paramètres multiples de différents échantillons ont été faites et les échantillons ont été groupés en fonction de leur 'similitude' entre eux.

Les sept variables hydro-chimiques mesurées pour chaque période (pH, CE, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄ et NO₃) ont été classées en CAH et le résultat est présenté comme un dendrogramme (Figure.IV.28).

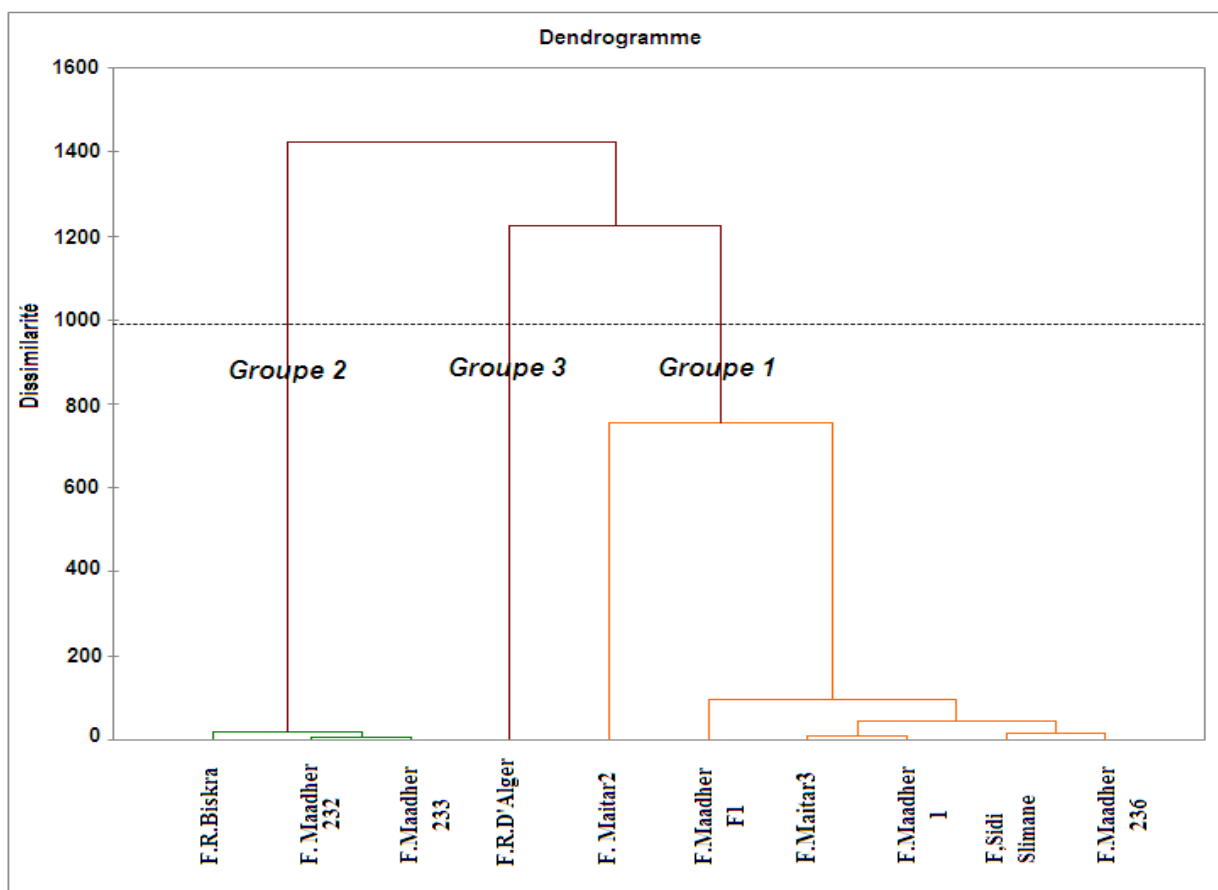


Figure. IV.28. Dendrogramme de l'analyse de faisceau hiérarchique (Q-mode).

(Compagne Décembre2015).

Les trois groupes préliminaires visualisés par l'examen du dendrogramme pour les deux périodes (Mai 2012 et Décembre 2015) donnent les mêmes résultats et chaque groupe représente un faciès hydro-chimique ce qui nous amène à une analyse et interprétation unique.

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

Le groupe 1 : est composé des forages : Maitar 2, Maadher F1, Maitar3, Maadher 1, Sidi Sliman et Maadher236, et concerne 60 % des échantillons d'eau. La conductivité électrique est de 1912.83 $\mu\text{S}/\text{cm}$, influencée par la salinité de la dépression de Chott El Hodna. Outre c'est la caractéristique de l'eau composite ($\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$). Les teneurs des sulfates et les nitrates sont également élevées. Basé sur la position des données géologiques et géographiques (Figure.II.3), les rejets d'eaux usées (Oued Maiter et Tamsa au Sud-ouest de la zone d'étude), lessivage des terrains limons sableux, sableux argileux de grande perméabilité (centre de la plaine) lors des précipitations (infiltration des eaux chargées des sulfates et les engrais agricoles) et la dissolution des formations évaporitiques (Trias ; roches carbonatées) et pourraient être responsables de cette élévation.

Le groupe 2 : est représenté par les forages : R.Biskra, maadher232, maadher233 et occupe 30 % des échantillons d'eau. La conductivité électrique est 2110.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui est la caractéristique de l'eau mélangée des éléments minérales est alcalino-terreux ($\text{Mg-Ca-Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$). Ce type d'eau peut être interprété comme la première étape des interactions d'eau-roche se produisant dans les solutions diluées, et s'expliquée par l'abondance des formations carbonatées et évaporitiques dans la couche aquifère.

Le groupe 3 : Comprend un seul forage est le forage de la route d'Alger et représente 10 % des échantillons d'eau. Ce type d'eau est relativement frais avec une conductivité électrique moyenne de 737 $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui est la caractéristique de l'eau moins salée ($\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$). Ce groupe est fondamentalement dominé par les bicarbonates et le calcium.

	CE	T	pH		Ca	Mg	HCO3	Cl	SO4	NO3
Groupe 1	1912.83	17.33	6.75	mg/l	193.33	121.67	290.83	155.83	799.33	78.33
				mol/l	4.83	5.07	4.77	4.45	8.33	1.26
Groupe 2	2110.33	18.13	6.73	mg/l	175	141.33	341.33	186	559	87.67
				mol/l	4.38	5.89	5.60	5.31	5.82	1.41
Groupe 3	737	20	7.19	mg/l	184	117	341	77	386	18
				mol/l	4.6	4.88	5.59	2.2	4.02	0.29
Unité de CE : $\mu\text{S}/\text{cm}$.					T : $^{\circ}\text{C}$					

Tableau IV. 20. Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques pour les trois principaux groupes.

IV.7. Conclusion

Suite aux analyses statistiques multivariées des résultats d'analyses physico-chimiques des deux campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015) on peut conclure que:

- Le faciès chimique le plus dominé est Chloruré sulfaté calcique et magnésien pour la majorité des eaux des points d'eau prélevés de la zone d'étude pour les deux campagnes.

L'analyse cartographique résulte que le calcium, le magnésium les sulfates et les nitrates ont des concentrations élevées du centre au lac salé (Chott el Hodna) de la zone d'étude. Cette augmentation est due à l'influence des formations carbonatées tel que les calcaires, les calcaires dolomitiques d'une part, dissolution et lessivage des formations argileuses, marneuses et salifères provenant du lac salé d'autre part. Par contre les bicarbonates sont caractérisées par des teneurs élevées à proximité du Djebel Kerdada et cela du probablement à la dissolution des roches carbonatés. Tandis que les teneurs élevées des nitrates sont en liaison avec la répartition des terrains agricoles (El-Maadher) d'où l'utilisation des engrais, fumiers et aux rejets des eaux usées (Oued Boussaâda et oued Maiter).

- L'Analyse en composantes principales ACP et la classification ascendante hiérarchique (CAH) des deux campagnes (Mai 2012 et Décembre 2015) résultent que ; pour l'ACP donne presque les même résultats et renferme trois groupes ($\text{SO}_4\text{-Mg}$), (Cl-Ca) et bicarbonatés (HCO_3), sauf pour la campagne 2015 les ions de Mg sont remplacés par ceux de Ca et cela dû probablement à la dilution durant la période des hautes eaux. De même l'analyse en CAH donne trois groupes des eaux souterraines ; le premier est représenté par des eaux trop chargés par les ions de SO_4 et NO_3 et le second groupe d'eau caractérisé par conductivité élevée influencé par les minéraux (Mg – Ca - Cl - HCO_3 et SO_4) et les eaux du lac salé et le dernier groupe représente une eau moins salé (CA – HCO_3 et SO_4).

La qualité des eaux de notre région (Boussaâda) est influencée directement par la géologie locale et l'interaction eau-roche pendant le séjour et les écoulements souterraine 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 multi variées.

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'étude piézométrique de notre zone d'étude de la plaine de Boussaâda montre que : Les zones correspondantes à des horizons a fort écoulement avec les directions de L'écoulement SW-N et W-E, l'alimentation de la nappe se fait à partir de massifs qui bordent la plaine où les axes d'écoulement prennent naissance et se dirigent vers les zones dépressions.

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 multi-variées en composantes principale (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) fait ressortir les points suivants :

- L'établissement des cartes hydro-chimiques représente la répartition des éléments chimiques major dans l'aire du bassin versant. La comparaison entre les résultats graphique obtenus pour les deux campagnes (Mai 2012 et décembre 2015) donne les points suivants ; aucun changement remarquable pendant les deux périodes (2012 - 2015) et les changements se trouvent seulement sur les cartes de calcium (Ca) et le bicarbonate (HCO₃).

- Suivant le diagramme de Piper et de Scholler Birkaloff les faciès chimiques dominant dans le bassin versant de Boussaâda est chloruré sulfaté calcique et bicarbonaté magnésien.
- Les résultats comparatives par l'analyse en composante principales (ACP) entre les deux campagnes (Mai 2012 – Décembre 2015) présente une corrélation des ions sur les plan F1 et F2, sauf les ions de Mg en compagnie de Décembre 2015 sont dominés par ceux de Ca et cela dû probablement à la dilution durant la période des hautes eaux.
- La CAH regroupe les eaux des forages de notre zone d'étude en trois groupes le premier groupe caractérisée par l'excès des ions de SO_4 et NO_3 , ce groupe est représenté par les forages (Maitar 2, Maadher F1, Maitar3, Maadher 1, Sidi Sliman et Maadher236) et le deuxième groupe d'eau caractérisé par la conductivité élevée influencé par la solubilité des minéraux et le eaux du lac salé, représenté par les forages (R.Biskra, maadher232, maadher233) et en fin le dernier groupe représenté par le forage (R.D'Alger) qui donne une eau moins salé.

La majorité des forages présente des eaux d'une qualité acceptable pour la potabilité et les paramètres testés sont dans les normes, sauf pour les forages (maadher233) (maadher232) (maadher F1) (maitar3) (R.biskra) la concentration de sulfate et nitrate sont élevés.

La qualité des eaux pour les trois groupes est influencée de la géologie locale de notre région (Boussaâda), de l'interaction eau-roche pendant le séjour et les écoulements souterraine et de l'influence du Chott el Hodna.

Références
bibliographiques

Références Bibliographiques

[03] R. Chadi. Mémoire de master en hydraulique urbain « impact de la pollution par les nitrates sur eaux souterraines de la région de chemora» (w. Batna) Université de M'sila (2012/2013).

[04] 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).

[07] L' ANRH Agence nationale des ressources hydriques.

[08] 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).

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

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

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

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

[14] 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).

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

[16] A.Hattab. Mémoire de master en hydraulique « Etude hydrogéologique du bassin versant du bordj ghdir » université de m'sila université de m'sila. (2015).

[17] ADE : Algérienne Des Eaux de la willaya de M'Sila. (2016).

Webographie :

[01] www. l'eau un élément essentiel pour la vie.com Page consultée le 02/02/2016 Adresse URL:http://www.vatican.va/roman_curia/pontifical_councils/justpeace/documents/rc_pc_justpeace_doc_20060322_mexico-water_fr.html

[02] www.les eaux souterraine.com Page consultée le 03/02/2016 Adresse URL :

Références Bibliographiques

<http://www.lenntech.fr/eaux-souterraines/definitions.htm>

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

[06] www.boussada.com Page consultée le 05/02/2016 Adresse URL :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Bou_Sa%C3%A2da