

Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Agronomie

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau

THESE de DOCTORAT de 3^{ème} cycle

Spécialité : Science de la Terre et de l'Univers.

Option : Hydrogéologie Sol et Environnement.

Intitulée

Potentialités et qualité d'un aquifère karstique surexploité : Cas des Monts de Sidi Kada (Nord-Ouest Algérien)

Présentée par : Mme Kenniche siham

Le : 04 / 05 / 2023

Devant le jury :

Président	Benslimane Mohamed	Pr	Université de Mascara
Examineur	Bemoussat Abdelkader	MCA	Université de Sidi Bel Abbès
Examineur	Djellouli Fayçal	MCA	Université de El Bayadh
Examineur	Benzater Benali	MCA	Université de Mascara
Encadreur	Bekkoussa Belkacem	Pr	Université de Mascara

Remerciements

*Je tiens à remercier avant tout mon **DIEU** de m'avoir donné la patience, la volonté et le courage pour achever ce travail.*

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement et profondément Monsieur le Professeur **Bekkoussa Belkacem** de l'université de Mascara, qui m'a encadré durant plusieurs années, pour sa disponibilité, son soutien et ses précieux conseils. Ses encouragements ont été nécessaires au bon déroulement de mes travaux de recherche et ce malgré la distance.*

*Je dois énormément remercier Monsieur **Teffahi Mohamed**, pour son soutien et sa sympathie. Il n'a jamais épargné un effort, à me faire profiter de son expérience dans la cartographie. Je lui souhaite plein succès dans ses recherches.*

*Un grand merci à Monsieur **Allem Baghdad** et Monsieur **Bakhatiar Djamel**, les ingénieurs de la Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Mascara, pour les données que vous m'avez fournies au cours de ces années de recherche.*

Mes remerciements vont également à tout le personnel de laboratoire de chimie de l'ADE (Algérienne Des Eaux, Antenne Bouhanifia, Mascara) et de laboratoire de biologie de l'université de Mustapha Stambouli – Mascara.

*Ma profonde gratitude s'adresse à Monsieur le Professeur **Majdoub Rajouene**, à l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem - Tunisie, pour son accueil chaleureux dans son laboratoire et son effort pour la réussite de mon stage.*

*J'exprime ma profonde gratitude à Madame **M'nassri Soumaia**, à l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem - Tunisie, pour son aide précieuse, les corrections et les orientations lors de mon stage à Sousse, et la rédaction de mon article.*

*Je remercie vivement Monsieur, professeur **Benslimane Mohamed** à l'université de Mascara, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse. Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont acceptés de lire et juger ce travail.*

Mes sincères remerciements s'adressent également à ma famille, mon père, ma mère, mon mari, mes frères et sœurs qui n'ont pas hésité de m'aider et m'encourager moralement et matériellement jusqu'à la fin de cette ouvrage.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution à ce travail. Je leur exprime ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère 'Allouche Oumria', qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon cher père 'Kenniche Mohamed', pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

Puisse DIEU le Tout Puissant vous garder longtemps à côté de nous.

A mon mari 'Teffahi Mohamed', mon soutien moral et source de joie et de bonheur, pour ses encouragements, l'aide qu'il m'a toujours accordé et ses supports dans les moments difficiles.

Puisse DIEU le Tout Puissant t'accorder une longue vie couronnée de santé.

A mes chers enfants Khadidja et Ishak. Que DIEU vous bénisse en exhaussant vos vœux les meilleurs. Mes très chers enfants ce travail vous est dédié.

A mes frères Ali et Yasser et sœurs Fatima et Rofaida, pour l'amour qu'ils me réservent. Je leurs souhaite une vie pleine du bonheur et succès.

A famille Teffahi, pour leurs amour et supports.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

 ...Siham

Résumé

Les monts de Saida constituent l'un des massifs carbonatés karstiques les plus importants de l'Algérie du Nord. Les monts de Sidi Kada se trouvent sur le versant Nord de ces massifs dans la bordure méridionale du bassin versant d'Oued Fekan. Cette région contient d'importants aquifères contenus dans les formations calcaréo-dolomitiques du Jurassique supérieur. Les eaux souterraines qui y sont contenues sont essentiellement destinées à l'alimentation en eau potables et l'irrigation agricole. La ressource en eau que renferment ces aquifères est vital pour la région mais reste encore très mal cernée. Par ailleurs, la combinaison entre facteur climatique (sécheresse persistance) et facteurs humain (augmentation des besoins en eau) a eu pour conséquence une diminution importante de ces réserves. Les aquifères karstiques sont réputés être très sensibles et vulnérables vis-à-vis des pollutions. Ce travail vient dans un contexte de gestion durable de cette ressource d'un point de vue quantitatif et qualitatif. La présente étude vise à évaluer la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada à des fins de consommation humaine et d'irrigation et à améliorer la compréhension des processus hydrogéologiques et anthropiques contrôlant sa chimie. Pour répondre à cet objectif, plusieurs approche ont été utilisée tel que : l'utilisation des méthodes hydrochimiques, les statistiques multivariés, l'estimation de l'indice de qualité des eaux (IQE) et la cartographie de la vulnérabilité. Les résultats montrent que la composition chimique et la minéralisation des eaux souterraines sont principalement contrôlées par les dissolutions de minéraux carbonatés et les évaporites. Des Processus secondaires tels que l'échange de cations, l'altération des silicates et la contamination anthropique contribuent à la composition chimique des eaux. Par ailleurs, 20% des échantillons présentaient une contamination bactériologique tout en ayant une bonne qualité chimique pour la consommation humaine. L'IQE calculé a permis de classer les échantillons d'eau souterraine en deux catégories : excellente et bonne. Les résultats de l'application des méthodes DRASTIC et GOD ont révélés que les affleurements des calcaires dolomitiques (karst) notamment dans la partie Sud-Est sont des régions très vulnérables. Les résultats indiquent également que la méthode DRASTIC est la mieux adapté pour la cartographie de la vulnérabilité dans notre région. Afin de préserver la qualité et la pérennité de la ressource en eau dans les mont de Sidi Kada, les gestionnaires et les responsables du secteur de l'eau doivent prendre des décisions visant à : améliorer la protection des puits spécialement destinés à l'approvisionnement en eau potable, installer des réseaux d'assainissement fiable dans les zones rurales et surveiller périodiquement le niveau des eaux souterraines pour observer l'évolution des potentialités de l'aquifère.

Mots clés : Hydrochimie, aquifère karstique, contamination bactériologique, Vulnérabilité, monts de Sidi Kada.

ملخص

تشكل جبال سعيدة واحدة من أهم كتل الكربونات الكارستية في شمال الجزائر. تقع جبال سيدي قادة على المنحدر الشمالي لهذه الكتل الصخرية في الحافة الجنوبية لمستجمع مياه وادي فكان. تحتوي هذه المنطقة على طبقات المياه الجوفية الهامة الموجودة في تكوينات الحجر الجيري الدولوميتية في العصر الجوراسي العلوي. المياه الجوفية الموجودة فيه مخصصة بشكل أساسي لإمدادات مياه الشرب والري الزراعي. تعتبر الموارد المائية الموجودة في طبقات المياه الجوفية هذه حيوية للمنطقة ولكنها لا تزال غير مفهومة بشكل جيد. علاوة على ذلك ، أدى الجمع بين العوامل المناخية (الجفاف المستمر) والعوامل البشرية (زيادة الاحتياجات المائية) إلى انخفاض كبير في هذه الاحتياطيات. تشتهر طبقات المياه الجوفية الكارستية بأنها حساسة للغاية وعرضة للتلوث. يأتي هذا العمل في سياق الإدارة المستدامة لهذا المورد من وجهة نظر كمية ونوعية. تهدف الدراسة الحالية إلى تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية والبكتريولوجية لمياه طبقة المياه الجوفية الكارستية لجبال سيدي قادة للاستهلاك البشري ولأغراض الري وتحسين فهم العمليات الهيدروجيولوجية والبشرية التي تتحكم في كيميائه. لتحقيق هذا الهدف ، تم استخدام العديد من الأساليب مثل: استخدام الأساليب الهيدروكيميائية ، والإحصاءات متعددة المتغيرات ، وتقدير مؤشر جودة المياه ورسم خرائط الضعف. أظهرت النتائج أن التركيب الكيميائي وتمعدن المياه الجوفية يتم التحكم فيهما بشكل أساسي عن طريق إذابة معادن الكربونات والمتبخرات. تساهم العمليات الثانوية مثل التبادل الكاتيوني والتجوية بالسيليكات والتلوث البشري في التركيب الكيميائي للمياه. بالإضافة إلى ذلك ، أظهرت 20% من العينات تلوثاً جرثومياً مع وجود جودة كيميائية جيدة للاستهلاك البشري. جعل المحسوب من الممكن تصنيف عينات المياه الجوفية إلى فئتين: ممتاز وجيد. أظهرت نتائج تطبيق طريقتي DRASTIC و GOD أن نتوءات الحجر الجيري الدولوميت (الكارست) ، خاصة في الجزء الجنوبي الشرقي ، هي مناطق معرضة للتلوث. تشير النتائج أيضاً إلى أن طريقة DRASTIC هي الأنسب لرسم خرائط نقاط الضعف في منطقتنا. من أجل الحفاظ على جودة واستدامة الموارد المائية في جبال سيدي قادة ، يجب على المديرين والمسؤولين في قطاع المياه اتخاذ قرارات تهدف إلى: تحسين حماية الآبار المصممة خصيصاً لتزويد مياه الشرب ، وتركيب شبكات صرف صحي موثوقة في المناطق الريفية ومراقبة مستوى المياه الجوفية بشكل دوري لمراقبة تطور إمكانات الخزان الجوفي.

الكلمات الرئيسية: الكيمياء المائية ، طبقة المياه الجوفية الكارستية ، التلوث الجرثومي ، الضعف ، جبال سيدي قادة.

Abstract

The Saida mountains constitute one of the most important karstic carbonate massifs of northern Algeria. The mountains of Sidi Kada are on the northern slope of these massifs in the southern edge of the watershed of Oued Fekan. This region contains important aquifers contained in the limestone-dolomitic formations of the Upper Jurassic. The groundwater contained therein is mainly intended for drinking water supply and agricultural irrigation. The water resource contained in these aquifers is vital for the region but is still very poorly understood. Furthermore, the combination of climatic factors (persistent drought) and human factors (increased water needs) has resulted in a significant reduction in these reserves. Karstic aquifers are reputed to be very sensitive and vulnerable to pollution. This work comes in a context of sustainable management of this resource from a quantitative and qualitative point of view. The present study aims to assess the physicochemical and bacteriological quality of the waters of the karstic aquifer of the Sidi Kada mountains for human consumption and irrigation purposes and to improve the understanding of the hydrogeological and anthropogenic processes controlling its chemistry. To meet this objective, several approaches were used such as: the use of hydrochemical methods, multivariate statistics, estimation of the water quality index (IQE) and vulnerability mapping. The results show that the chemical composition and mineralization of groundwater are mainly controlled by the dissolutions of carbonate minerals and evaporites. Secondary processes such as cation exchange, silicate weathering and anthropogenic contamination contribute to the chemical composition of waters. In addition, 20% of the samples showed bacteriological contamination while having good chemical quality for human consumption. The calculated WQI made it possible to classify the groundwater samples into two categories: excellent and good. The results of the application of the DRASTIC and GOD methods revealed that the outcrops of dolomitic limestone (karst), particularly in the south-eastern part, are very vulnerable regions. The results also indicate that the DRASTIC method is best suited for vulnerability mapping in our region. In order to preserve the quality and sustainability of water resources in the mountains of Sidi Kada, managers and officials of the water sector must take decisions aimed at: improving the protection of wells specially intended for the supply of drinking water, install reliable sanitation networks in rural areas and periodically monitor the level of groundwater to observe the evolution of the potential of the aquifer.

Keywords: Hydrochemistry, karstic aquifer, bacteriological contamination, vulnerability, Sidi Kada mountains.

Sommaire

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

Chapitre I : Cadre général de la zone d'étude

I.1. Introduction.....	3
I.2. Situation géographique	3
I.3. Caractéristiques de forme.....	4
I.3.1. Le modèle numérique de terrain	4
I.3.2. La surface (S).....	4
I.3.3. Le périmètre (P)	4
I.3.4. Le coefficient de compacité de Gravelius.....	5
I.3.5. Rectangle équivalent.....	5
I.3.6. Etude de relief	5
I.3.6.1. La courbe hypsométrique.....	5
I.3.6.2. Les altitudes caractéristiques	7
I.3.7. Les indices des pentes	9
I.3.8. La dénivelée	11
I.3.9. La dénivelée spécifique.....	11
I.4. Réseau hydrographique.....	13
I.5. Contexte socio-économique.....	14
I.6. Les sols.....	16
I.7. Conclusion	17

Chapitre II : Etude Hydro - climatique

II.1. Introduction.....	18
II.2. Etude des paramètres climatologiques.....	18
II.2.1. La pluviométrie.....	18
II.2.1.1. La pluviométrie annuelle	19
II.2.1.2. La pluviométrie mensuelle et saisonnière.....	20
II.2.1.3. Le coefficient pluviométrique.....	22
II.2.2. La température	24
II.2.3. L'humidité	25
II.2.4. Le Vent	25
II.3. Type du climat	26
II.3.1. Indice d'aridité de Martonne.....	26
II.3.2. Indice de Moral.....	27
II.3.3. Diagramme Pluvio-thermique.....	27
II.3.4. Méthode d'Euverte	28
II.3.5. Climagramme d'Emberger	29

II.4. Bilan hydrique	30
II.4.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)	31
II.4.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement	32
II.4.3. Le ruissellement.....	32
II.4.4. L'infiltration	33
II.4.5. Calcul du bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite.....	33
II.5. Conclusion.....	35

Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologique

III.1. Etude géologique.....	36
III.1.1. Introduction.....	36
III.1.2. Elément structurale du secteur d'étude.....	36
III.1.3. Litho-stratigraphie	39
III.2. Description hydrogéologique	41
III.2.1. Principaux aquifères	42
III.2.1.1. Aquifère des alluvions Plio-quaternaires.....	42
III.2.1.2. Aquifère des calcaires et grès du pliocène	42
III.2.1.3. Aquifère des calcaires dolomitiques du jurassique	43
III.2.2. Evaluation des paramètres hydrodynamiques des aquifères	43
III.2.2.1. La transmissivité	43
III.2.2.2. Le coefficient d'emménagement	44
III.2.2.3. La perméabilité.....	44
III.2.3. Dimension de la nappe des calcaires dolomitique du jurassique.....	44
III.2.3.1. Profondeur du Toit de l'aquifère du Jurassique	44
III.2.3.2. Profondeur du Mur de l'aquifère du Jurassique	45
III.2.3.3. Profondeur de l'épaisseur de l'aquifère du Jurassique.....	46
III.2.4. Piézométrie de la nappe des calcaires dolomitique du Jurassique.....	47
III.3. Conclusion.....	50

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I. Étude de la qualité hydro-chimique des eaux

I.1. Introduction.....	51
I.2. Méthodologie de travail	51
I.2.1. Echantillonnage des eaux.....	51
I.2.2. Méthodes d'analyses et fiabilité des résultats	52
I.2.3. Méthodes de cartographie	52
I.3. Résultats	53
I.3.1. Caractéristiques physicochimiques et distribution spatiale des ions majeurs	53
I.3.1.1. La température	53
I.3.1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	53

I.3.1.3. Conductivité électrique et Total dissolved des sels (TDS)	54
I.3.1.4. Le calcium et magnésium (Ca^{2+} et Mg^{2+}).....	55
I.3.1.5. Le sodium et potassium (Na^+ et K^+).....	55
I.3.1.6. Les sulfates SO_4^{2-}	56
I.3.1.7. Les bicarbonates HCO_3^-	56
I.3.1.8. Les chlorures Cl^-	57
I.3.1.9. Les nitrates NO_3^-	58
I.3.1.10. Les nitrites et l'ammonium (NO_2^- et NH_4^+)	59
I.3.1.11. Les phosphates (PO_4^{3-})	59
I.3.1.12. Les silicates (SiO_2).....	60
I.3.2. Classification hydro-chimique	60
I.3.2.1. Façès chimiques	60
I.3.3. Aptitude des eaux karstiques des monts de Sidi Kada à l'irrigation	61
I.3.4. Analyse statistique multivariable	65
I.3.4.1. Matrice de corrélation	65
I.3.4.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	67
I.3.4.3. Analyse en composante principal (ACP)	68
I.3.5. Etude des ions majeurs.....	71
I.3.5.1. Etude des indices de saturation des eaux par rapport aux minéraux	71
I.3.5.2. Origine et comportement de quelques éléments majeurs	73
I.3.6. Altération des roches.....	78
<u>II. Etude de qualité bactériologique des eaux</u>	
II.1. Généralité sur les paramètres bactériologique	79
II.1.1 Les coliformes	80
II.1.2. Les streptocoques fécaux	80
II.1.3. Les Salmonelles	80
II.1.4. Le vibrion cholérique.....	81
II.2. Analyse bactériologique	81
II.2.1. Echantillonnage	81
II.2.2. Méthodes d'analyses.....	81
II.2.2.1. Recherche des coliformes totaux	81
II.2.2.2. Recherche des Streptocoques fécaux	84
II.2.2.3. Recherche des Salmonelles.....	86
II.2.2.4. Recherche des Vibrions cholériques.....	88
II.3. Résultats bactériologiques	89
II.4. Les maladies à transmission hydrique (MTH).....	91
II.4.1. Les différents types de maladies hydriques	91
II.5. Mesures préventives pour disposer d'une eau de boisson de bonne qualité.....	92
III. L'indice de qualité des eaux souterraine (IQE).....	93
IV. Conclusion.....	97

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

V.1. Introduction	98
V.2. La pollution	99
V.2.1. Principales origines des pollutions	99
V.3. La vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.....	100
V.3.1. Définition.....	100
V.3.2. Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères.....	103
V.4. Méthode « DRASTIC »	103
V.4.1. Application de la méthode DRASTIC et réalisation des cartes thématiques	106
V.4.2. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon DRASTIC	113
V.5. Méthode « GOD »	114
V.5.1. Application de la méthode GOD et réalisation des cartes thématiques.....	116
V.5.2. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon GOD	118
V.6. Validation des cartes de vulnérabilité de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.....	119
V.7. Actions envisageables en cas de contamination	121
V.8. Conclusion.....	121
Conclusion générale	123
Références bibliographiques	126
Annexe I	135

Liste des Figures

Figure I.1 : situation géographique de la zone d'étude.....	3
Figure I.2 : Modèle numérique du terrain de la zone d'étude.....	4
Figure I.3 : La courbe hypsométrique.....	6
Figure I.4 : La carte hypsométrique de la zone d'étude.....	7
Figure I.5 : La carte des pentes du la région d'étude.....	11
Figure I.6: Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude.....	14
Figure II.1: Variations des précipitations annuelles pour les stations de Matemore, Tizi, Nesmoth et Ghris sur la période (1969-2011).....	19
Figure II.2 : Carte en isohyètes des précipitations moyennes annuelles de la région d'étude.....	20
Figure II.3 : Variation moyenne mensuelle des précipitations aux stations d'observation. Période 1969 – 2011.....	21
Figure II.4 : Histogramme des Précipitations saisonnière des quatre stations (1969 – 2011).....	22
Figure II.5 : Coefficient pluviométrique pour quatre stations sur la période 1969-2011....	23
Figure II.6: Températures moyennes, minimales et maximales à la station de Matemour (1985-2016).....	24
Figure II.7: Humidité moyenne mensuelle à la station de Mascara (1990-2010).....	25
Figure II.8 : Abaque d'indice d'aridité annuel de la station de Matemour.....	27
Figure II.9: Courbe pluvio-thermique de la région de d'étude.....	28
Figure II.10 : Climmagramme d'Emberger de la station de Matemour.....	30
Figure II.11 : Représentation graphique du bilan hydrique selon Thornthwaite – Station de Matemour (1969 – 2011).....	34
Figure III.1: Carte géologique, position des coupes géologiques de la région d'étude.....	38
Figure III.2 : Coupes géologique de secteur d'étude.....	38
Figure III.3: Log litho-stratigraphique des formations de la région d'étude (Bekkoussa, 2005).....	41
Figure III.4 : Profondeur du toit de l'aquifère du Jurassique.....	45

Figure III.5 : Profondeur du mur de l'aquifère du Jurassique.....	46
Figure III.6 : Épaisseur de l'aquifère du Jurassique.....	47
Figure III.7 : Carte piézométrique de l'aquifère Jurassique année 2012.....	48
Figure III.8 : Carte piézométrique de l'aquifère Jurassique année 2018.....	49
Figure IV.1 : Carte d'inventaire des points prélevés et analysés.....	51
Figure IV.2 : Répartition spatial de TDS (a) et CE (b).....	54
Figure IV.3 : Répartition spatial de SO_4^{2-}	56
Figure IV.4 : Répartition spatial de HCO_3^-	57
Figure IV.5 : Répartition spatial de Cl.....	58
Figure IV.6 : Répartition spatial de NO_3^-	59
Figure IV.7 : Faciès géochimiques de l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada.....	61
Figure IV.8 : Classification des eaux karstiques selon le diagramme de Wilcox.....	64
Figure IV.9 : Classification des eaux selon le diagramme USSL. Les valeurs du SAR (SodiumHazard) sont exprimées en meq/l.....	65
Figure IV.10 : Analyse hiérarchique des eaux souterraines	67
Figure IV.11 : Projections des variables selon le plan factoriel (a) F1/F2 et (b) F3/F4....	70
Figure IV.12 : Relations entre les éléments chimiques majeurs et les indices de saturations : (a): IS anhydrite versus $\text{Ca} + \text{SO}_4^{2-}$, (b): IS gypse versus $\text{Ca} + \text{SO}_4$, (c): IS halite versus $\text{Na} + \text{Cl}$	72
Figure IV.13 : Relation entre $(\text{HCO} + \text{SO}_4)$ vs $(\text{Ca} + \text{Mg})$	74
Figure IV.14 : Relation entre les ions Na et Cl.....	74
Figure IV.15 : Relation entre les ions Ca et SO_4	75
Figure IV.16 : Diagramme d'échange cationique.....	76
Figure IV.17 : Relation Mg / Ca vs Cl.....	77
Figure IV.18 : Diagrammes bivariable (a) : HCO / Na vs Ca / Na ; (b) : Mg / Na vs Ca / Na ...	78
Figure IV.19: Diagrammes de Gibbs	79
Figure IV. 20: Recherche et dénombrement des coliformes dans l'eau.....	83
Figure IV. 21 : Recherche et dénombrement des streptocoques fécaux dans l'eau.....	85
Figure IV. 22 : Recherche des salmonelles.....	87
Figure IV. 23 : Recherche de vibron cholérique.....	89
Figure IV. 24: Variation des coliformes totaux et fécaux des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.....	90
Figure IV. 25. Diagramme circulaire de la qualité d'échantillons d'eau souterraine.....	96

Figure V.1 : Principales causes de pollution (Seghir, 2008).....	100
Figure V.2 : Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref et al. 2007)..	102
Figure V.3 : Définition des paramètres DRASTIC et leurs poids respectif (PACES-SLSJ).	104
Figure V.4 : Carte de paramètre profondeur d'aquifère « D ».....	106
Figure V.5 : Carte du paramètre recharge nette « R ».....	108
Figure V.6 : Carte du paramètre milieu aquifère « A ».....	109
Figure V.7 : Carte du paramètre type de sol « S ».....	110
Figure V.8 : Carte du paramètre topographie « T ».....	111
Figure V.9 : Carte du paramètre impact de la zone vadose « I ».....	112
Figure V.10 : Carte du paramètre conductivité hydraulique « C ».....	113
Figure V.11 : Carte de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon la méthode DRASTIC.....	114
Figure V.12 : Carte du paramètre "G" type d'aquifère.....	116
Figure V.13 : Carte du paramètre "O" Nature lithologique de la ZNS.....	117
Figure V.14 : Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe.....	118
Figure V.15 : Carte de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon la méthode GOD.....	119
Figure V.16 : Les concentrations de nitrates de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.....	120

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Répartition altimétrique de la région d'étude.....	6
Tableau I.2 : la répartition des altitudes moyennes entre deux courbes de niveau.....	8
Tableau I.3 : Classification du relief selon l'Office de recherche scientifique des Travaux Outre – Mère (O.R.S.T.O.M).....	9
Tableau I.4 : Données pour le calcul de l'indice de ROCHE.....	10
Tableau I.5 : Classification du relief selon D_s par l'O.R.S.T.O.M.....	12
Tableau I.6 : Caractéristiques hydro-morphométriques du notre secteur d'étude.....	12
Tableau II.1 : Présentation des stations retenues pour l'étude des précipitations.....	19
Tableau II.2 : Précipitation moyenne mensuelle des stations (1969 – 2011).....	21
Tableau II.3 : Précipitation saisonnière des quatre stations (1969 – 2011).....	22
Tableau II.4 : Températures enregistrées à la station de Matemour (1985-2016).....	24
Tableau II.5 : Humidité moyenne mensuelle à la station de Mascara (1990-2010).....	25
Tableau II.6 : Valeurs d'indice d'aridité mensuelle de la station de Matemour.....	26
Tableau II.7 : Les valeurs de P/T déterminées par la méthode d'Euverte – station de Matemour.....	28
Tableau II.8 : Evapotranspiration potentielle annuelle (1985-2016) selon Thornthwaite – station de Matemour.....	32
Tableau II.9 : Résultats du bilan hydrique selon Thornthwaite – station de Matemour (1968-2011).....	33
Tableau IV.1 : Paramètres physiques et chimiques des eaux de l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada.....	53
Tableau IV.2 : Indices de classification de la qualité des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.....	63
Tableau IV.3 : Matrice de corrélation de Pearson globale des paramètres physico-chimiques pour l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada.....	66
Tableau IV.4 : Statistique descriptives des trois classes obtenues à partir de la CAH.....	68
Tableau IV.5 : Valeur propre et pourcentage de la variance exprimée.....	69
Tableau IV.6 : Poids factoriels des principales composantes principales (avec rotation varimax).....	69

Tableau IV.7 : Statistique sur les Indices de saturation des principaux minéraux présents dans les eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.....	71
Tableau IV. 8 : Les paramètres bactériologique de l'aquifère karstique.....	90
Tableau IV. 9: le poids (w_i) et poids relative (W_i) de chaque paramètre chimique.....	94
Tableau IV. 10: comparaison entre les résultats physico-chimique et bactériologique de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.....	95
Tableau V.1 : Les Côtes attribués aux différentes classes de la méthode DRASTIC.....	105
Tableau V.2: les classes de l'indice de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC.....	106
Tableau V.3 : Les indices de la recharge nette.....	107
Tableau V.4 : Les indices de paramètre milieu aquifère.....	108
Tableau V.5 : Les indices de paramètre type de sol.....	109
Tableau V.6 : Les indices de paramètre impact de la zone vadose	111
Tableau V.7 : Les indices de paramètre conductivité hydraulique	112
Tableau V.8 : Valeurs des côtes du paramètre type d'aquifère « G ».....	115
Tableau V.9 : Valeurs du paramètre Lithologie de l'aquifère « O ».....	115
Tableau V.10 : Valeurs du paramètre profondeur de la nappe « D ».....	115
Tableau V. 11 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode GOD selon (Murat et al. 2003) (In Ake et al. 2009).....	116

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les aquifères karstiques sont la principale ressource pour l'alimentation en eau potable et l'eau d'irrigation dans de nombreuses régions du monde. Les aquifères karstiques résultent d'un processus complexe de karstification et d'évolution au cours du temps. La karstification c'est un phénomène d'érosion physico-chimique lié à la capacité des minéraux composant des roches carbonatées (calcite, dolomite et aragonite) d'être soluble dans des eaux enrichies en gaz carbonique CO₂ (Crochet et Marsaud, 1997 in Al Fares, 2002). Ce type d'aquifère est très commun dans la région méditerranéenne. Les futures projections climatiques prévoient une diminution significative des précipitations dans la région méditerranéenne, ce qui peut entraîner la diminution de la qualité et de la quantité des approvisionnements en eau du karst. Par conséquent, les aquifères karstiques ont déclenché un intérêt et préoccupation au sein du grand public et de la communauté scientifique (Bouderbala et al. 2016 ; Hamad et al. 2017). Ainsi, de nombreux travaux pluridisciplinaires ont été réalisées afin d'étudier l'utilisation des eaux d'origine karstique pour la consommation humaine et l'irrigation et pour prévenir de future dégradation de sa qualité (Liu et al. 2019 ; Kazakis et al. 2018).

L'Algérie, située sur la rive sud de la Méditerranée, a un climat aride et semi-aride avec des écoulements superficiels limités. Les aquifères karstiques contribuent pour une large part au développement socio-économique de la population du pays (Bensaoula et al. 2007). Cependant, en raison de leur hydrogéologie unique et très spécifique, ils sont extrêmement vulnérables à la pollution. Plusieurs études sur les aquifères karstiques ont été menées, principalement dans le nord-ouest et nord-est de l'Algérie. Azzaz et al. (2008), par exemple, ont utilisé diverses méthodes pour caractériser le fonctionnement d'un système karstique dans les monts de Tlemcen au nord-ouest Algérien. De plus, Baali et al. 2015 ont utilisé l'hydrogéochimie et les isotopes ainsi des approches hydrogéologiques pour étudier un système de karst dans la région de Cheria à l'est de l'Algérie. Par ailleurs, Fehdi et al. (2015) ont utilisé des données hydrogéochimiques et isotopiques pour déterminer l'origine des eaux souterraines dans les aquifères karstiques du plateau de Tezbent, région de Tébessa, nord-est algérien, et les facteurs influençant sa composition géochimique.

L'étude actuelle a été réalisée sur l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada, situées au nord-ouest Algérien. Cet aquifère constitue une réserve d'eau importante dans la région. Cependant, la situation actuelle caractérisée par un manque de précipitations, une augmentation de la demande en eau due à l'intensification agricole, la croissance démographique et les activités anthropiques entraînent une détérioration de la qualité de l'eau de cet aquifère. A ce jour,

Introduction générale

aucune étude détaillée n'a été menée dans ce bassin pour l'évaluation de l'indice pour plusieurs fins de consommation.

Dans ce contexte notre travail a pour but d'actualiser les connaissances sur les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des aquifères karstiques des monts de Sidi Kada qui définissent sa qualité. En plus, La mise en évidence de la vulnérabilité et le risque de pollution chimique, du système aquifère de la région.

Cette thèse s'organise en cinq chapitres :

- Le 1^{er} chapitre : est consacré à la situation géographique et le cadre général de la zone d'étude.
- Le 2^{ème} chapitre: étude des paramètres climatologiques (type de climat, étude des précipitations, températures et bilan hydrique) et l'hydrologie de la région d'étude.
- Le 3^{ème} chapitre : traite la géologie et l'hydrogéologie du système d'aquifère karstique des monts de Sidi Kada. Cette partie est basée sur les études géologiques et hydrogéologiques réalisées sur la région.
- Le 4^{ème} chapitre: constitue l'objectif principal de ce travail, étude hydro-chimique (le suivi des paramètres physico-chimiques et leurs représentations cartographiques, analyse statistique multivariable, étude des ions majeurs), étude bactériologique ainsi qu'à l'étude de la qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine et à l'irrigation.
- Le 5^{ème} chapitre: estimation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la région, en se basant sur l'application de deux méthodes de vulnérabilité (DRASTIC et GOD) et la comparaison entre leurs résultats.

Chapitre I :

Cadre général de la

zone d'étude

Chapitre I : Cadre général de la zone d'étude

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons procéder la localisation de la zone d'étude, l'étude de ses caractéristiques morphométriques, physiques et hydrographique ainsi qu'un aperçu sur le contexte pédologique et socio-économique, dans le but de mieux comprendre la région avec toutes ces spécificités.

I.2. Situation géographique

La zone d'étude est située au Nord-Ouest de l'Algérie, à l'extrémité Sud du sous-bassin de l'oued Fekan qui s'étend sur une superficie de 1185 km². Du point de vue administratif, la région appartient à la wilaya de Mascara, cette dernière se situe dans le Nord-Ouest Algérien, elle est limitée:

- A l'Est par les Wilayas de Tiaret et Relizane.
- Au Nord par les Wilayas d'Oran et Mostaganem.
- A l'Ouest par la Wilaya de Sidi Bel Abbès.
- Au Sud par la Wilaya de Saida.

La zone d'étude est comprise entre les coordonnées géographiques 35°07' - 35°31' de latitude Nord et 0°0' - 0°26' de longitude Est. Elle couvre environ 856 km². Cette zone s'étend entre les monts de Beni Chougrane au Nord et les monts de Bouhanifia à l'Ouest et les monts de Saida à l'Est et au Sud (Figure I.1). L'altitude de la zone d'étude varie entre 427 m au Nord-Ouest et 1200 m au Sud (Monts de Sidi Kada).

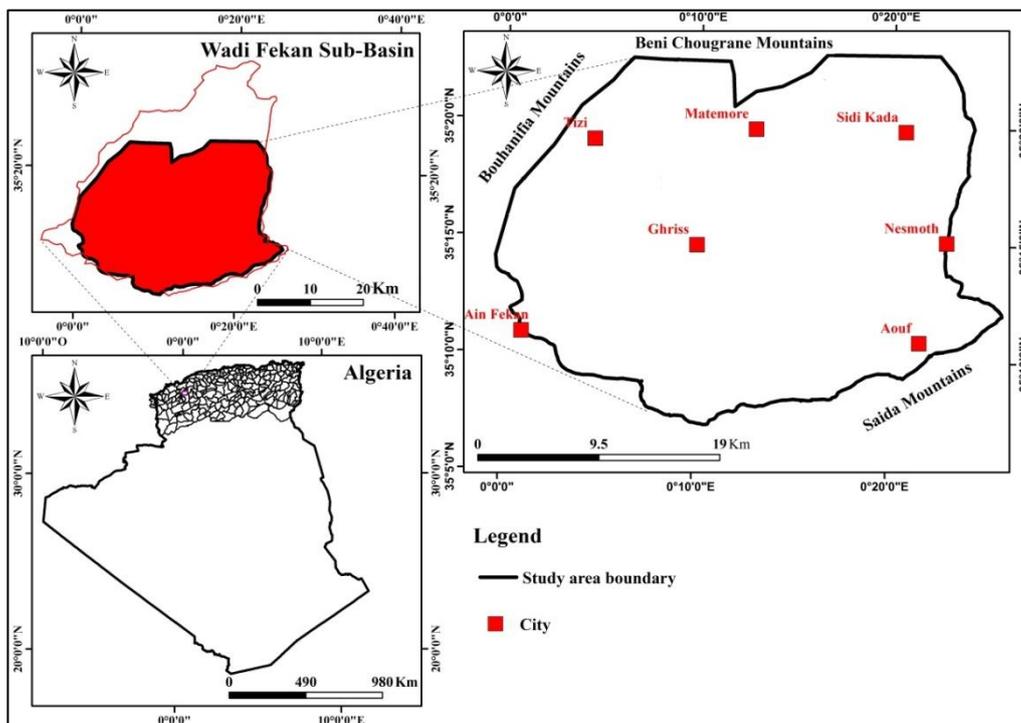


Figure I.1 : situation géographique de la zone d'étude.

I.3. Caractéristiques de forme

I.3.1. Le modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain est une représentation numérique et mathématique de l'altitude d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique, dans un système référentiel bien défini (Ouédraogo et al. 2014). Le MNT reste l'une des plus importantes sources de données utilisées pour l'extraction de nombreux paramètres utilisés tels que la pente, la direction d'écoulement de l'eau, l'indice topographique, etc. Ces paramètres sont régulièrement utilisés comme outils de décision dans la gestion de l'environnement (Carter 1988).

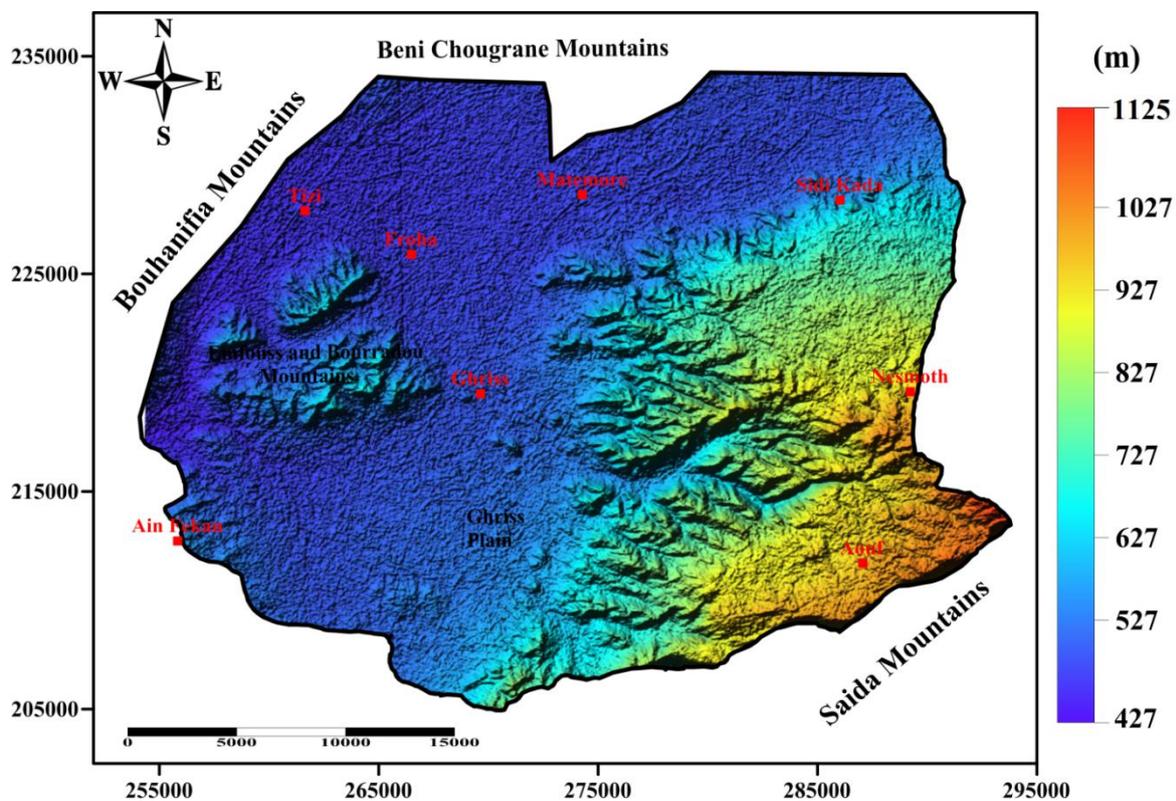


Figure I.2 : Modèle numérique du terrain de la zone d'étude.

I.3.2. La surface (S)

La surface du bassin versant intervient dans le calcul de lame d'eau ruisselante et aussi dans l'indice de forme, la densité de drainage...etc. La surface de notre bassin est de 856 km².

I.3.3. Le périmètre (P)

Le périmètre de la zone d'étude correspondant à une valeur de 126.4 km.

I.3.4. Le coefficient de compacité de Gravelius

La forme du bassin peut être exprimée par la détermination d'un paramètre communément appelé indice de compacité de Gravelius (K_C) selon la formule suivante :

$$K_C = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} = 1.21 \quad \text{I.1}$$

Avec :

K_C : Coefficient de Gravelius ;

P : Périmètre du bassin versant en (Km) ;

S : Surface du bassin versant en (Km^2).

Cet indice de compacité est égal ou proche à « 1 » pour un bassin versant de forme quasiment circulaire (forme plus ou moins ramassée) et supérieur à « 1 » lorsque le bassin est de forme plus ou moins allongée (Dahmani, 2010). Dans notre cas le coefficient de compacité est supérieur à 1. Cette valeur indique que le bassin est de forme allongée.

I.3.5. Rectangle équivalent

Ce paramètre a été introduit par M. ROCHE. Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius est conforme à la représentation graphique du bassin sous forme d'un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie (Zaidi, 2016). La longueur (L) et la largeur (l) de rectangle calculées par les équations suivantes :

a) La longueur du rectangle équivalent (L)

$$L = \frac{K_C \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{(1.12)^2}{(K_C)^2}} \right] \quad \longrightarrow \quad L = 43.57 \text{ Km} \quad \text{I.2}$$

b) La largeur du rectangle équivalent (l)

$$l = \frac{K_C \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{(1.12)^2}{(K_C)^2}} \right] \quad \longrightarrow \quad l = 19.65 \text{ Km} \quad \text{I.3}$$

I.3.6. Etude de relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'altitude au ruissellement des eaux de surface (Fatih, 2009). L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (températures, précipitations et la morphologie du bassin...etc).

Chapitre I : Cadre général de la zone d'étude

I.3.6.1. La courbe hypsométrique

La figure I.3 montre la courbe hypsométrique, elle représente le pourcentage des surfaces cumulées en fonction des altitudes. A partir de la courbe hypsométrique, nous déterminons les altitudes caractéristiques du bassin.

Tableau I.1 : Répartition altimétrique de la région d'étude.

Altitudes (m)	Superficies partielles S_i (Km ²)	Superficies partielles S_i/S_t (%)	Superficies cumulées $\sum S_i$ (Km ²)	Superficies cumulées $\sum S_i/S_t$ (%)
427 – 500	335.5	39.19	335.5	39.19
500 – 600	203.15	23.73	538.65	62.92
600 – 700	83.3	9.73	621.95	72.65
700 – 800	89.03	10.40	710.98	83.05
800 -900	64.08	7.49	775.06	90.54
900 - 1000	58.10	6.79	833.16	97.33
1000 - 1125	22.84	2.67	856	100

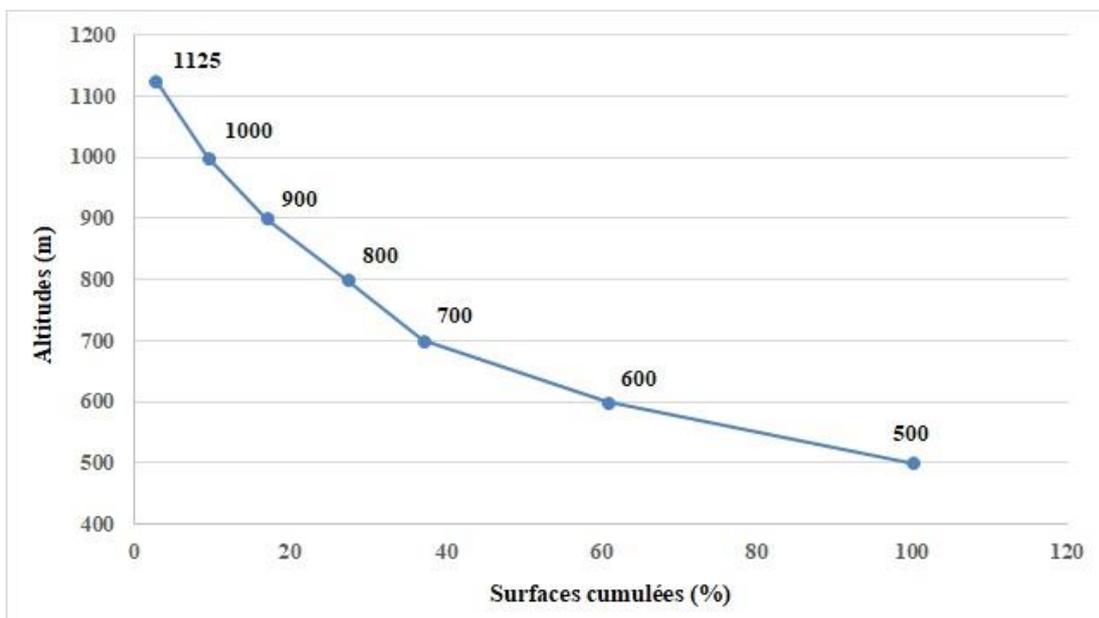


Figure I.3 : La courbe hypsométrique.

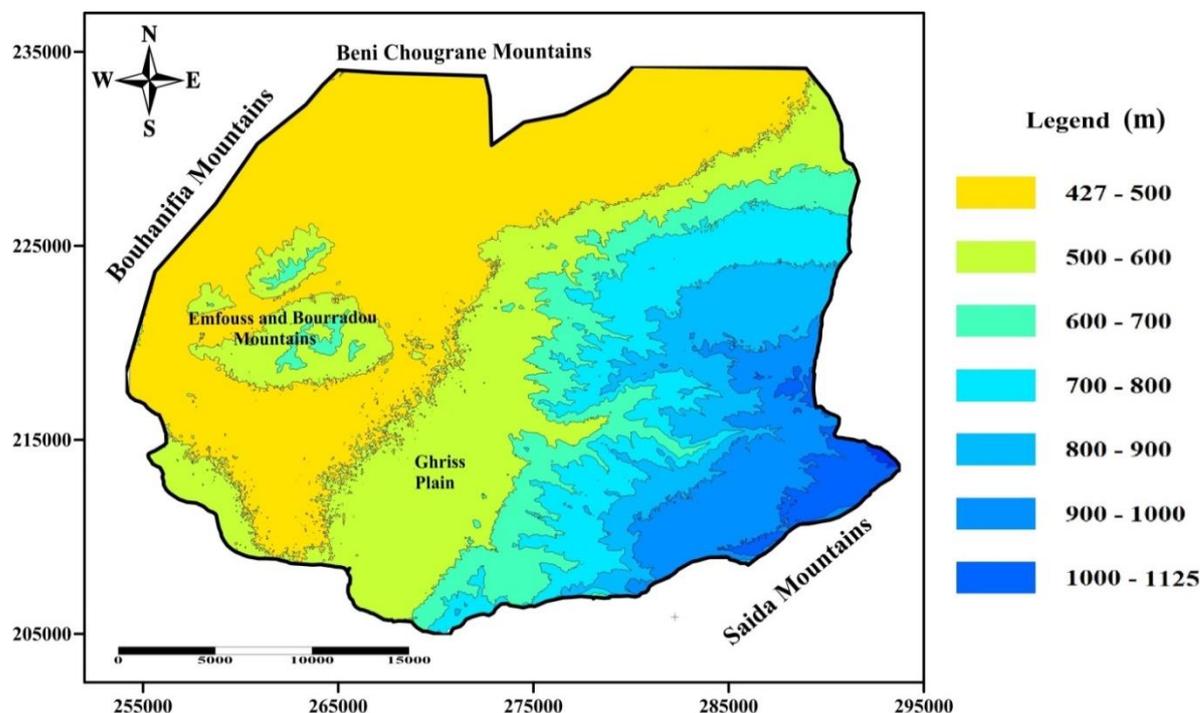


Figure I.4 : La carte des altitudes de la zone d'étude.

I.3.6.2. Les altitudes caractéristiques

A partir de la courbe hypsométrique et les histogrammes des fréquences altimétriques, nous avons établi les altitudes caractéristiques du bassin :

a- Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin ($H_{\max} = 1125$ m) tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire ($H_{\min} = 427$ m). Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente (Achour, 2014).

b- L'altitude la plus fréquente

L'altitude la plus fréquente correspondante au maximum du diagramme des fréquences altimétriques. On parlera alors de classe modale ou classe d'altitude la plus répandue sur le bassin : $H_{\text{fréq}} = 427$ m.

Chapitre I : Cadre général de la zone d'étude

c- L'altitude médiane (ou altitude de fréquence 1/2)

Elle s'agit de la valeur de l'altitude qui divise l'aire du bassin de façon à ce que 50% de la superficie du bassin se caractérise par des côtes supérieures et l'autre moitié par des côtes inférieures (Bekkoussa, 2020). Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. Sur une courbe hypsométrique, l'altitude médiane est donnée par la valeur de la côte correspondant à une fréquence de 50%

$$(H_{\text{méd}} = 650 \text{ m})$$

d- L'altitude moyenne

L'altitude moyenne correspondante au rapport de la somme des volumes partiels à la surface totale du bassin est calculée par la formule suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum H_i s_i}{S} = 612.58 \text{ m} \quad \text{I.4}$$

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ;

s_i : Surface partielle comprise entre deux courbes de niveau (Km^2) ;

S : Surface totale du bassin versant (856 Km^2).

Les valeurs de (H_i) et ($H_i s_i$) sont représentées dans le tableau I.2

Tableau I.2 : la répartition des altitudes moyennes entre deux courbes de niveau

Altitudes (m)	H_i en (m)	S_i en (Km^2)	$H_i * S_i$
427 – 500	463.5	335.5	155504.25
500 – 600	550	203.15	111732.5
600 – 700	650	83.3	54145
700 – 800	750	89.03	66772.5
800 -900	850	64.08	54468
900 - 1000	950	58.10	55195
1000 - 1125	1162.5	22.84	26551.5
		$\Sigma = 856$	$\Sigma = 524368.75$

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques. Donc l'altitude moyenne de notre région est de $H_{\text{moy}} = 612.58 \text{ m}$.

I.3.7. Les indices des pentes

Leur connaissance est d'une grande importance car il est évident que les eaux ruissellent d'autant plus que la pente des versants est grande. Ils se déterminent à partir de la répartition hypsométrique du bassin (Kefifa, 2014). Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications.

a- Indice de pente globale

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global. Ce dernier est calculé à partir de la courbe hypsométrique, c'est le rapport de la dénivelée du bassin à la longueur du rectangle équivalent.

$$I_g = \frac{D}{L} = \frac{H_{95\%} - H_{5\%}}{L} = 0.0140 \quad \text{I.5}$$

$$I_g = 1.40 \text{ m/km}$$

Avec :

I_g : L'indice de pente globale ;

D : La dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$;

$H_{5\%}$: L'abscisse à 5% dans la courbe hypsométrique (1050 m) ;

$H_{95\%}$: L'abscisse à 95% dans la courbe hypsométrique (520 m) ;

L : La longueur du rectangle équivalent.

L'application numérique donne la valeur de l'indice de pente global (I_g) égale à 0.0140. D'après la classification des hydrologues de l'Orstom (Tableau I.3), le relief de notre bassin est modéré.

Tableau I.3 : Classification du relief selon l'Office de recherche scientifique des Travaux
Ostre – Mère (O.R.S.T.O.M)

Types de relief	I_g
Relief très faible	$I_g < 0.002$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.1$
Relief très fort	$0.1 < I_g$

b- Indice de pente de Roche

L'indice de pente I_p également défini par ROCHE en 1963, à partir du rectangle équivalent est égal à :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i (a_i - a_{i-1})} = 1.05 \% \quad \text{I.6}$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent (m) ;

X_i : Fraction de la surface du bassin comprise entre les cotes (a_i) et (a_{i-1}) ;

($a_i - a_{i-1}$) : La dénivelée en (m).

Tableau I.4 : Données pour le calcul de l'indice de ROCHE

Altitude	X_i (Km ²)	$(a_i - a_{i-1})$ en (m)	$\sqrt{X_i (a_i - a_{i-1})}$
1000 – 1125	22.84	125	53.43
900 – 1000	58.1	100	76.22
800 – 900	64.08	100	80.05
700 – 800	89.03	100	94.36
600 – 700	83.3	100	91.27
500 – 600	203.15	100	142.53
427 – 500	335.5	73	156.50
			$\Sigma = 694.36$

c- Indice de pente moyenne

C'est le rapport de la dénivelée moyenne à la longueur du rectangle équivalent. Il est exprimé par la formule suivante :

$$I_{pmoy} = \frac{D}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} = 0.16 \% \quad \text{I.7}$$

La figure I.5 montre des classes de pente est générée à partir du MNT. Elle est composée de quatre classes: faible, modérée, forte et très forte.

La carte de classification des pentes de la région d'étude (Figure I.5) fait ressortir des pentes faibles au Nord et au Centre de la région (la plaine de Ghriss), des pentes fortes et très forte au Sud de la région (les monts de Sidi Kada) et un peu au Nord-Oeust (les monts d'Emffouss et Bouraddou).

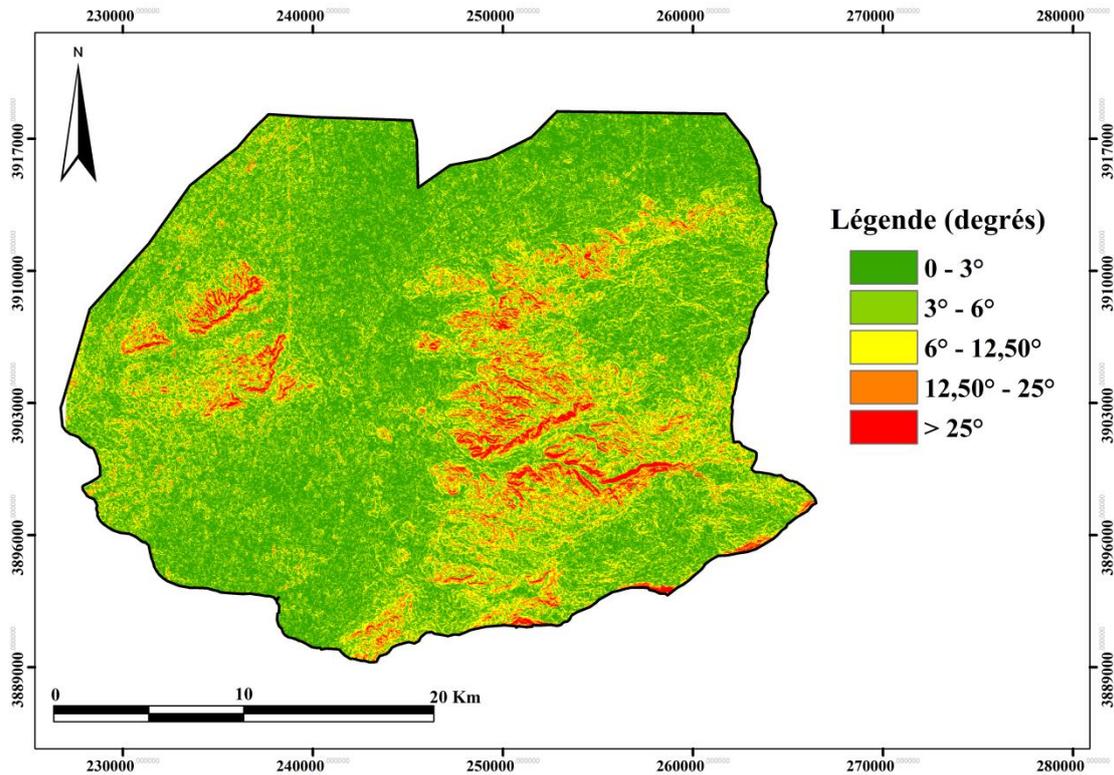


Figure I.5 : La carte des pentes de la région d'étude

I.3.8. La dénivelée

Bien souvent, on définit la "dénivelée D" comme étant la différence de côte entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$:

$$D = H_{95\%} - H_{5\%} = 530 \text{ m} \quad \text{I.8}$$

I.3.9. La dénivelée spécifique

Elle est calculée pour la classification des bassins versant, cette dernière ne présente pas l'inconvénient de l'indice de pente globale I_g , elle est donnée par la relation suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{S} = (D/L) * \sqrt{S} = 410 \text{ m} \quad \text{I.9}$$

Avec :

I_g : L'indice de pente globale (m/Km) ;

S : Surface totale du bassin (Km^2);

D : La dénivelée (m);

L : longueur du rectangle équivalent (m).

Chapitre I : Cadre général de la zone d'étude

Tableau I.5 : Classification du relief selon D_s par l'O.R.S.T.O.M

Type de relief	D_s (m)
Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$500 < D_s$

Nous constatons que la valeur de dénivelée spécifique est de 410 m. D'après la classification de l'O.R.S.T.O.M (Office de Recherche Scientifique des Travaux Outre Mère) donnée dans le tableau précédent, nous pouvons juger notre région est de relief fort.

Alors à la lumière des deux classifications d'O.R.S.T.O.M on peut dire que le bassin versant de la zone d'étude se caractérise par un relief modéré à fort.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau I.6.

Tableau I.6 : Caractéristiques hydro-morphométriques du notre secteur d'étude

Caractéristique		Unité	Valeur
Surface		Km ²	856
Périmètre		Km	126.4
Altitudes	Maximale (H_{max})	m	1125
	Moyenne (H_{moy})		612.58
	Minimale : (H_{min})		427
	Fréquente : ($H_{fréq}$)		427
	Médiane : ($H_{méd}$)		600
	$H_{5\%}$		440
	$H_{95\%}$		1050
Longueur du rectangle d'équivalent		Km	43.56
Largeur du rectangle d'équivalent		Km	19.65
Coefficient de Gravelius		/	1.21
Indice de pente globale		m/Km	1.40
Indice de pente de Roche		%	1.05
Indice de pente moyenne		%	0.16

La dénivelée	m	610
La dénivelée spécifique	m	410

I.4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des artères de drainage permanents ou temporaires où s'écoulent les eaux de ruissellement ou ceux restitués par les nappes souterraines sous forme de sources. Le réseau hydrographique est une des caractéristiques les plus importantes pour une région donnée, il peut prendre une multitude de forme.

La région d'étude est constituée par un chevelu hydrographique embryonnaire avec une ramification prononcée dans les reliefs de bordure (Dahmani, 2010). Les eaux de ruissellement sont collectées par deux grandes artères fluviales, l'oued Froha et l'oued Maoussa, dont les sources se situent respectivement dans les monts de Sidi Kada et les monts des Béni Chougrane. Ces deux affluents se rejoignent au niveau de Tizi pour rejoindre l'oued Fekan (Figure I.6).

Une description sommaire des caractéristiques de chaque oued est donnée dans les paragraphes suivants:

- **Oued Froha**

L'oued Froha, provenant des monts de Sidi Kada, ne transporte que de rares galets calcaréo-dolomitiques (érosion chimique des dolomies et calcaires des monts de Saïda) et s'infiltré dans les alluvions avant d'atteindre la ville de Ghriss (Sourisseau, 1972). Le régime de cet oued est caractérisé par des débits de base nuls à la station de Ghriss, ce qui est typique d'un régime fortement influencé par le contexte karstique comme le confirment la montée des eaux et les crues très rapides après les averses de pluie.

- **Oued Maoussa**

L'oued Maoussa prend naissance sur le plateau d'El Bordj (nord de la zone d'étude), il coule du nord vers le sud en entaillant des gorges profondes dans les reliefs des bordures de la plaine par érosion mécanique dans les matériaux meubles de Béni Chougrane, au-delà de la localité de Maoussa, il rejoint la plain où il s'infiltré. Une station de jaugeage a été installée en amont de la ville de Maoussa pour le contrôle des apports. L'oued Maoussa est caractérisé par un débit de base compris entre zéro et quelques litres par seconde.

- **Oued Fekan**

Prend sa source à l'ouest de Tizi au niveau de Ain Fekan, cet Oued à un rôle très important sur le régime des eaux souterraines profondes et de surfaces, car il véhicule l'écoulement de surface le plus appréciable de la région. Une station de jaugeage a été installée au niveau de l'embouchure du bassin à la cote 430 mètres pour le contrôle des apports. Le débit d'étiage de l'oued Fekan est négligeable pour la période 1970-2002. Malgré ce très faible débit, on a noté des crues instantanées de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ dans les années 70 (Sourisseau, 1972).

Par ailleurs, le chevelu hydrographique est plus développé sur les reliefs que dans la région.

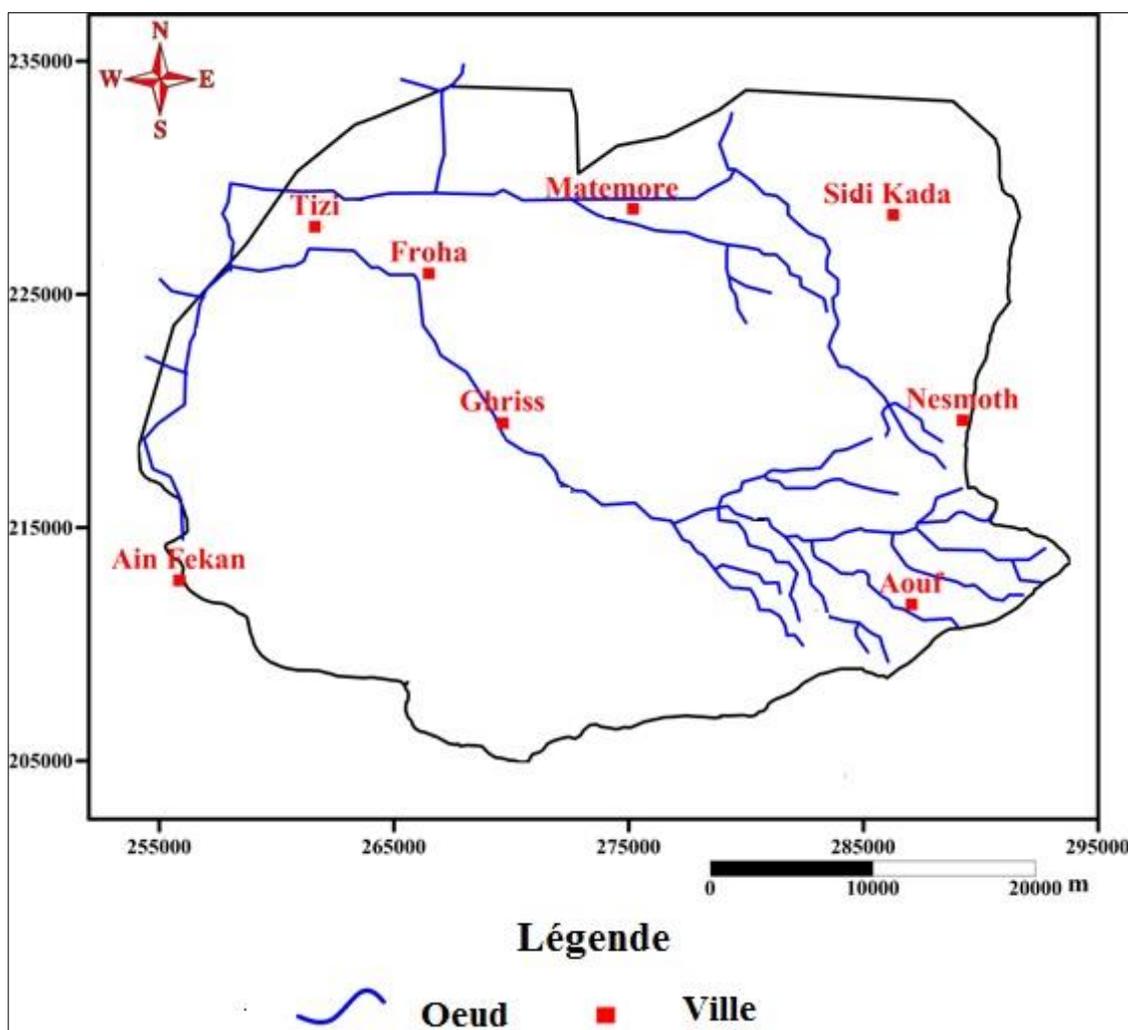


Figure I.6: Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude.

I.5. Contexte socio-économique

La population de notre région d'étude est estimée au 1^{er} Janvier 2016 à 139 194 habitants, avec un taux d'accroissement moyen de 2.03 %. Soit une progression de 0.22 % par rapport à l'année précédente.

Chapitre I : Cadre général de la zone d'étude

Cette population est concentrée dans quelques communes, tel que Ghriss (32 938 hab), Sidi Kada (23 556 hab), Matemour (17 334 hab), Aouf (9 012 hab), Nesmoth (6 317 hab), Froha (15 734 hab), Tizi (14 769 hab), Ain Fekan (13 554 hab) et Makdha (5 980 hab) (DPSB, 2016). Les agglomérations les plus importantes sont situées dans la partie centrale et occidentale de la zone d'étude.

La population de la région d'étude vit de l'agriculture et de l'élevage. Le secteur agricole produit essentiellement des cultures maraîchères en quantité considérables mais également des céréales et des fruits (Dahmani, 2010). Dans la région on élève également des bovins et des ovins pour la production du lait notamment dans le Sud.

La région est caractérisée par son potentiel agricole très important puisque plus de 85% de la superficie totale, soit plus de 77 464 ha est occupée par des terres agricoles exploitables. En production végétale, la céréaliculture représente 23647 ha, soit plus de 31% de la superficie agricole totale, la culture du vignoble 1307 ha (2%), la culture du fourrage 8621 ha (11%) et le maraîchage 11498 ha (15%) (DPSB, 2016). L'irrigation est assurée par l'exploitation des eaux souterraines. Le secteur industriel est moins important dans la région d'étude.

La Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires de la Wilaya de Mascara estime le débit total extrait du système aquifère de la région d'étude à plus de 58.5 millions m³/an. Un volume de 52.5 millions de m³/an est destiné pour l'irrigation agricole. En plus, l'alimentation en eau potable et les besoins de l'industrie totalisent un volume de plus de 06 millions de m³/an.

La source d'Ain Fekan est actuellement sèche (à un débit nul), elle s'est tarie à cause de la sécheresse et de la surexploitation de la nappe du jurassique. Il est à signaler qu'il n'existe dans la région qu'une seule retenue collinaire située dans la commune de Tizi avec une capacité de 130000 m³ (DPSB, 2016). Aucun barrage ou lacs naturels n'est implanté dans la région d'étude.

Du point de vue épuration des eaux usées, la région dispose d'une station de lagunage aéré, implantée à Ghriss avec une capacité de 4 500 m³ et quatre stations de lagunages naturels au niveau des communes suivantes : Tizi (2 100 m³), Froha (2 200 m³), Sidi Kada (3 000 m³) et Matemour (1 080 m³) (DPSB, 2016 ; Benfetta et al. 2017).

I.6. Les sols

La cartographie des sols de la région réalisée en 1970 à l'échelle 1/50.000° et reprise en 1994 au 1/20.000° a permis de mettre en évidence cinq (05) classes de sols.

a) Sols peu évolués

Cette classe de sols occupe une place importante. Ils sont localisés sur les dépôts alluviaux, colluviaux récents ou actuels (cônes de déjections des oueds). Ils sont bien représentés sur la partie Nord – Est de la région aux environs de l'oued Maoussa.

b) Verti-sols

Sols à superficie peu importante localisés dans quelques dépressions au centre de la région d'étude, autour de Froha et à l'Ouest de Tizi. Ces sols sont caractérisés par la présence de fentes de retrait et par une texture très argileuse.

c) Sols calci-magnésiques

Cette classe constitue la catégorie de sol la plus représentée dans le périmètre. Ce sont des sols des glacis Moulouyens à croûte calcaire dure et épaisse. Ce glacis prend une grande extension à l'Ouest de Matemore et au Sud – Ouest de Ghriss.

Une grande partie de ces sols est représentée par les rendzines qui sont des sols peu profonds trop riches en graviers et cailloux, formés sur des croûtes et encroûtements calcaires (Mechai, 1970).

d) Sols iso-humiques

Ils occupent des superficies moyennes et sont localisés surtout dans la partie Sud – Ouest du secteur d'étude dans l'axe Ghriss – Matemore. Ces sols à pédo-climat frais pendant les saisons pluvieuses sont représentés par le groupe de sols marron, formés sur croûte et encroûtement calcaire. On note la présence d'accumulation nodulaire au sein du profil (Sourisseau, 1972).

e) Sols à sesquioxydes de fer

Ces sols sont représentés par le groupe des sols rouges formés sous un climat de type méditerranéen, dans la petite vallée de l'oued Fekan, rive droite de l'oued Maoussa.

I.7. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre la géographie, la morphométrie et le réseau hydrographique de la région d'étude ainsi que ses caractéristiques physiques et socio-économiques. Ses paramètres morpho-métriques montrent que la surface totale est de 856 km² et un périmètre de 126.4 km.

Les altitudes de notre secteur d'étude varient entre 427 m au Nord-Ouest et 1125 m au Sud avec une moyenne de 612.58 m. Elle est caractérisée par un relief modéré à fort, donnant des pentes moyennes à faible allant jusqu'à 0.16 %. Notre bassin présente une forme relativement allongé ($K_c = 1.21$). La région est une agropole par excellence. Cependant, l'accroissement démographique, l'extension des activités agricoles et les déficits pluviométriques observés ces dernières années sont des facteurs qui exercent un forçage sur la qualité et la quantité de la principale ressource en eau de la région à savoir les eaux souterraines.

Chapitre II :

Etude Hydro-

climatique

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

II.1. Introduction

Les études hydro-climatologiques plus ou moins poussées sont indispensables pour une estimation fiable et une gestion rationnelle des ressources en eau superficielle et souterraine.

L'étude climatologique a pour but d'étudier les paramètres climatiques qui déterminent en grande partie l'écoulement de surface, d'estimer les volumes d'eau mis à la disposition des nappes souterraines, et de faciliter donc leur exploitation rationnelle. Le climat exerce donc une énorme influence sur notre vie. Toute notre vie sociale, économique et politique est influencée par le climat.

Pour tous les travaux d'aménagement, d'agriculture et les choix respectifs sont conditionnés par la connaissance des données climatiques. Toutes ces informations se trouvent dans les archives climatiques, établies à partir de plusieurs années d'observation et disponibles pour plusieurs localités au pays.

Le climat de l'Algérie est caractérisé par l'influence méditerranéenne, il est doux et tempéré, surtout dans la région Nord, mais l'Algérie est un pays très vaste d'une superficie d'environ 2.3 million de Km², dont une bonne partie de son territoire est désertique. L'Algérie du fait de sa situation géographique se caractérise par trois types de climat distinct répartis de la manière suivante : climat méditerranéen au nord, semi-aride au centre (hauts plateaux) et aride (le grand Sahara).

La région d'étude fait partie du second type. Dans ce qui suit, nous allons présenter les caractéristiques hydro-climatiques d'un bassin versant qui jouent un rôle important dans la connaissance de ses ressources en eaux souterraines, de surface et les processus d'alimentation.

II.2. Etude des paramètres climatologiques

II.2.1. La pluviométrie

L'étude pluviométrique sert à l'évaluation globale de la lame d'eau tombée qui a une influence sur la variation du niveau d'eau de surface et souterraine à travers le bassin versant étudié (Barcelo et Coudray, 1996). Pour analyser les variations climatiques dans la zone d'étude, nous avons utilisé des données climatiques fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A. N. R. H.), et nous avons retenu six (06) stations qui couvrent pratiquement tout le bassin étudié. Leurs distributions géographiques sont représentées dans la figure II.1. La pluviométrie moyenne annuelle totale pour la période 1969-2011 est estimée à une valeur de 346 mm/an. Nous avons réuni dans le tableau II.1 les différentes stations du bassin versant et leurs principales caractéristiques.

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

Tableau II.1 : Présentation des stations retenues pour l'étude des précipitations

N°	Code	Station	X (Km)	Y (Km)	Altitude (m)	Période d'observation	P moyennes annuelles (mm)
1	111405	Matemore	274.0	228.5	482	1969 – 2011	298.4
2	111418	Nesmoth	289.1	219.5	923	1969 – 2011	474.7
3	111424	Ghriss	269.5	219.4	511	1969 – 2011	303.5
4	111413	Tizi	261.5	227.8	452	1969 – 2011	346.6
5	111402	Froha	266.3	225.8	467	1969 – 2011	288.2
6	111414	Sidi Kada	285.9	228.3	549	1969 – 2011	364.6
Totale							346

II.2.1.1. La pluviométrie annuelle

Les valeurs des précipitations annuelles moyennes permettent de caractériser la pluviosité de chaque année. Nous note que les précipitations annuelles aux différentes stations ne varient pas toujours avec la même ampleur, ni même parfois dans le même sens (Figure II.1). Les valeurs minimales et maximales ne se placent pas partout aux mêmes dates mais en gros elles présentent les mêmes variations (Meddi et Humbert, 2000).

Au niveau des quatre stations, nous remarquons que l'année la plus pluvieuse est 1971 pour la station de Matemour et Tizi avec des apports de 469.5 mm et 524.6 mm, respectivement. L'année 1975 avec un apport de 695.1 mm pour la station de Ghriss et l'année 2008 avec un apport de 1033.1 mm pour la station de Nesmoth.

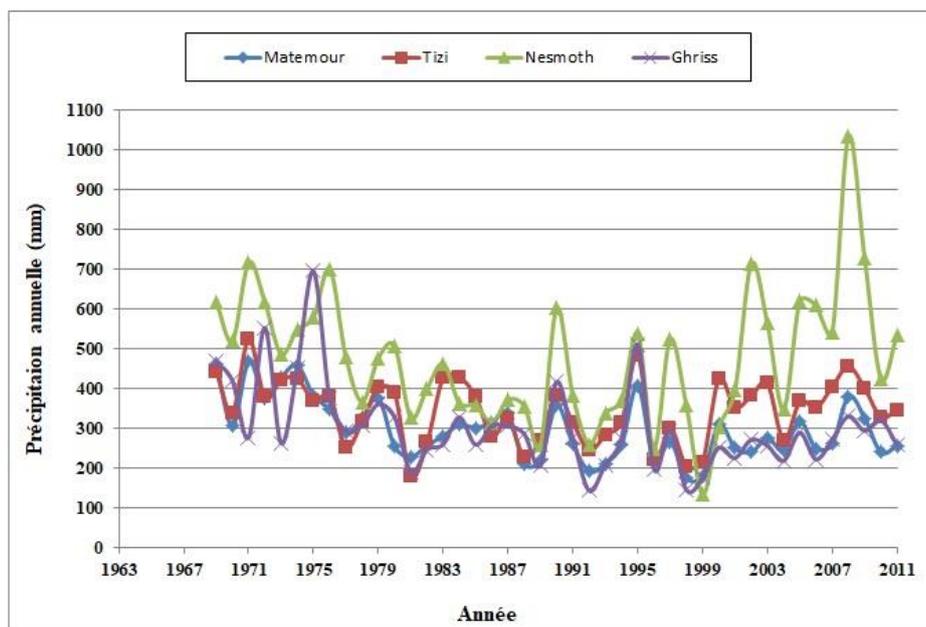


Figure II.1: Variations des précipitations annuelles pour les stations de Matemour, Tizi, Nesmoth et Ghriss sur la période (1969-2011).

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

La carte des précipitations moyennes annuelles observées sur une période de 42 ans (1969 - 2011), illustre la répartition spatiale des pluies sur toute la zone d'étude (Figure II.2), caractérisée dans son ensemble par une croissance du Nord-Ouest vers le Sud-Est, elle s'échelonne entre 270 mm à Ain Fekan à l'Ouest et 480 mm au niveau des hautes montagnes (les Monts de Sidi Kada et Nesmoth) à l'Est.

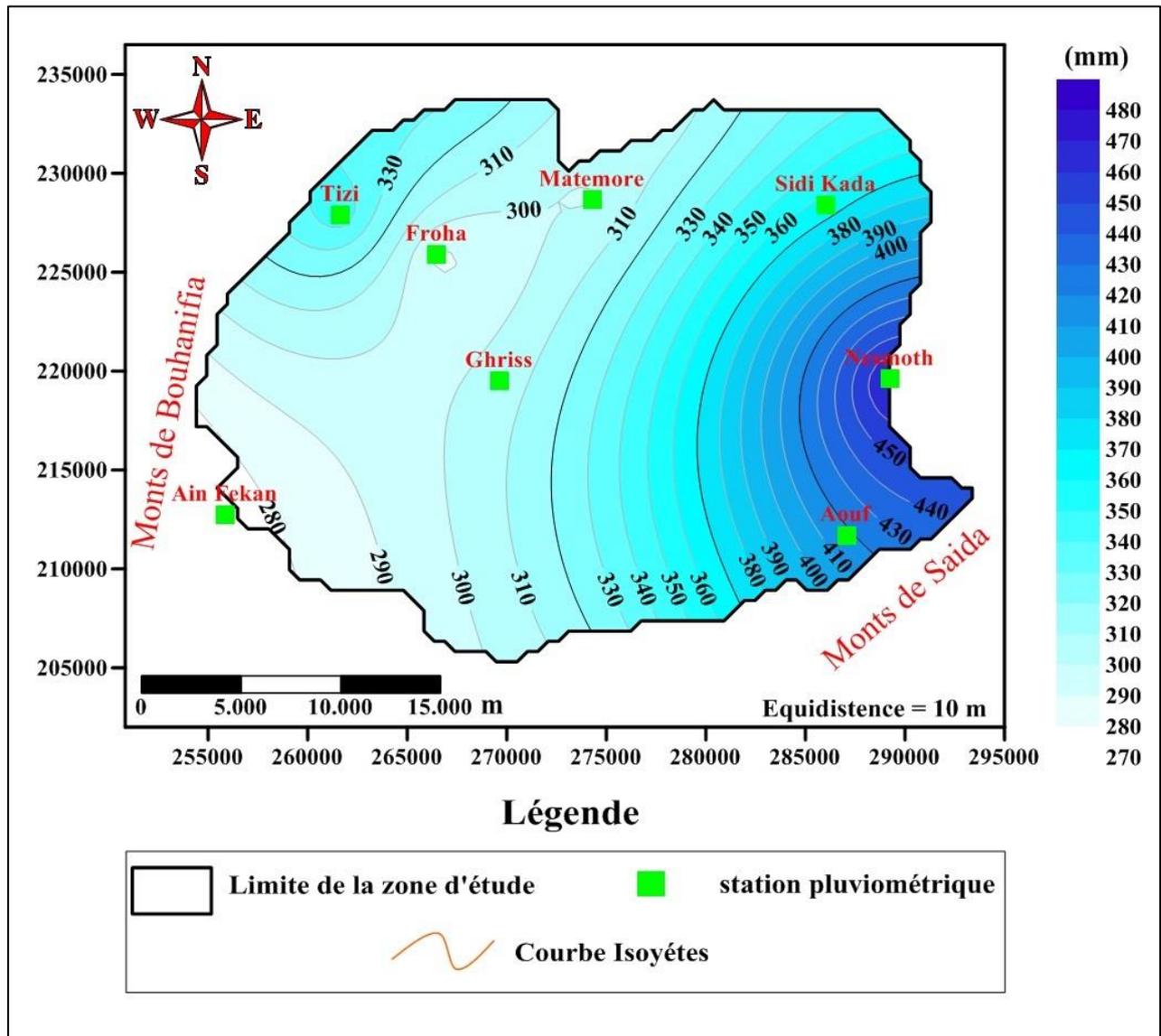


Figure II.2 : Carte en isohyètes des précipitations moyennes annuelles de la région d'étude (période : 1969 – 2011)

II.2.1.2. La pluviométrie mensuelle et saisonnière

Les précipitations moyennes mensuelles calculées pour les trois stations étudiées sont représentées sur le tableau suivant.

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

Tableau II.2: Précipitation moyenne mensuelle des stations (1969 – 2011)

Mois Station	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
Matemour	16.47	30.51	38.54	33.61	36.98	34.34	38.66	30.41	25.13	6.93	2.04	4.79
Nesmoth	19.27	40.81	60.74	55.33	70.16	60.61	59.61	46.79	43.40	7.79	3.67	6.58
Ghriss	18.70	27.40	38.29	37.96	36.68	39.59	35.68	29.90	21.01	8.88	2.92	6.46
Tizi	16.21	34.77	45.21	43.34	46.10	39.35	44.25	33.39	31.52	5.35	1.59	5.54

Les précipitations mensuelles enregistrées au niveau des 4 stations durant 42 années montrent que les mois les plus arrosés sont : novembre, janvier, février et mars tandis que les mois les plus secs sont : juillet et aout (Figure II.3). Durant la période 1969-2011, la moyenne mensuelle maximale des précipitations correspond au mois de janvier avec une valeur de 70 mm enregistrée à Nesmoth située dans la partie Sud-Est de la région d'étude. La moyenne mensuelle minimale, de l'ordre de 2 mm, a été enregistrée pendant le mois de juillet à Tizi.

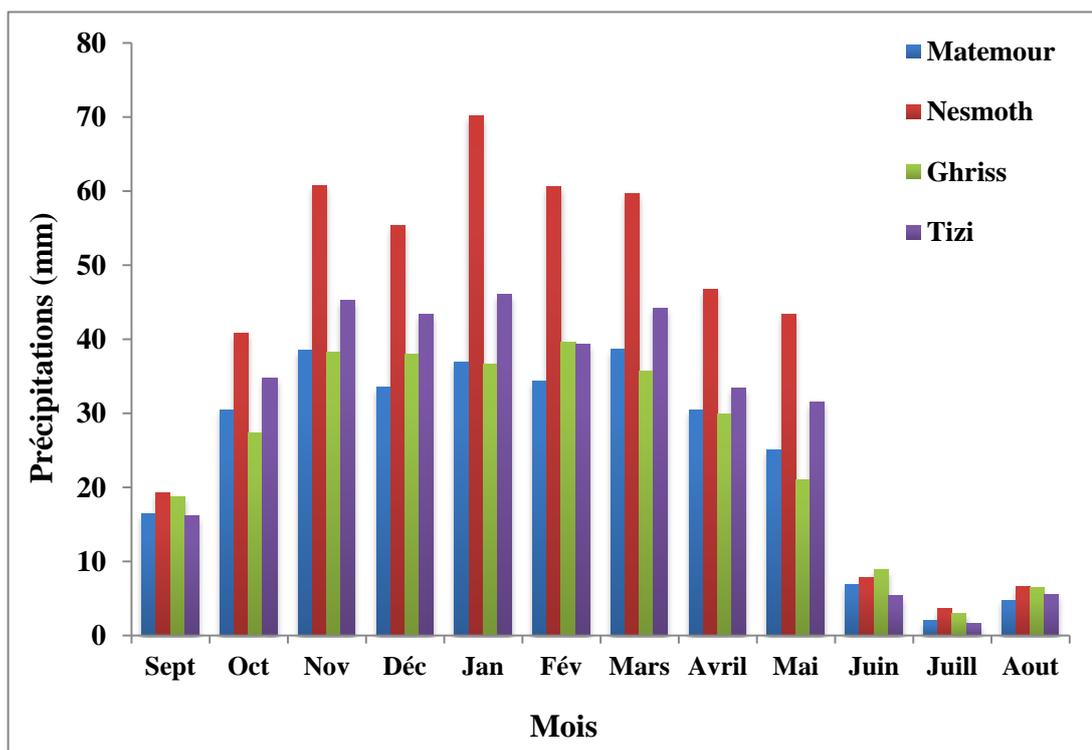


Figure II.3 : Variation moyenne mensuelle des précipitations aux stations d'observation. Période 1969 – 2011.

L'influence du régime saisonnier des pluies est important pour suivre les séquences de sécheresse et d'évaluer au mieux les indices climatiques (Tableau II.3).

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

Tableau II.3: Précipitation saisonnière des quatre stations (1969 – 2011)

Station \ Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Matemour	85.48	105.59	94.63	13.72
Nesmoth	120.33	186.01	148.96	18.00
Ghriss	84.33	115.00	86.78	18.40
Tizi	95.47	129.37	109.27	12.50

Les résultats obtenus (Tableau II.3) montrent que la saison hivernale est la plus pluvieuse pour les quatre stations étudiées ; (105.59 mm à Matemour, 186.01 mm à Nesmoth, 115 mm à Ghriss et 129.37 mm à Tizi). Le printemps est considéré comme la seconde saison pluvieuse, les précipitations enregistrées sont de l'ordre de 94.63 mm à la station de Matemour, de 148.96 mm à la station de Nesmoth, de 86.78 mm à la station de Ghriss et de 109.27 mm pour la station de Tizi. La saison estivale, reste la plus sèche pour toutes les stations, la pluviométrie enregistrée est la plus faible. Elle est de l'ordre de 18 mm pour Nesmoth et Ghriss, de 13 mm et 12 mm pour Matemour et Tizi respectivement (Figure II.4).

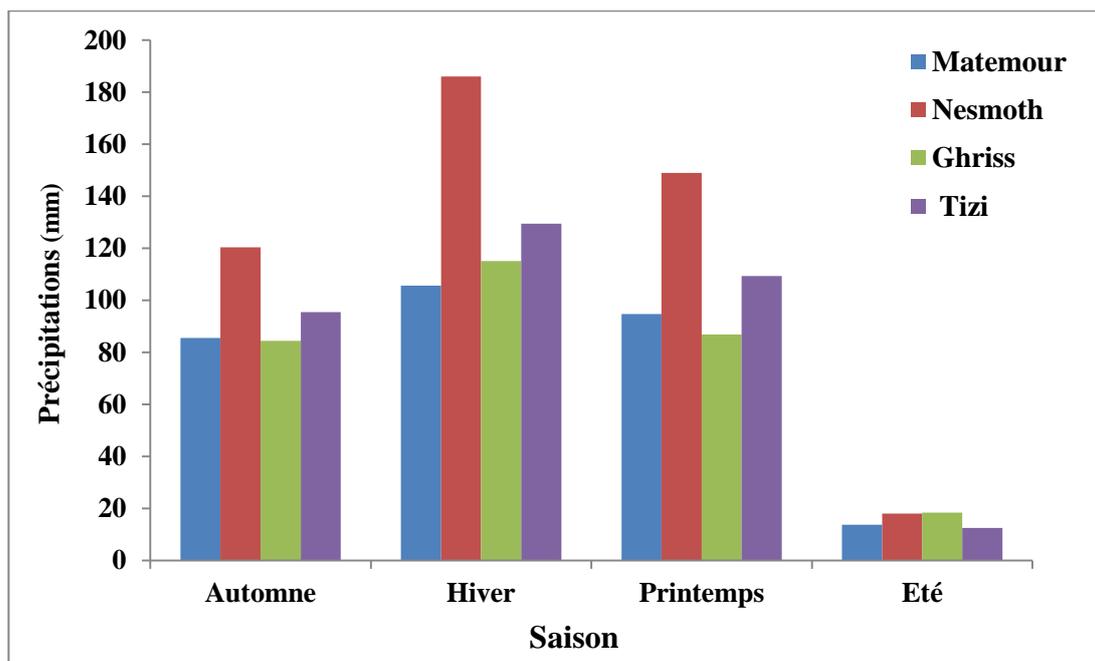


Figure II.4 : Histogramme des Précipitations saisonnières des quatre stations (1969 – 2011)

II.2.1.3. Le coefficient pluviométrique

Ce coefficient nous permet de distinguer si l'année considérée est excédentaire ou déficitaire. Une année est dite excédentaire (AE) si $CP > 1$, par contre elle sera considérée comme déficitaire (AD), dans le cas où $CP < 1$. Ce coefficient est calculé selon la formule suivante :

$$CP = P / P_{moy}$$

II.1

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

Avec :

CP : coefficient pluviométrique ;

P : pluviométrie d'une année considéré (mm) ;

P_{moy} : pluviométrie moyenne annuelle (mm).

Le coefficient pluviométrique nous a permis d'observer la variabilité interannuelle ainsi que les périodes de déficits et d'excédents (Figure II.5).

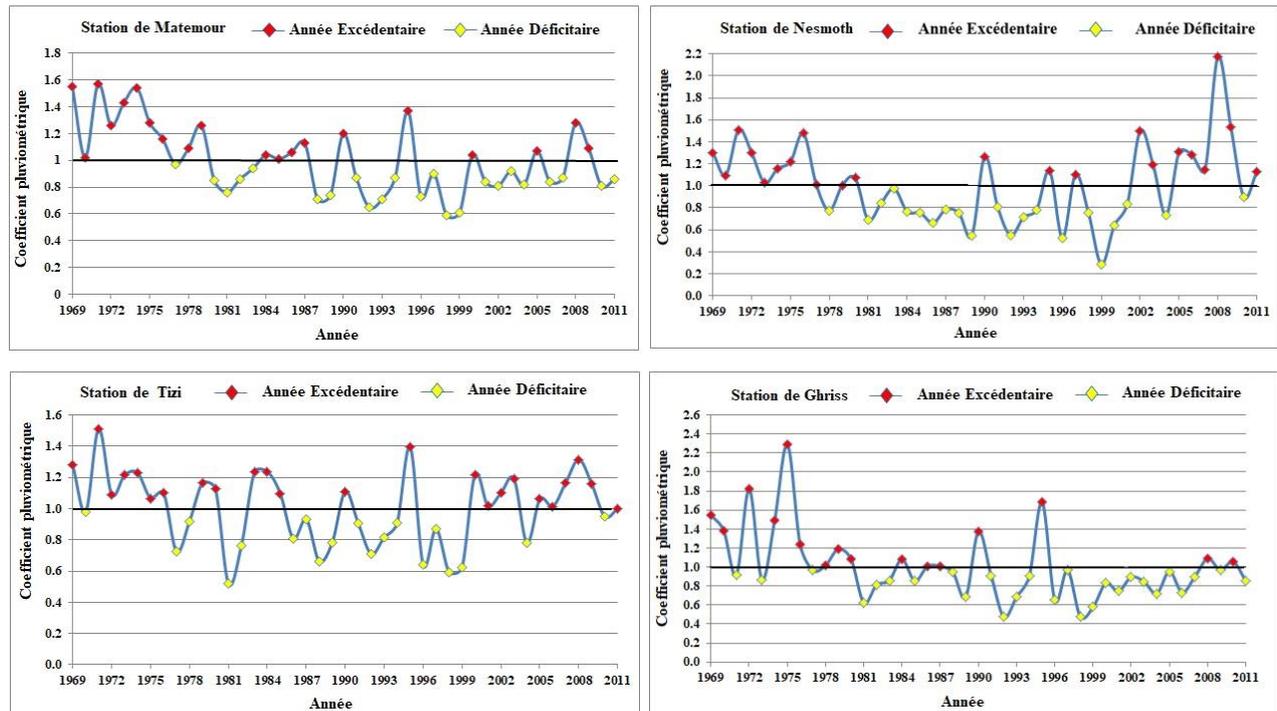


Figure II.5 : Coefficient pluviométrique pour quatre stations sur la période 1969-2011.

La période 1969-1980 est une décennie majoritairement excédentaire sauf l'année 1977 pour la station de Matemour, l'année 1978 pour la station de Nesmoth, les années (1970, 1977 et 1978) pour la station de Tizi et les années (1971, 1973 et 1977) pour la station de Ghriss.

Le coefficient pluviométrique de notre région révèle que la période déficitaire la plus sévère s'étale sur la période 1981-2011 à l'exception des quelques années excédentaires pour toutes les stations (Figure II.5). Ce phénomène se prolonge sur plusieurs années successives, ce qui indique une sécheresse importante et persistante (Bekkoussa, 2009 ; Dahmani, 2010).

Les années excédentaires les plus importantes pour les stations de Matemour et Tizi sont enregistrées en 1971 avec un coefficient pluviométrique égal à 1.57 et 1.51, respectivement. L'année 2008 représente l'année la plus humide pour la station de Nesmoth, avec un coefficient

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

pluviométrique estimé à 2.18. L'année 1975 est celle où on enregistre le coefficient pluviométrique le plus important (2.29) au niveau de la station de Ghriss.

II.2.2. La température

La température est un paramètre climatique déterminant qui intervient dans toutes les formules utilisées pour l'estimation de l'évapotranspiration. Les résultats du tableau II.4 résument les données concernant ce paramètre, mesurées uniquement à la station de Matemour.

Tableau II.4 : Températures enregistrées à la station de Matemour (1985-2016).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	An
Maxima	31.21	25.90	19.55	16.10	14.91	16.07	19.02	21.13	25.64	31.34	35.58	35.53	24.33
Minima	15.45	11.88	7.29	4.43	3.01	4.40	5.31	7.14	10.65	14.39	18.08	18.50	10.04
Moyenne	23.33	18.89	13.42	10.26	8.96	10.24	12.17	14.13	18.14	22.86	26.83	27.01	17.19

La période considérée s'étale de 1985 à 2016. L'observation des températures enregistrées montre :

- L'échelle mensuelle les hivers sont très froids et humides, les étés sont chauds et secs.
- La moyenne annuelle des températures est de 17.19 °C. Par ailleurs, la moyenne des températures annuelles maximales est de 24.33°C, alors que la moyenne des minima est de 10.04°C.

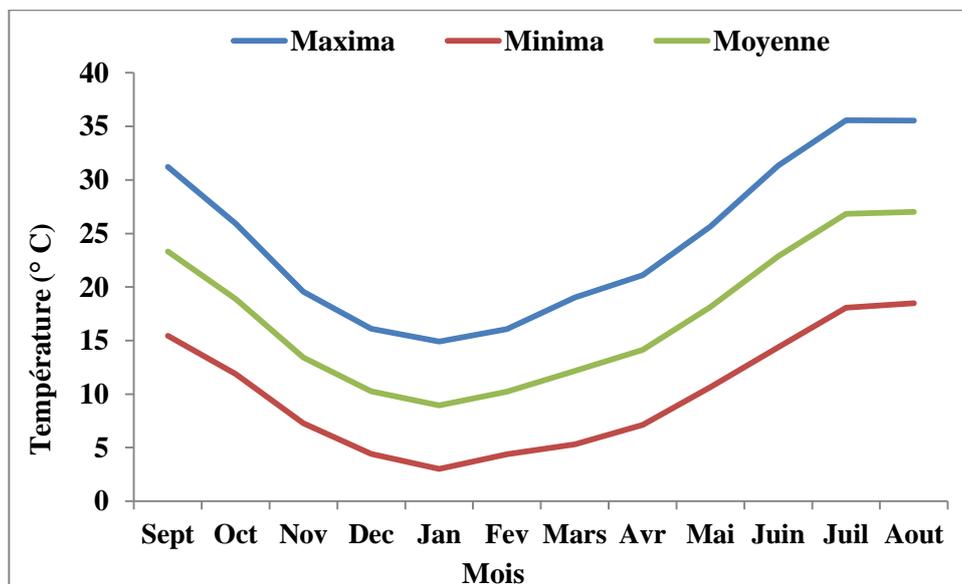


Figure II.6: Températures moyennes, minimales et maximales à la station de Matemour (1985-2016).

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

II.2.3. L'humidité

L'humidité utilisées se rapportent à la station de Mascara (station la plus proche de la région étudiée) durant 20 années d'observation (1990-2010).

L'humidité relative est le rapport entre la tension de vapeur d'eau « e » et la tension de vapeur saturant « ew » à la même température exprimée en % :

$$U = e / e_w * 100$$

II.2

Tableau II.5 : Humidité moyenne mensuelle à la station de Mascara (1990-2010).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	An
Humidité (%)	57.51	64.61	72.70	76.42	73.93	71.33	69.46	65.83	61.07	52.10	44.96	47.43	63.11

D'après l'humidité moyenne de chaque mois (Tableau II.5), on remarque que l'humidité maximale correspond aux mois compris entre novembre à mars où la valeur extrême est de 76.42 % enregistré au mois de décembre tandis que les valeurs les plus faibles sont enregistrées à partir du mois de juin jusqu'au mois de septembre où elles atteignent la plus faible teneur en juillet avec seulement 44.96 % (Figure II.7).

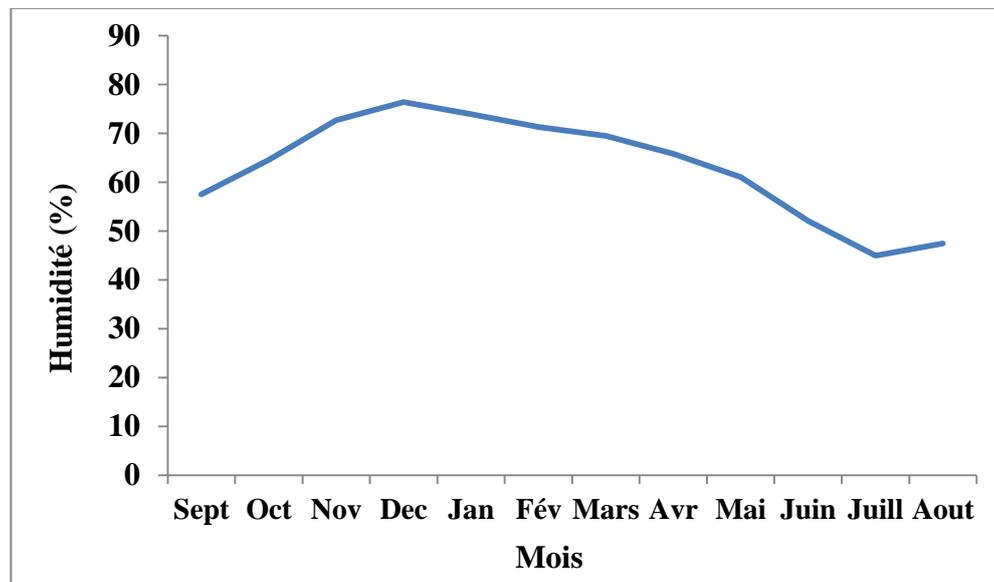


Figure II.7: Humidité moyenne mensuelle à la station de Mascara (1990-2010).

II.2.4. Le Vent

Les vents dominants sont du Nord-Ouest., les vents observés durant la journée sont :

- Le matin, de direction Ouest, et le soir, de direction Nord, toute l'année,
- A midi, de direction Nord de Mai à Octobre et Nord-Ouest le reste de l'année.

Les vents les plus forts sont observés au printemps (Mars en particulier). Les mois de janvier, octobre et décembre enregistrent par contre les forces les plus faibles. Les vents du Nord sont

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

répartis sur toute l'année à raison de 4 à 5 jours par mois (Semari et al, 2012). L'action des vents est surtout desséchante et augmente l'évapotranspiration (Bekkoussa, 2009).

II.3. Type du climat

II.3.1. Indice d'aridité De Martonne

a) Indice d'aridité annuelle « I »

Pour la détermination du type de climat de Martonne (1925) a proposé une formule climatologique appelée indice d'aridité qui est fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations moyennes annuelles :

$$I = P / T + 10 \quad \text{II.3}$$

Avec :

- **I** : indice d'aridité annuelle
- **P** : précipitations moyennes annuelles en mm.
- **T** : températures moyennes annuelles en °C.

Pour la station de Matemoure $I = 10.98$ tel que $P = 298.43$ mm et $T = 17.19$ °C

Suivant les valeurs de l'indice d'aridité, de Martonne a établi les classifications suivantes :

- $I < 5$ = climat hyper-aride
- $5 < I < 7.5$ = climat désertique
- $7.5 < I < 10$ = climat steppique
- $10 < I < 20$ = climat semi-aride
- $20 < I < 30$ = climat tempéré

On peut déduire facilement que le climat dominant dans notre région d'étude est de type semi-aride (Figure II.8).

b) Indice d'aridité mensuelle « i »

L'indice d'aridité mensuel i est donné par la formule suivante :

$$i = 12P / (T + 10) \quad \text{II.4}$$

Où P et T sont respectivement, les valeurs mensuelles moyennes des précipitations (mm) et des températures (°C).

Tableau II.6 : Valeurs d'indice d'aridité mensuelle de la station de Matemour

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	16.47	30.51	38.54	33.61	36.98	34.34	38.66	30.41	25.13	6.93	2.04	4.79
T (°C)	23.33	18.89	13.42	10.26	8.96	10.24	12.17	14.13	18.14	22.86	26.83	27.01
i	5.93	12.67	19.75	19.91	23.41	20.37	20.93	15.12	10.72	2.53	0.66	1.55

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

D'après les résultats représentés dans le tableau (II.6) on remarque que les mois de juin, juillet et aout sont caractérisés par un climat hyper aride, les mois de janvier, février et mars jouissent d'un climat tempéré. Le mois de septembre présente un climat désertique, alors que le climat semi-aride marque le reste des mois.

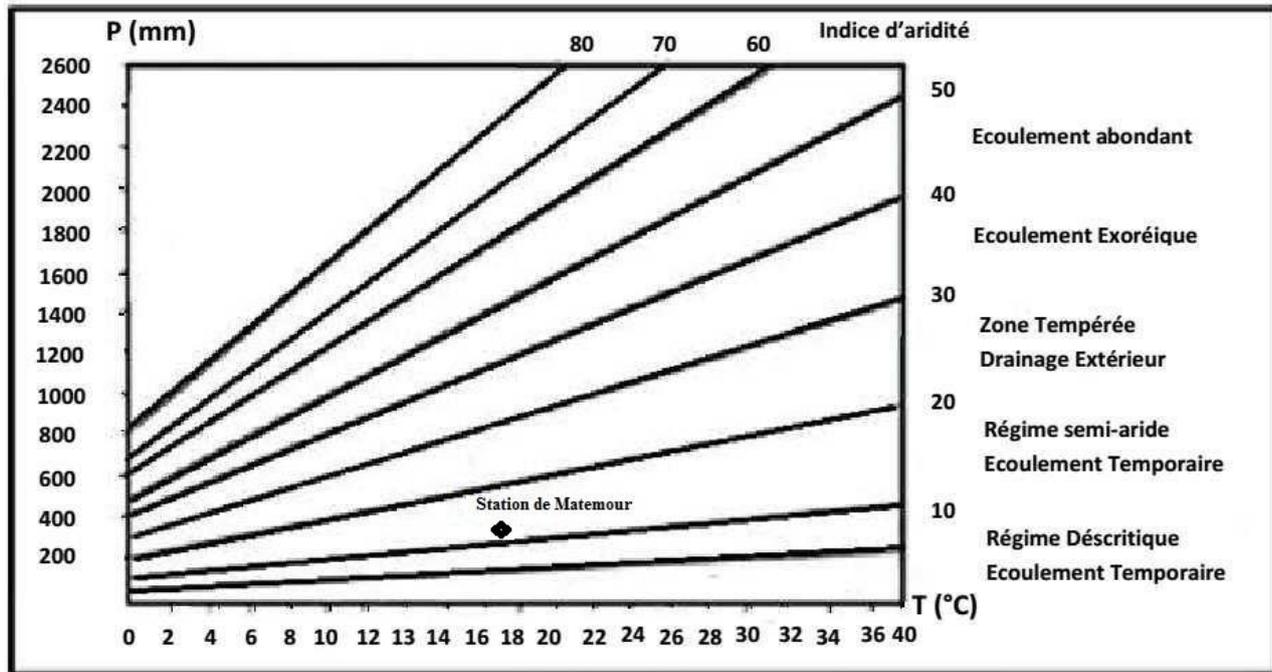


Figure II.8 : Abaque d'indice d'aridité annuel de la station de Matemour

II.3.2. Indice de Moral

L'indice de Moral est basé sur l'utilisation de la hauteur annuelle des précipitations (mm) et les températures moyennes annuelles (C°) et ceci pour délimiter l'humidité et la sécheresse. Avec $I_A < 1$ pour un climat sec et $I_A > 1$ pour un climat humide.

$$I_A = P / (T^2 - 10T + 200) \quad \text{II.5}$$

Pour la station de Matemour la valeur obtenue ($I_A = 0.92$) indique un climat sec caractérisant la région étudiée.

II.3.3. Diagramme Pluvio-thermique

Le diagramme pluvio-thermique de Gaussen et Bagnouls utilise les deux principaux paramètres climatiques, qui sont la température et les précipitations (Figure II.9), il permet de déterminer les saisons sèches et humides (Benhattab et al. 2014).

Les deux auteurs ont proposé une classification climatique basée sur la définition du «mois sec», pour lequel la relation $P \leq 2T$ est vérifiée et sur la durée de la saison sèche. Cette relation permet d'établir un diagramme pluvio-thermique pour lequel les températures sont portées à une échelle

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

double de celle des précipitations (Dahmani, 2010 ; Kefifa, 2014). L'établissement du diagramme pluvio-thermique a été réalisé en se basant sur les données climatiques réparties sur une période de plus de 40 ans pour la station de Matemour.

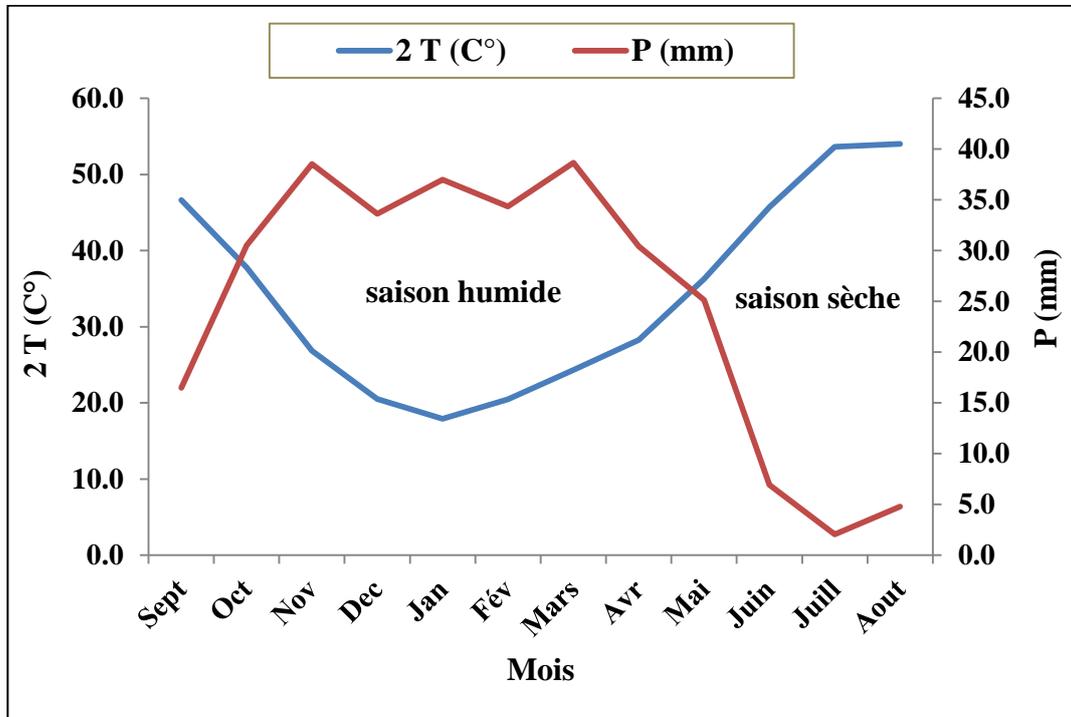


Figure II.9: Courbe pluvio-thermique de la station de Matemour.

L'analyse du diagramme pluvio-thermique (Figure II.9) montre que le déficit hydrique de la région d'étude s'étend du début du mois de mai jusqu'à le mois de septembre, c'est la période sèche. La période humide est comprise entre le mois d'octobre jusqu'à le mois de mai.

II.3.4. Méthode d'Euverte

Le rapport P/T établi mensuellement permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol, il permet également de définir trois types de régimes :

- Un régime très sec : $P/T < 1$
- Un régime sec : $1 < P/T < 2$
- Un régime humide : $P/T > 2$

Tableau II.7 : Les valeurs de P/T déterminées par la méthode d'Euverte – station de Matemour.

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	16.47	30.51	38.54	33.61	36.98	34.34	38.66	30.41	25.13	6.93	2.04	4.79
T (°C)	23.33	18.89	13.42	10.26	8.96	10.24	12.17	14.13	18.14	22.86	26.83	27.01
P/T	0.71	1.62	2.87	3.27	4.13	3.36	3.18	2.15	1.39	0.30	0.08	0.18

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

Selon le tableau ci-dessus, nous remarquons que les mois juin, juillet, aout et septembre présentent un régime très sec. Les mois octobre et mai présentent un régime sec, alors que le régime humide marque le reste des mois.

II.3.5. Climagramme d'Emberger

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 (Figure II.10). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds (Morat, 1969).

$$Q_2 = 2000 P / (M^2 - m^2) \quad \text{II.6}$$

Avec :

Q_2 : quotient pluviométrique d'Emberger ;

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

M: moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (en °K) ;

m: moyenne des températures minimales du mois le plus froid (en °K).

Sachant que : $T (^{\circ}\text{K}) = T (^{\circ}\text{C}) + 273.2$

Nous avons : $P = 298.43$ mm (pour la station de Matemour);

$M = 27.01$ °C = 300.21 °K (pour le mois d'Aout) ;

$m = 8.96$ °C = 282.16 °K (pour le mois de Janvier) ;

Ce qui donne une valeur de $Q_2 = 56.78$

On reporte la valeur de Q_2 obtenue sur l'axe des ordonnées et la valeur de la moyenne des minimums du mois le plus froid (8.96 °C) sur l'axe des abscisses, on conclut alors que la région appartient à une zone semi-aride à hiver chaud (Figure II.10).

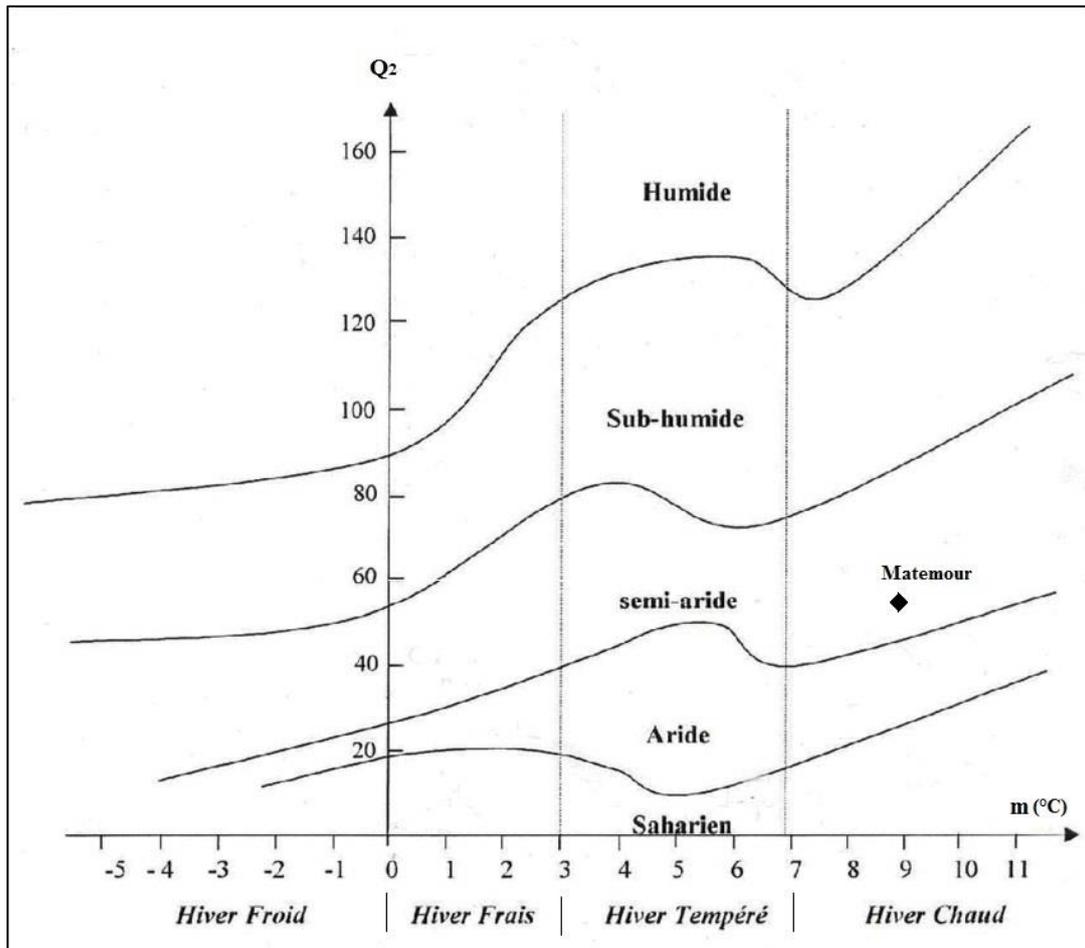


Figure II.10 : Climmagramme d'Emberger de la station de Matemour

II.4. Bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus qui suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de s'évaporer dans l'atmosphère (Kachi, 2007). Le bilan de l'eau est fonction d'un certain nombre de facteurs, dont les précipitations, l'infiltration et surtout l'évapotranspiration (Younssi, 2009). Il nous permet d'évaluer les effets du climat sur l'écoulement dans le bassin versant et tient compte uniquement des entrées et des sorties, qui s'effectuent par voie atmosphérique. L'équation du bilan hydrique s'exprime par la relation :

$$P = ETR + R + I \quad \text{II.7}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

R : ruissellement en (mm) ;

I : infiltration moyenne en (mm) ;

ETR : évapotranspiration réelle.

II.4.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration (ET), regroupe les phénomènes d'évaporation et de transpiration qui correspondent à la quantité d'eau extraire par l'évaporation sous forme de vapeur d'eau et celle du flux d'évaporation à travers les racines des plantes et les pores des feuilles (Seghir, 2008).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau pouvant être restituée à l'atmosphère par transpiration des êtres vivants et évaporation du sol et des surfaces d'eaux libres ou elle définit comme l'évaporation à partir d'une surface de gazon court, poussant activement, recouvrant totalement le sol de hauteur uniforme et bien pourvue en eau (Sedrati, 2011 ; Kettab et al. 2004).

Nous utilisons la formule de Thornthwaite pour l'estimation de l'ETP.

a) Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par la formule de Thornthwaite, 1954

Thornthwaite (1954) considère que pour des étendues de surface assez vastes et des pas de temps assez longs, le facteur le plus prépondérant pour l'ETP est la température (Bi Tié Aber et al. 2006). C'est la méthode la plus adaptée à notre région. Elle est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride. Étant donné que notre région se trouve soumise à la fois aux influences climatiques méditerranéennes et sahariennes, le climat est semi-aride, cette formule a été appliquée (Loáiciga et al. 2000). Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). Selon cette méthode, l'estimation de l'ETP s'effectue à l'aide d'une formule empirique permettant de calculer le pouvoir évaporant (en mm) pour chaque mois.

$$ETP(mm) = 16 \left(\frac{10.T}{I} \right)^a .K \quad \text{II.8}$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle en mm ;

T : température moyenne mensuelle en °C ;

I : somme des indices thermiques mensuels i : $I = \sum i = \sum \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$

Donc : $I = 136.27$

a : exposant climatique : $a = 0.016 I + 0.5$; donc $a = 2.68$

K : facteur de correction.

Pour corriger les valeurs de l'ETP mensuelles, on doit les multiplier par un facteur de correction qui est fonction de la latitude, c'est-à-dire de la durée théorique de l'insolation et du nombre de jours au cours de l'année. Pour la zone étudiée, la latitude est voisine de 35 degrés Nord. Les résultats sont portés sur le tableau II.8.

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

Tableau II.8 : Evapotranspiration potentielle annuelle (1985-2016) selon Thornthwaite -
Station de Matemour.

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
T (C°)	23.33	18.89	13.42	10.26	8.96	10.24	12.17	14.13	18.14	22.86	26.83	27.01	----
I	10.30	7.48	4.46	2.97	2.42	2.96	3.84	4.82	7.04	9.99	12.72	12.86	81.85
ETP (mm)	67.59	38.37	15.35	7.49	5.20	7.43	11.81	17.64	34.46	64.02	98.28	100.12	467.76
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	----
ETP corrigé (mm)	69.62	37.22	13.20	6.36	4.53	6.32	12.16	19.23	41.70	77.47	120.89	116.14	524.82

$$ETP_{\text{corrigé}} = 524.82 \text{ mm}$$

II.4.2. Evapotranspiration réelle (ETR) ou déficit d'écoulement

Elle est définie comme étant le résultat de l'évaporation du sol et la transpiration végétale, plusieurs facteurs peuvent influencer sur l'évapotranspiration notamment, l'apport de rayonnement, la tension de vapeur de l'atmosphère, la température, le vent et les caractéristiques de la couverture végétale (Dassargues, 2007 in Abdou Babaye, 2012).

a) Estimation de l'évapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite

Cette méthode est décrite en détail plus loin et les résultats sont représentés dans le tableau du bilan hydrique (Tableau II.9).

II.4.3. Le ruissellement

Le ruissellement (R) peut être calculé par deux formules :

- Tixeront Berkallof par Romantchouk (1974) pour $P > 600 \text{ mm}$

$$R = P^3/3 \quad \text{II.9}$$

- Tixeront Berkallof, pour $P < 600 \text{ mm}$

$$R = P^3 / 3(ETP)^2 \quad \text{II.10}$$

Avec :

- R : ruissellement en (mm) ;
- P : précipitation moyenne annuelle de la station de Matemour en (mm) ;
- ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).

Nous avons estimé la valeur de ruissellement par l'application directe de la formule de Tixeront-Berkaloff, donc :

$$R = 32.17 \text{ mm} ; \text{ soit } 9.3 \% \text{ des précipitations.}$$

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

II.4.4. L'infiltration

On a le bilan hydrique est : $P = ETR + R + I$ II.11

Donc :

$$I = P - ETR - R \quad \text{II.12}$$

Avec :

I : l'infiltration en mm ;

P : précipitation moyenne annuelle (298.43 mm);

R : ruissellement (32.17 mm) ;

ETR : évapotranspiration réel (247.67 mm).

$I = 18.59$ mm ; donc l'infiltration représente 6.23 % des précipitations moyennes annuelles qui pourra jouer un rôle important dans la recharge des nappes souterraine.

II.4.5. Calcul du bilan hydrique selon la formule de Thornthwaite

Le procédé de calcul pour le bilan, consiste en les étapes suivantes :

- $P = ETP$: les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol, il n'y aura donc pas de surplus pour alimenter le RFU (Réserve Facilement Utilisable c'est La quantité d'eau stockée dans le sol). On admet, pour la région étudiée, que la hauteur d'eau maximale stockée dans le sol sera égale à 100 mm.
- si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l' $ETP = ETR$, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (Exc) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement (Seghir, 2008).
- si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation. Les résultats sont représentés dans le tableau II.9.

Tableau II.9: Résultats du bilan hydrique selon Thornthwaite - station de Matemour (1969-2011).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Total
P (mm)	16.47	30.51	38.54	33.6	37	34.34	38.66	30.41	25.13	6.93	2.04	4.79	298.43
ETP _{corriger} (mm)	69.62	37.22	13.2	6.36	4.53	6.316	12.16	19.23	41.7	77.5	121	116	524.82
RFU	0	0	25.34	52.6	85	100	100	100	83.43	12.9	0	0	
ETR (mm)	16.47	30.51	13.2	6.36	4.53	6.316	12.16	19.23	41.7	77.5	14.9	4.79	247.67
Da	53.14	6.712	0	0	0	0	0	0	0	0	106	111	277.16
EXC	0	0	0	0	0	13.1	26.5	11.19	0	0	0	0	

a) Interprétation du bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique a pour but, de connaître des différents paramètres (ETP, ETR, RFU, DA, Exc), qui nous aident à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrauliques de surface (Tableau II.9).

Le bilan hydrique établi par la méthode de Thornthwaite pour la station de Matemour montre que L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de Juillet (121 mm) et son minimum au mois de Janvier (4.53 mm).

L'évapotranspiration réelle (ETR) moyenne est estimée à 247.67 mm/an, représentant 83 % de la totalité des précipitations.

La constitution de la réserve facilement utilisable (RFU) n'est pleine que de Février à Avril, quant à son épuisement, il dure neuf mois.

Le déficit agricole appréciable est estimé à 277.16 mm/an réparti du mois de Juillet jusqu'à Octobre.

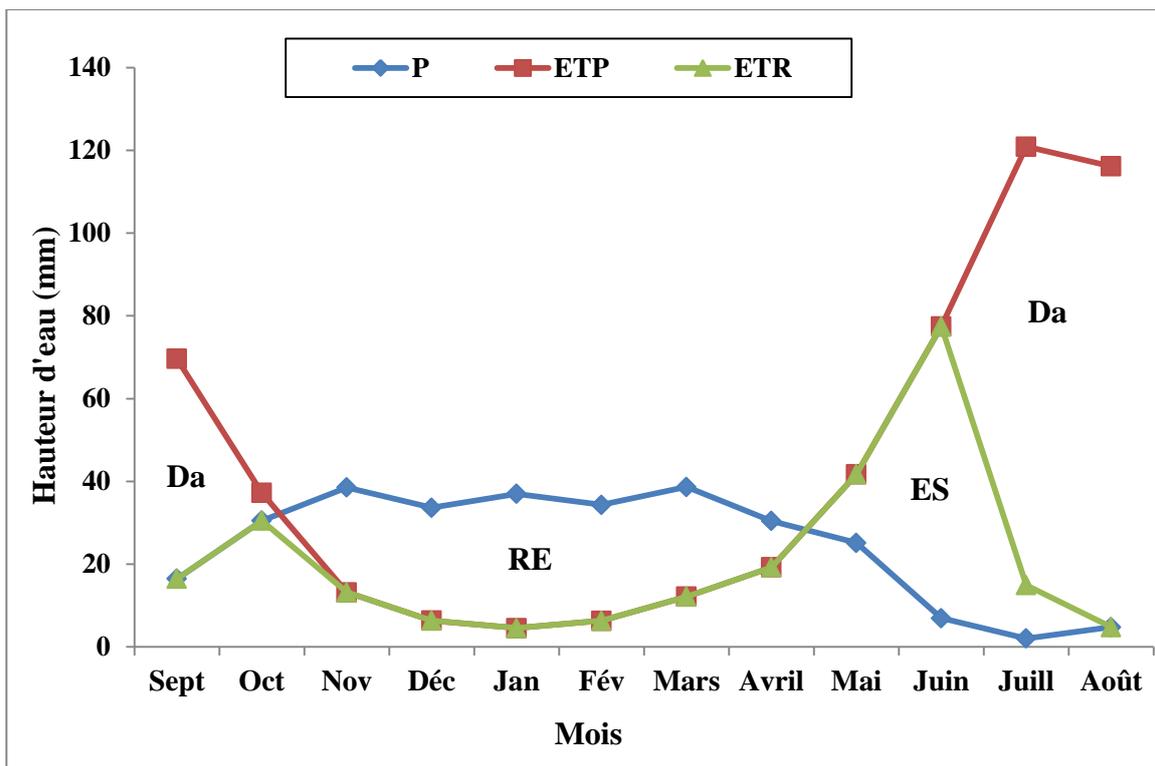


Figure II.11 : Représentation graphique du bilan hydrique selon Thornthwaite – Station de Matemour (1969 – 2011).

Avec :

DA : Déficit Agricole ; **RE** : Recharge ; **ES** : Epuisement du stock.

Chapitre II : Etude Hydro-climatique

La représentation graphique du bilan d'eau selon la méthode de Thornthwaite de la station de Matemour montre que l'évapotranspiration maximale a été observée pendant le mois de Juillet avec une valeur de 121 mm, ce qui produit un déficit agricole de 106 mm, nécessitant une irrigation pour les zones de culture (Sedrati, 2011 ; Bouguerra, 2018). Cependant, on remarque une recharge de la nappe durant le mois d'Avril correspondant à un excédent de 11 mm (Tableau II.9). L'épuisement du stock commence au mois de Novembre jusqu'à le mois d'Aout, où le déficit agricole commence et se prolonge jusqu'à la fin du mois de Septembre (Zeghaba, 2011).

II.5. Conclusion

L'étude hydro-climatique est indispensable à la compréhension des processus d'alimentation et de la restitution des eaux souterraines d'une région donnée.

La région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, avec un hiver froid et humide et un été chaud et sec. Elle reçoit une hauteur de précipitation d'environ 346.01 mm/an et une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.19 °C avec un maximum au mois d'aout égal à 27.01 °C et un minimum au mois de janvier égal à 8.96 °C.

La moyenne annuelle de l'humidité relative de l'aire à la station de Mascara est d'une valeur de 63.11 % (1990 - 2010) avec des moyennes mensuelles variant entre 44.96 % en été au mois de juillet et 76.42 % en hiver au mois de décembre.

Un essai d'établissement du bilan hydrique a permis de fixer un ordre de grandeur des paramètres non mesurables directement. On remarque ainsi, que 83 % des précipitations s'évaporent, ce qui correspond à une lame d'eau de 247.67 mm, environ 10.78 % se ruisselle, ce qui correspond à une lame d'eau de 32.17 mm. L'infiltration ne laisse percoler que 18.59 mm soit 6.23% des précipitations. Cela, traduit que l'alimentation directe de la nappe par les eaux de précipitation est faible.

Chapitre III :
Etude géologique et
hydrogéologique

III.1. Etude géologique

III.1.1. Introduction

L'étude géologique (stratigraphique et structurale) est la base de toute étude hydrogéologique, car elle donne des renseignements sur les formations lithologiques susceptibles de constituer les réservoirs en eaux souterrains, et d'estimer leurs importances et capacités. Cette partie est réalisée en se basant sur anciens travaux géologiques régionaux réalisés par de nombreux géologues chercheurs tels que : Sourisseau, 1974 ; Assens et al.1977 et Betier et al. 1951.

III.1.2. Elément structurale du secteur d'étude

Notre secteur d'étude fait partie du domaine géologique Tellien Oranais, ces reliefs sont représentés par les monts de Sidi Kada et la plaine de Ghriss et les reliefs qui l'entourent. La zone d'étude correspond par des reliefs constitués de différentes formations géologiques :

a) Les bordures Nord et Nord - Ouest de la région d'étude sont matérialisées par les monts de Beni- Chougrane, ceux-ci allongés en forme d'arc de cercle de direction Sud-Sud-Ouest et Nord-Nord-Est, sont très plissés, à ossature Crétacé et recouvrement Tertiaire très épais. Ils représentent les vestiges de l'ancien sillon méditerranéen, effondrés et transportés par charriage en trois ensembles:

- Le Crétacé moyen et supérieur: Il est formé essentiellement de marnes et de bancs de calcaires gris à semelle de Trias gypseux et salifère recouvrant en contact anormal les terrains du Miocène anté-nappe.
- Eocène et Oligocène (Nummulitique): Il est formé de marnes et de banc de grès qui recouvrent en contact anormal soit le Crétacé constituant la première nappe, soit le Miocène anté-nappe.
- Miocène et Pliocène: Sur les terrains allochtones, sont venues se déposer en deux phases discordante, les formations du Miocène post-nappe et du Pliocène.

b) A l'Est de la région, l'élévation des formations marneuses et argileuses de l'Oligocène (qui n'affleure pas dans la zone d'étude) et du Miocène forme une barrière relativement imperméable qui limite nettement le bassin versant de la zone d'étude et celui de l'Oued Mina.

c) Les Monts de Sidi Kada (monts de Saida) constituent la bordure Sud de la zone d'étude. Ces derniers sont constitués par des formations karstiques qui ont subies une intense tectonique cassante avec mise en place des horsts (les monts d'Emfouss et Bouradou) à l'Ouest.

Ces ensembles s'enfoncent légèrement vers le Nord, ce qui favorise l'écoulement et le drainage des eaux vers la plaine de Ghriss. Au niveau de Ain Fekan, cet ensemble calcaréo-dolomitiques du Jurassique supérieur est limité par une faille qui le met en contact avec les argiles gréseux du crétacé. Cette interruption brusque de la perméabilité est à l'origine des sources d'Ain Fékan, là où le crétacé constitue un véritable barrage souterrain. Les terrains calcaréo-dolomitiques rigides, des monts de Sidi Kada se prête mal aux déformations. On note quelques ondulations de faibles amplitudes, mais surtout affectées par une tectonique cassante suivant deux directions principales :

- Une première direction de failles, Ouest-Sud-Ouest et Est-Nord-Est, détermine un effondrement en marches d'escaliers de l'altitude +500 mètres sur les reliefs à -700 mètres sous la plaine.
- Une seconde direction de failles, orientée Sud-Nord dans la partie occidentale, divise les formations précédentes en horsts et grabens.

d) Au centre de notre région d'étude se trouvent la plaine de Ghriss. Cette dernière est une cuvette d'effondrement, dont la subsidence est marquée par la flexure des couches du Néogène en bordure des monts de Beni- Chougrane. De nos jours, celle-ci se poursuit toujours et est compensée par l'alluvionnement argilo- sableux de l'Oued Maoussa. En profondeur, sur le substratum calcaréo-dolomitique du Jurassique supérieur, on trouve parfois, un conglomérat de base, surmonté par un remplissage d'argiles et de marnes grises et vertes marines du Miocène inférieur et moyen. A cette époque certains sommets ont échappé à l'invasion marine et sont restés immergés. À leur pied, se sont déposés des sédiments détritiques provenant de leur destruction par érosion. Après le retrait de la mer Miocène, aucune autre transgression marine n'atteint la plaine de Ghriss. Dans le sud s'installe sous climat continental, une activité érosive intense, qui permet l'accumulation des sables, des galets et de dépôt conglomératiques argileux qui s'entassent à proximité des reliefs, faute d'agents transporteurs. Entre Ghriss et Froha demeure un vaste couloir qui n'est pas envahi par le lac. Une sédimentation détritique avec des argiles rouge et des passages de graviers roulés, enrobés d'argile se poursuit alors.

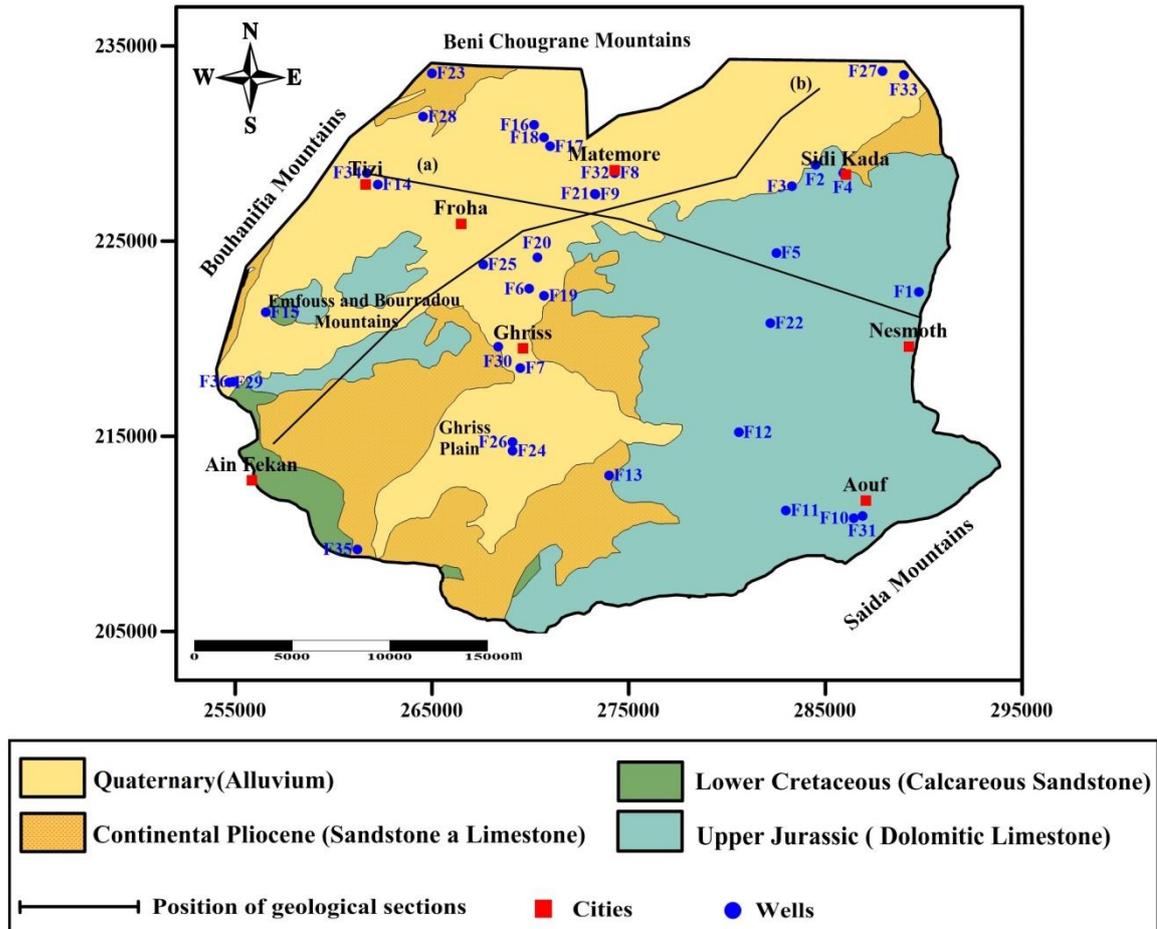


Figure III.1: Carte géologique, position des coupes géologiques de la région d'étude

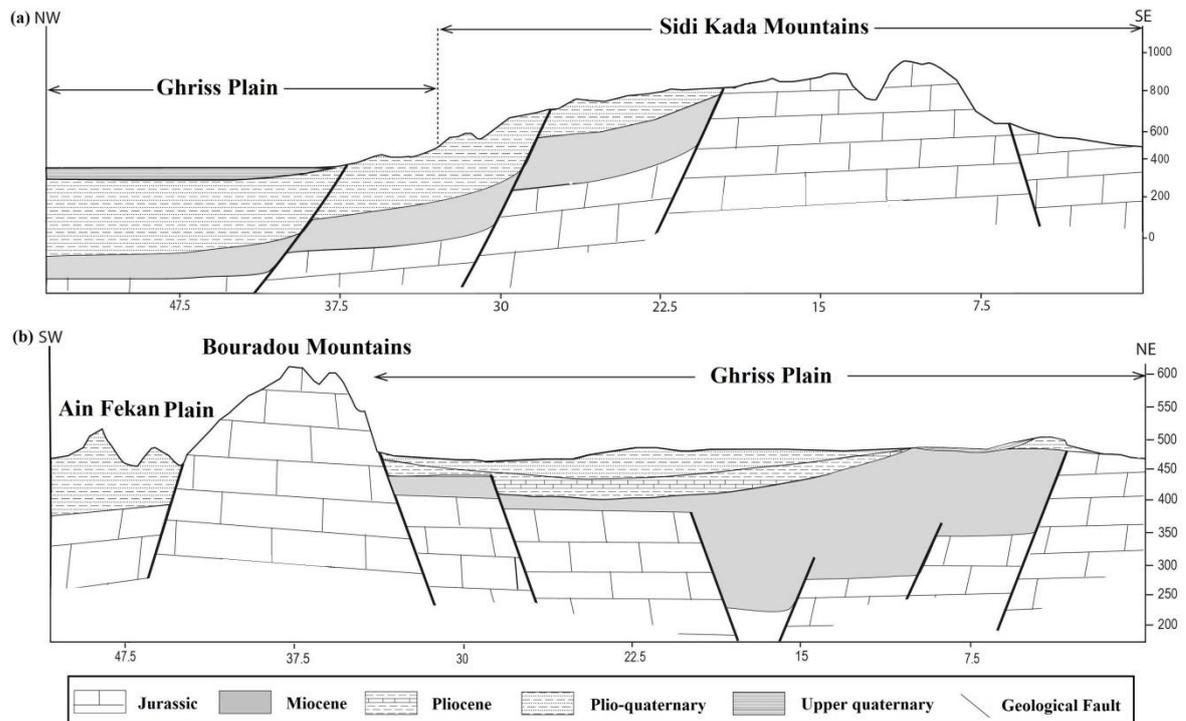


Figure III.2 : Coupes géologique du secteur d'étude.

Les coupes géologiques réalisées dans la région permettent, d'une part de visualiser la structure profonde de la région et d'autre part de déterminer la nature de l'aquifère profond des calcaires dolomitiques.

III.1.3. Litho-stratigraphie

Sourisseau (1974), se basant sur les affleurements et les sondages, a établi une succession stratigraphique. Il distingue de bas en haut:

a)- Le secondaire

- **Le Trias:** Il est présent dans les monts de Beni Chougrane à la base des nappes du Crétacé et en accident diapiryque, au sud dans la vallée de l'Oued Taria. Il est toujours gypseux, parfois salifère accompagne des roches vertes, ophites et gabbros, de dolomies, et de marnes bariolées.
- **Le Jurassique:**
 - **Le Callovo-Oxfordien:** affleure au sud du bassin, dans la vallée de l'Oued Taria. C'est un ensemble de bancs gréseux peu épais, alternant avec de puissantes séries d'argiles et de marnes grises, jaunes et vertes. Son épaisseur est de l'ordre de 250 m.
 - **Le Lusitanien :** affleure dans la partie Sud des monts de Sidi Kada et a été rencontré en sondage, il est composé d'une alternance de bancs gréseux et dolomitiques qui font corniche à l'affleurement et de passage argilo marneux, également épais. La puissance totale de la formation est de l'ordre de 150 m.
 - **Le Jurassique Supérieur** (Kimméridgien et Purbeckien) : limite de notre région au sud, et il constitue aussi le substratum résistant effondré. Au sommet on trouve des calcaires gris à pâte fine, zoogènes, riches en polypiers. La formation se poursuit avec des calcaires dolomitiques; on observe des petits niveaux de marnes noires; qui ralentissent l'infiltration des eaux, et peuvent donner naissance à des résurgences perchées. La puissance totale de la formation peut dépasser 300 ou 400 m.
- **Le Crétacé:**
 - **Le Crétacé Inférieur :** attribué à l'Hauterivien, il affleure en amont à l'ouest de Djebel Enfouss et dans le Sud-Ouest de la plaine de Guerdjoum. Il est représenté par des calcaires gréseux (devenant plus argileux en profondeur), et des grès fin argileux. La puissance de ces formations atteint une centaine de mètres.

b)- Le Tertiaire

- **L'Eocène:** affleure sur la bordure occidentale de la plaine de Ghriss sous forme d'une alternance de bancs métriques grésocalcaires et des couches argilo-marneuses de plusieurs mètres d'épaisseur.
- **L'Oligocène:** affleure dans les Beni-Chougrane et à l'Est de Tighennif, et recouvre, en discordance les formations précédentes avec un même faciès, il est constitué de couches argilo-marneuses avec des bancs de grés. A la base s'intercale un conglomérat de base polygénique peu épais.
- **Le Miocène:**
 - **Le Miocène moyen marin:** Le Miocène moyen marin affleure dans les Beni-Chougrane. C'est un ensemble monotone, très épais, à prédominance de marnes vertes, avec des passages très riches en macrofaunes de gastropodes et de lamellibranche (ostréa) et un conglomérat de base polygénique. Il représente le toit imperméable de la nappe profonde et le mur imperméable de la nappe d'eau des grés et calcaires lacustres du pliocène.
 - **Le Miocène continental:** Dans le Djebel Oucilles le Miocène marin disparaît et passe à une formation continentale argilo-sableuse rouge dite de Bouhanifia. Sur cet ensemble marneux reposent en concordance des sables fins argileux à concrétions calcaires.
- **Le pliocène :** On les rencontre dans les Beni-Chougrane et sous le recouvrement de la plaine de Ghriss. Il est alors sub-affleurant sous une couche mince de limons. A la base, on observe des grés marins transgressifs qui ont été déposés par la mer de l'Astien, venu du Nord. Au sommet, les grés passent à des socles consolidés, de plages, et dunaires de couleur jaune. L'épaisseur de cette formation varie entre 40 et 100 mètres y compris les sables de désagrégation en surface, ils affleurent à proximité de Mascara, puis ils plongent vers la plaine dans laquelle ils se biseautent. Directement sur les grés et sables, où séparés par une faible épaisseur d'argile sableuse rouge détritique, reposent des calcaires blancs crayeux. Ces calcaires lacustres affleurent sur toute la bordure des Beni-Chougrane, leur épaisseur augmente rapidement en allant sous la plaine (270 m au maximum) puis diminue et devient nul vers l'Ouest et le Sud.

C)- Le Quaternaire

On observe sur toute la bordure Ouest et Nord de la plaine de Ghriss, des argiles rouges détritiques qui surmontent les calcaires lacustres. En bordure des monts de Sidi Kada, ces formations lacustres sont absentes, elles sont remplacées par de grandes épaisseurs d'éléments roulés (conglomérats) de calcaires et calcaire dolomitique reliés par un ciment argilo-carbonaté.

Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologique

Ces conglomérats sont accompagnés d'argiles rouges silteuses et de sables argiles magnésiennes provenant de roches calcaires. Actuellement les sols de la plaine sont principalement formés par des sables limoneux et argileux dont l'épaisseur ne dépasse pas 06 mètres, leur nature varie selon les facteurs des transports et la nature de la roche mère sous-jacente. Ces formations sont le support agricole de la région.

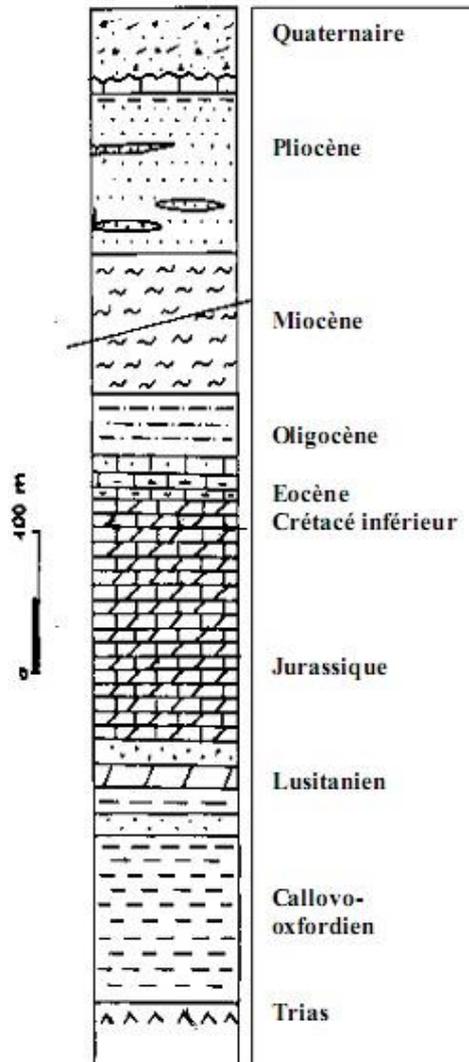


Figure III.3: Log litho-stratigraphique des formations de la région d'étude (Bekkoussa, 2009).

III.2. Description hydrogéologique

L'étude hydrogéologique est prépondérante à la compréhension des processus d'alimentation des aquifères, de la reconnaissance des sens d'écoulement, de la variation du gradient hydraulique, des caractéristiques hydrodynamiques, et de la détermination de la géométrie des nappes.

L'exploitation de la nappe profonde des calcaires dolomitiques dans la région revêt une grande importance car la proportion des eaux souterraines par rapport aux eaux superficielles est élevée.

Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologique

L'étude hydrogéologique a pour but d'identifier la nappe profonde des calcaires dolomitiques du Jurassique, elle apporte des éléments de prise de décision concernant une meilleure gestion de cet aquifère.

III.2.1. Principaux aquifères

D'après l'étude géologique et l'analyse des coupes et logs géologiques, les formations aquifères sont comme suite :

➤ **Aquifère des alluvions Plio-quaternaires**

C'est une nappe superficielle. Elle est uniforme et continue dans toute la partie abaissée et remblayée de la région, hétérogène et discontinue sur les reliefs de bordure.

L'aquifère est constitué par des sables, des grès, des calcaires blancs altérés, poreux et fissurés, des sables de désagrégation, des argiles sableuses et détritiques. Ce qui entraîne des variations locales des paramètres hydrauliques. La nappe est limitée géologiquement par l'interruption de l'aquifère sur les bordures (Sourisseau, 1972).

Cette nappe superficielle est alimentée par l'infiltration des eaux de pluie au travers de son impluvium, à laquelle il faut ajouter les retours à la nappe dans les zones irriguées, et les apports latéraux venants de l'aquifère du jurassique au Sud et au Sud - Est, ainsi que de l'aquifère des calcaires et grès du pliocène au Nord. Le mur de cette nappe est constitué par les marnes bleues du Miocène. Le toit correspond à la surface lithologique de la nappe.

Cette nappe libre ayant pour exutoire Ain Fekan est alimentée suivant trois processus qui sont:

- Alimentation directe par sa propre surface.
- Alimentations par les aquifères adjacentes (soit filtration latérale directe, soit par l'intermédiaire de source).
- Alimentation par les oueds principalement en période de crue.

Les eaux de cette nappe sont peu profondes, dans la plaine peut atteindre 20 m. Les profondeurs qui au contacts des massifs des bordures (les monts de Beni-Chougranne), sont les plus importants 20 à 25 m.

➤ **Aquifère des calcaires et grès du pliocène**

Est une nappe libre dans les monts Beni Chougrane, captive sous la plaine et localisée à la moitié occidentale de la plaine, elle est constituée de calcaire blanc, crayeux du Pliocène, le mur de la nappe est formé par des marnes bleues du Miocène. En profondeur, cette nappe s'individualise de la nappe superficielle par la variation verticale de la perméabilité, il y aurait donc mise en

charge importante. Le toit de cette nappe est libre au Nord et captif sous les marnes Miocène dans la plaine.

Cette nappe est alimentée par les affleurements de Beni Chougrane où l'on estime le taux d'infiltration efficace à 12 % des précipitations. Dans la plaine les calcaires lacustres se trouvent à une charge supérieure à la fois à la nappe phréatique et aux dolomies du Jurassique. Ain Fekan, Ain Tizi (avec un débit nul) constituent un exutoire de faible importance pour la nappe des calcaires lacustres.

➤ **Aquifère des calcaires dolomitiques du jurassique**

Cette nappe occupe toute la partie sud de la zone d'étude. Elle s'étend sur une grande partie de la région, elle est contenue dans des calcaires dolomitiques fissurés du Jurassique supérieur (Kimméridgien). Le cheminement des eaux s'effectue en réseau karstique vers les panneaux effondrés sous la plaine de Ghriss, donc il s'agit d'une nappe de type karstique.

La nappe des calcaires dolomitiques considérée comme la plus importante de ce système multicouche de par son étendue, ses potentialités et la qualité de ses eaux. Le mur de cette nappe est la formation elle-même compacte, non fissurée, le toit est formé par les marnes bleues et vertes du Miocène ou les argiles rouges détritiques de l'Oligocène. Les écoulements se font vers Ain Fekan, où les eaux remontent au contact d'une faille avec les terrains du crétacé inférieur. Elle contribue à l'alimentation de celle du Plio-quadernaire par l'intermédiaire des dépôts de pentes constituées de graviers, de galets et conglomérats. Les monts de Sidi Kada, Emfouss et Bouraddou constituent l'impluvium de cette nappe.

La superficie des affleurements de la formation est de 375 Km², le volume d'eau moyen apporté annuellement par l'alimentation naturelle de cette nappe serait de 980 l/s d'après Sourisseau (1972).

III.2.2. Evaluation des paramètres hydrodynamiques des aquifères

1. La transmissivité

La transmissivité est le produit de coefficient de perméabilité (K) par l'épaisseur de l'aquifère, elle est exprimée en (m²/s).

Les valeurs de transmissivité établis par Sourisseau (1972), montrent des valeurs plus fortes dans la moitié Sud (10⁻² m²/s) que dans la moitié Nord (5.10⁻⁴ m²/s) pour la nappe Plio-quadernaire. Pour le Pliocène, la transmissivité est de 3.10⁻⁴ m²/s et pour l'aquifère karstique est comprise

Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologique

entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s. Ce paramètre est très variable et augmente dans le sens de l'écoulement des eaux, plus on se rapproche de l'exutoire d'Ain Fekan.

2. Le coefficient d'emmagasinement

C'est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par l'unité de la surface de l'aquifère à la variation de charge hydraulique correspondante.

Pour la nappe Plio-quatérnaire, le coefficient d'emmagasinement établi par Sourisseau est compris entre 0.1 et 0.25, ceci implique que la nappe libre a une porosité élevée. Pour la nappe des calcaires lacustres du Pliocène, le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 3 à $5 \cdot 10^{-3}$ et pour la nappe des calcaires dolomitiques du Jurassique il varie de $3 \cdot 10^{-3}$ à 0.05.

3. La perméabilité

C'est le volume d'eau gravitaire traversant le sol, en l'unité de temps, sous l'effet de l'unité de gradient hydraulique, et par unité de section, elle s'exprime en (m/s). Les perméabilités verticales sont de 10^{-7} m/s pour l'aquifère Plio-quatérnaire, 10^{-8} m/s pour le Pliocène et 10^{-10} m/s pour le Jurassique (Sourisseau, 1972).

III.2.3. Dimension de la nappe des calcaires dolomitique du jurassique

Les cartes de synthèses (toit, mur et épaisseur) ont été réalisées par les données des forages géologiques, obtenues auprès de la direction des ressources en eau (DRE) de la wilaya de Mascara. La cartographie a été réalisée en utilisant le logiciel ArcGis 10.2. Les côtes de substratum calcaire dolomitique sont interpolées spatialement en utilisant la méthode du krigéage, reconnue comme très pertinente en géosciences.

a) Profondeur du Toit de l'aquifère du Jurassique

La carte des isohypses du toit des calcaires dolomitiques (Figure III.4) montre l'existence d'une zone effondrée du toit des calcaires dolomitiques à l'Ouest de la région d'étude, qui forme une cuvette qui est la partie méridionale de la plaine de Ghriss, centrée au Nord de la région de Froha à une côte de 183 m. Au niveau de la région de Ghriss, le toit de la formation atteint une côte de 310 m, vers l'Est au niveau de la région Sud de Tighennif et Hachem, le toit des calcaires dolomitiques atteint une côte respectivement entre 385 m et 360 m. A partir de la ligne 500 m d'isohypse, le toit de cette formation atteint la surface au Sud de la Zone d'étude, ce soulèvement est assuré par une faille détectée par une étude géophysique. Cette surélévation

remonte graduellement en affleurement pour atteindre le sommet à une cote maximale de 1080 m au niveau de la région de Makda.

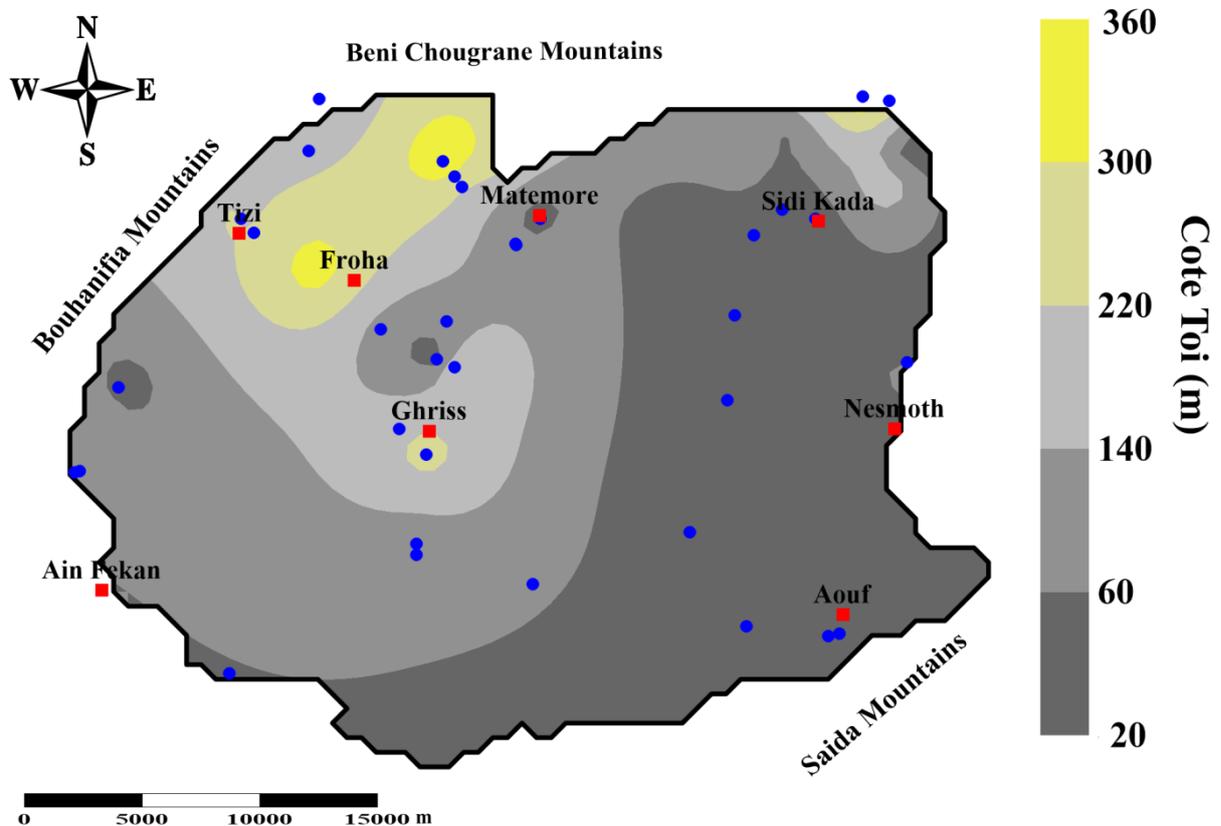


Figure III.4 : Profondeur du toit de l'aquifère du Jurassique

b) Profondeur du Mur de l'aquifère du Jurassique

La carte des isohypses du mur des calcaires dolomitiques (Figure III.5) montre un effondrement à l'Ouest de la région d'étude, au niveau de la région de Froha, à une profondeur de plus de 600 m. Au niveau de la région de Ghriss, le mur substratum atteint une profondeur de 300 à 380 m. Vers le Nord, la profondeur du mur des formations calcaires dolomitiques augmente jusqu'à s'enfoncer sous les monts de Beni Chougrane. Le mur du substratum des calcaires dolomitiques remonte graduellement vers le Sud pour atteindre une cote maximale de 835 m au niveau de la région de Makda.

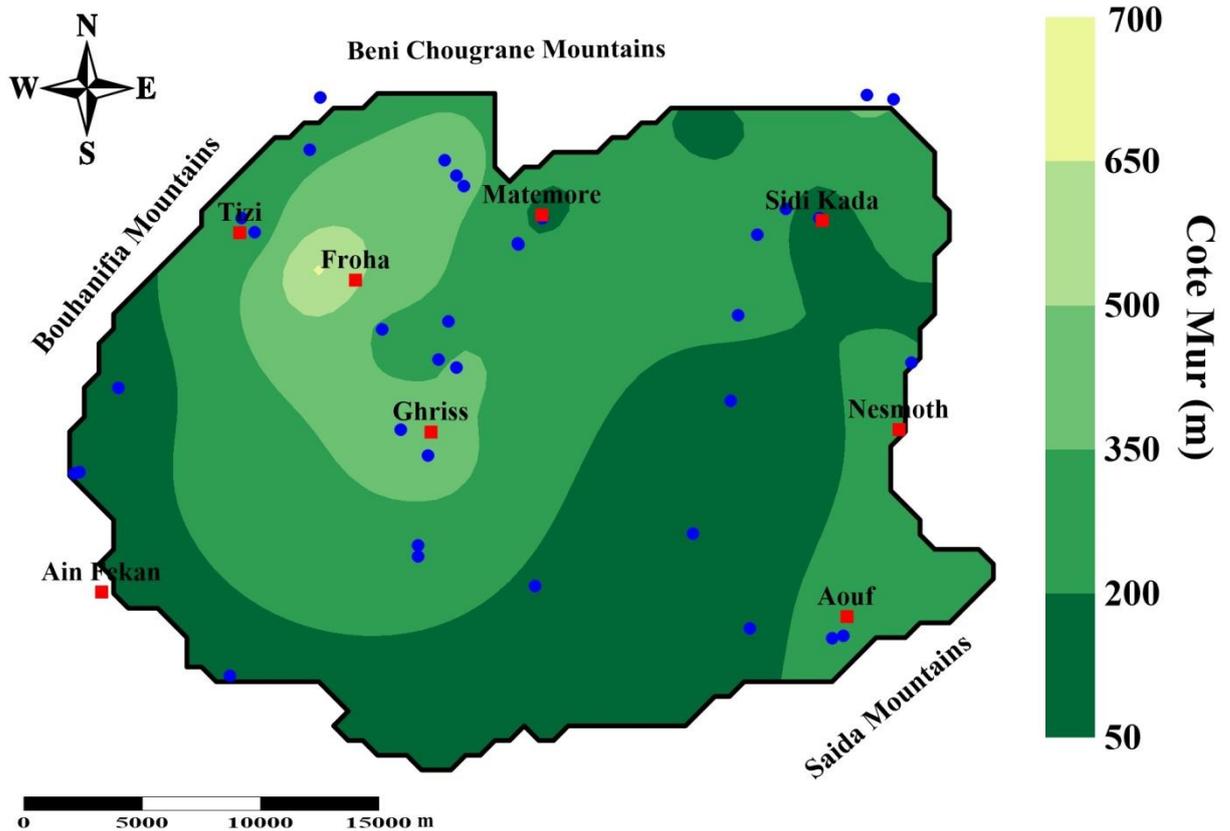


Figure III.5 : Profondeur du mur de l'aquifère du Jurassique

c) Carte de l'épaisseur de l'aquifère du Jurassique

L'épaisseur de l'aquifère calcaire dolomitique dans la région d'étude est influencée par deux facteurs, le premier consiste en un jeu conjugué de failles, et le deuxième consiste d'une part en une subsidence affaissée à l'Ouest et au Nord de la région, et d'autre part une surrection vers le Sud. Le résultat en est une diminution de l'épaisseur au niveau des compartiments surélevés, et une augmentation de cette épaisseur de l'aquifère au niveau des compartiments affaissés subsidient.

La Figure III.6 Représente la carte égale épaisseur de la formation profonde des calcaires dolomitiques tels qu'elle a été définie par les coupes géologiques des forages. Elle montre une augmentation de l'épaisseur de cette formation au sein de la cuvette à l'Ouest de la région au niveau de Froha avec une épaisseur qui dépasse les 300 m. Les épaisseurs de l'aquifère sont assez importante au niveau de Sidi Boussaid et de Nesmoth et dépassent les 250 m.

En générale, la carte d'épaisseurs de l'aquifère calcaire dolomitique dessine une structure synclinale vers l'Ouest de la région de direction ENE-OSO et situé au niveau Oued Taria, passant au niveau de Ghriss puis Matemoure. Une structure anticlinale située à la confluence de plusieurs accidents au niveau de Sidi Kada, passant vers le Sud au niveau de la région de

Makda. Cet anticlinal rehausse le niveau piézométrique et joué le rôle de limite entre deux bassins hydrogéologiques connus sous le nom de Ghriss et Mina (Bekkoussa, 2020).

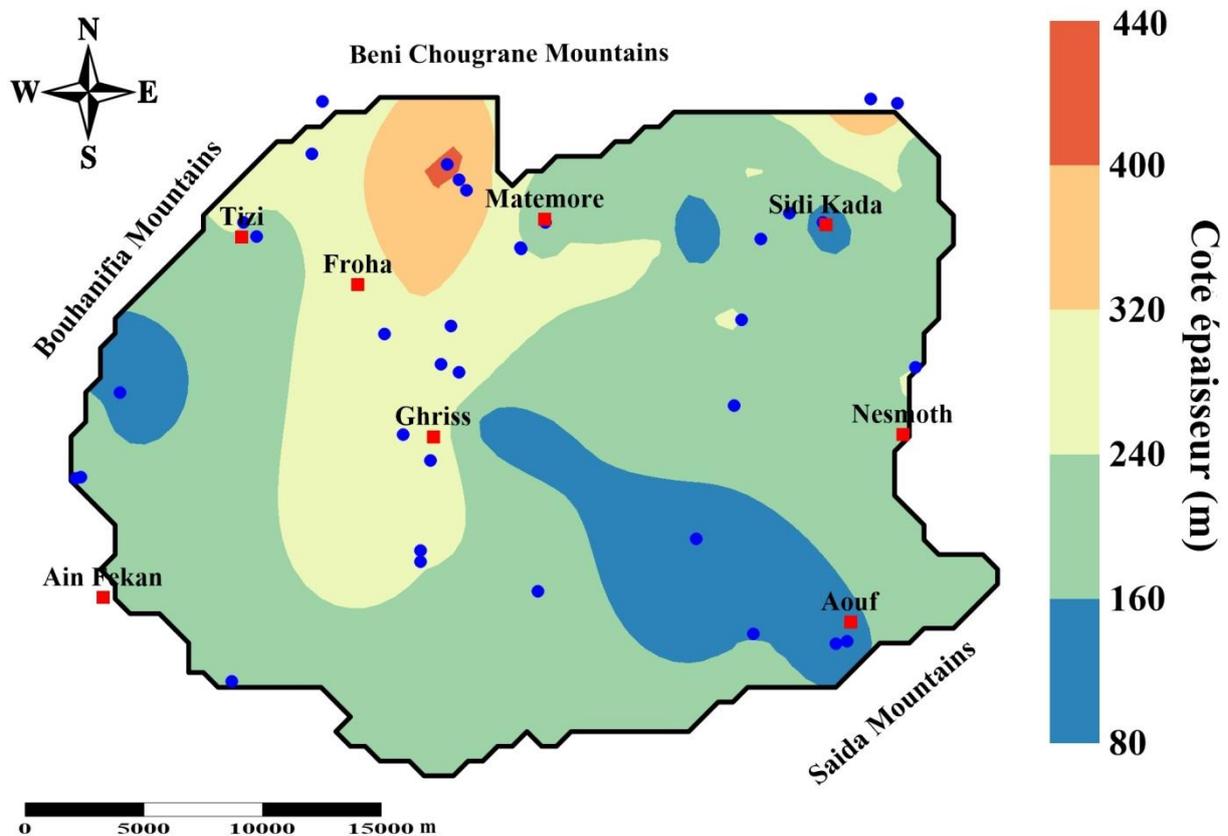


Figure III.6 : Épaisseur de l'aquifère du Jurassique

III.2.4. Piézométrie de la nappe des calcaires dolomitique du Jurassique

La distribution des charges hydrauliques de la nappe est représentée par la morphologie de la surface piézométrique, cette dernière est figurée par le sens des lignes équipotentiels. La surface piézométrique est définie par l'ensemble des courbes d'égal niveau piézométrique qui correspond à des lignes équipotentiels.

Les cartes piézométriques de l'aquifère des calcaires dolomitique du Jurassique (Figures III.7 et III.8) ont été établies à partir des relevés des niveaux statiques de 35 et 34 forages différents répartis sur l'ensemble de la région d'étude durant les années 2012 et 2018, respectivement.

Les deux cartes montrent que la direction de l'écoulement des eaux souterraines est orientée du Sud-Est au Nord-Ouest vers l'unique exutoire qui est la source d'Ain Fekan.

Le sens d'écoulement met en évidence la recharge latérale de l'aquifère du Plio- quaternaire par les formations carbonatés du Jurassique. Cependant, il n'existe pas de mesures piézométriques

Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologique

de la nappe du Jurassique au niveau des horsts (les monts d'Emfouss et Bourradou). Cette lacune n'a pas permis de visualiser le rôle de ces formations dans l'écoulement général des eaux souterraines. A noter que le gradient hydraulique au centre est plus important que sur les côtés, ce qui reflète des débits plus conséquent (Bekkoussa, 2020).

Ces cartes ont permis notamment de comparer le niveau de la nappe des calcaires dolomitiques des monts de Sidi Kada entre l'année 2012 et 2018. La cote piézométrique s'établit entre 440 et 940 m, pour l'année 2012 et variant entre 400 et 900 m, pour l'année 2018. Par conséquent on constate qu'une diminution de plus de 40 m est observée pour la piézométrie de l'aquifère étudié sur une période de 06 ans. Ceci confirme que la nappe du jurassique est confrontée à une surexploitation accrue ces dernières années. Ce constat est affirmé par d'autres auteurs tel que Bekkoussa, 2020 ; Benadela et al. 2022, qui ont travaillé sur la région et qui soulignent eux aussi un abaissement des niveaux piézométriques dans la région et notamment pour la nappe du jurassique. Un cône de dépression est observé au Nord-Ouest. Ce cône met en évidence les fortes densités des puits et forages dans la région de Matemour (Kenniche et al. 2022).

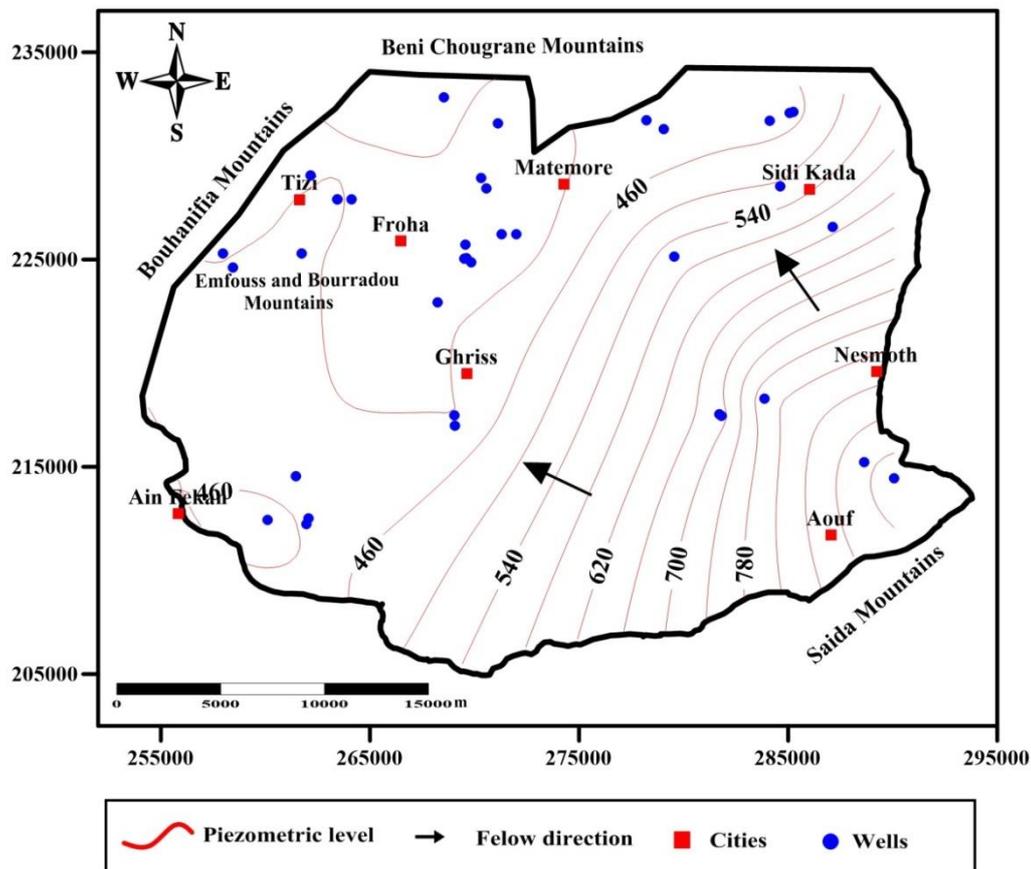


Figure III.7 : Carte piézométrique de l'aquifère Jurassique année 2012

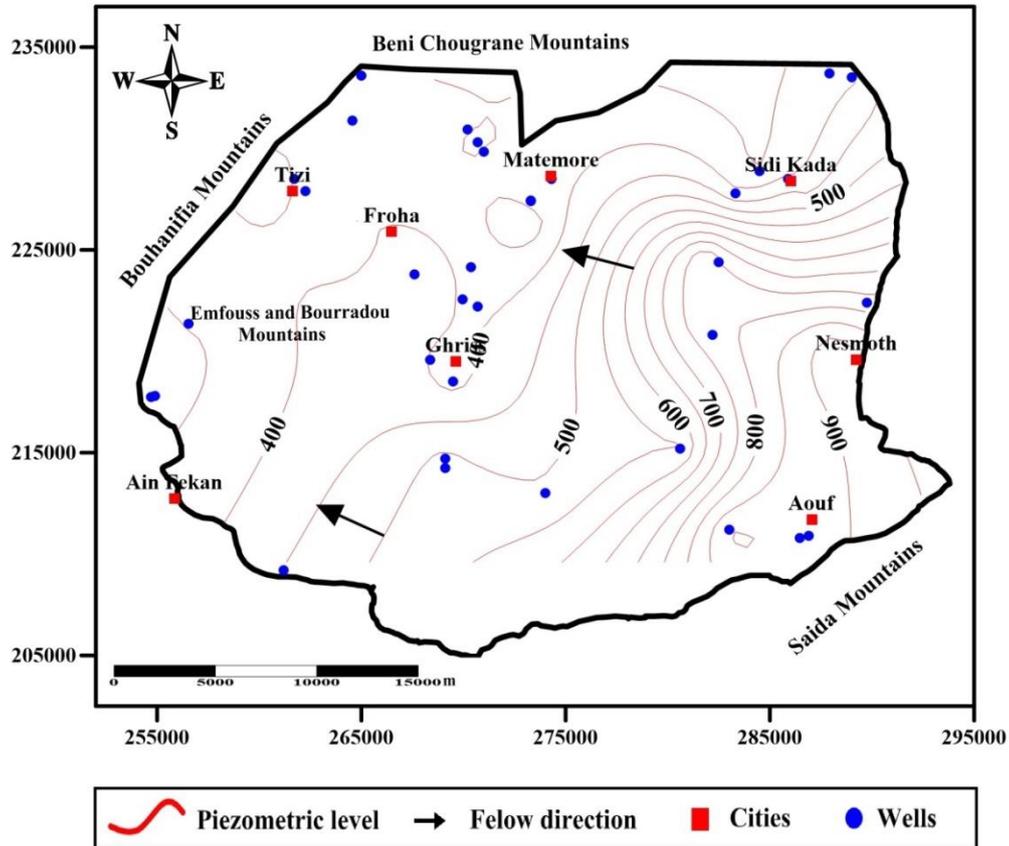


Figure III.8 : Carte piézométrique de l'aquifère Jurassique année 2018

Pour lutter contre ce rabattement effrayant, des mesures sont nécessaires (Benfetta et al. 2011):

- Réhabiliter le réseau de surveillance piézométrique en instaurant une «police» de contrôle pour empêcher le développement des forages illicites ou profonds.
- Instaurer une méthode d'irrigation plus économique de l'eau notamment le goutte à goutte tout en introduisant de nouvelles cultures moins consommatrices d'eau.
- Pratiquer des cultures de densité et de profondeur racinaire importante, idéales pour l'alimentation hydrique de la nappe, car l'infiltration des eaux de pluies est facilitée par les microporosités créées dans le profil du sol par les racines.
- Maîtriser la demande en eau et son utilisation car une exploitation abusive provoque la contamination de la nappe et l'affaissement des sols.
- Soulager les nappes de la surexploitation en ayant recours aux eaux non conventionnelles : dessalement de l'eau de mer ou installation des stations d'épuration des eaux brutes.
- Multiplier les retenues collinaires pour permettre à la nappe de se recharger.

Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologique

- Penser à subvenir aux besoins de la région (AEP, irrigation...) en cherchant à ramener l'eau d'un autre bassin afin de soulager la nappe souterraine.
- Enfin, penser à la recharge artificielle qui consiste à injecter de l'eau à la nappe pour provoquer sa recharge

III.3. Conclusion

La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tellien Oranais. Ces reliefs sont représentés par les monts de Sidi Kada au sud de la région et la plaine de Ghriss au centre et les reliefs qui l'entourent.

La zone d'étude est constituée de trois aquifères : un premier l'aquifère Plio-quadernaire limité géologiquement par l'interruption de l'aquifère sur les bordures, il est caractérisé par des sables, des grés, des calcaires blancs altérés, poreux et fissurés, des sables de désagrégation, des argiles sableuses et détritiques. Un second, aquifère des calcaires et grés du Pliocène est localisé à la moitié occidentale de la plaine, il est constitué de calcaire blanc et crayeux du Pliocène. Le troisième qui est le plus important pour la région et sa périphérie, l'aquifère des calcaires dolomitique du Jurassique c'est une nappe de type karstique. Les monts de Sidi Kada, Emfouss et Bouraddou constituent l'impluvium de cette nappe.

Les deux cartes piézométriques pour les années 2012 et 2018 montrent que la direction de l'écoulement des eaux souterraines est orientée du Sud-Est au Nord-Ouest vers l'unique exutoire qui est la source d'Ain Fekan. En plus, la nappe la plus profonde connaît des rabattements causés par la diminution des apports pluviométriques, un renouvellement très lent de la ressource en eau dans ces zones et une surexploitation massive.

Chapitre IV :
Etude de la qualité
hydro-chimique et
bactériologique des
eaux

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I. Étude de la qualité hydro chimique des eaux

I.1. Introduction

Dans les régions arides et semi-arides trouver l'eau, n'est pas l'objectif final, mais encore faut-il qu'elle soit utilisable. Il est important alors de connaître les processus géochimiques dans ces régions, afin de caractériser les eaux de ces systèmes aquifères.

L'hydrochimie est l'étude des caractéristiques physiques et chimique de l'eau. Elle permet :

- De donner une idée de la qualité chimique de l'eau ;
- De visualiser à l'aide de cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous ;
- De disposer d'outils pour l'établissement des cartes de vulnérabilité et de risque de pollution.

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines sont nombreuses, et la composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, et de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie, etc).

Cette partie fera l'objet de la caractérisation hydro chimique des eaux souterraines karstiques, et la détermination de l'origine d'éventuelle pollution (Aguilera et Murillo 2009).

I.2. Méthodologie de travail

I.2.1. Echantillonnage des eaux

Pour réaliser notre travail, nous disposons des analyses chimiques réalisées en 2017 au niveau de 36 forages. Les échantillons prélevés et analysés captent seulement la nappe calcaire dolomitique du jurassique des monts de Sidi Kada (Figure IV.1). Les eaux de ces forages sont destinées à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation.

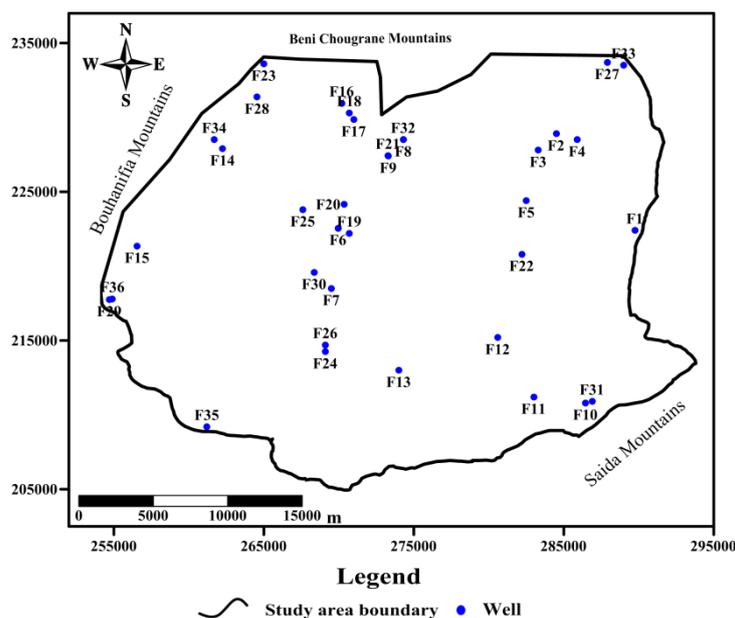


Figure IV.1 : Carte d'inventaire des points prélevés et analysés.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I.2.2. Méthodes d'analyses et fiabilité des résultats

Pour caractériser la qualité des eaux de l'aquifère karstique, les différents paramètres physiques à savoir la température (T), le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés in situ à l'aide d'un multi-paramètre de 12 paramètres portatif de modèle HI 9828/4-HANNA.

Les analyses chimiques des eaux effectuées ont porté sur le TDS, Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , SiO_2 et PO_4^{3+} . Elles ont été effectuées au laboratoire de Chimie de l'ADE (Algérienne Des Eaux, Antenne Bouhanifia, Mascara) selon les méthodes de l'Association Américaine de la Santé Publique (APHA, 1995) et les méthodes présentées par (Rodier, 1996). Les concentrations de Ca^{+2} et Mg^{+2} ont été déterminées par titrimétrie en utilisant l'acide éthylendiaminetétracétique standard, Na^+ et K^+ ont été déterminés par photométrie à flamme, les SO_4^{2-} ont été mesurés par spectrophotométrie colorimétrique à l'aide de BaCl_2 (Alhassan et al. 2019). Cl^- a été déterminé par titrage standard d' AgNO_3 et HCO_3^- a été déterminé par titration avec H_2SO_4 . Les TDS ont été mesurés en faisant évaporer à sec un échantillon préfiltré. NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ ont été mesurés par méthode colorimétrique. La PO_4^{3+} et le SiO_2 ont été déterminés par spectrophotométrie à adsorption atomique (Rodier, 1996).

Le calcul de la balance ionique (BI) des résultats, permet d'apprécier la fiabilité des analyses effectuées. Ce paramètre exprimé en %, se calcule en se basant sur l'équation IV.1 (Freeze et Cherry, 1979).

$$BI (\%) = \left[\frac{(\sum C - \sum A)}{(\sum C + \sum A)} \right] * 100 \quad \text{IV.1}$$

Avec :

$\sum C$: somme des cations en (meq/l) ;

$\sum A$: somme des anions en (meq/l).

Pour une erreur E inférieure à 5 %, l'analyse sera considérée acceptable; dans le cas contraire, elle sera rejetée ou remise en question.

Les valeurs de la balance ionique caractérisant les échantillons prélevés dans le cadre de la présente étude sont tous inférieures à 5 % reflétant la fiabilité des résultats des analyses effectuées.

I.2.3. Méthodes de cartographie

Les cartes thématiques de divers éléments chimiques ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2. Toute interpolation spatiale de ces paramètres est basée sur l'approche géostatistique utilisant les méthodes de krigeage, ce qui permet une estimation linéaire avec un minimum de variance (Aravinthasamy et al. 2019; M'nassri et al. 2018).

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I.3. Résultats

I.3.1. Caractéristiques physicochimiques et distribution spatiale des ions majeurs

Le résumé statistique des paramètres physiques et chimiques issu des échantillons d'eaux analysés sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Paramètres physiques et chimiques des eaux de l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada.

Paramètres physico-chimique	Normes OMS (2011)	Normes Algérien (2011)	Min	Max	Moy	Ecart type
T (°C)	---	25	6.8	8.0	7.4	2.7
pH	6.50 – 9.2	6.50 – 9.00	6.8	8	7.41	0.3
CE (mS/cm)	1.5	2.8	0.67	1.82	0.99	0.29
TDS (mg/l)	1000	2000	468	1273	691	200
Ca ²⁺ (mg/l)	200	200	31	120	79.9	24.04
Mg ²⁺ (mg/l)	150	150	26	142	69.9	25.9
Na ⁺ (mg/l)	200	200	14	161	63.14	41.2
K ⁺ (mg/l)	12	20	1	23	4.2	4.3
NO ₃ ⁻ (mg/l)	50	50	2	42	17.7	11.3
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250	400	16	208	85.04	50.14
Cl ⁻ (mg/l)	250	500	34	416	141.1	101.2
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	---	---	98	505	396.3	69.3
SiO ₂ (mg/l)	---	---	6.2	32	14.1	5.6
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0.5	0.5	0	0.49	0.06	0.09
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0.2	0.2	0	0.35	0.03	0.06
PO ₄ ³⁺ (mg/l)	---	5	0.0	15.5	0.8	2.6

I.3.1.1. La température

C'est un paramètre important pour l'étude des eaux souterraines, car elle permet de distinguer les eaux qui circulent près de la surface et les eaux profondes (Aravinthasamy et al. 2020). Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne, et de l'évaporation des eaux (Seghir, 2008). Les mesures du T °C des eaux de l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada montrent des valeurs qui s'échelonnent entre 16.3 et 25 °C avec une moyenne d'environ 21.3 °C.

I.3.1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline (Askri et al. 2016). Les mesures du pH des eaux souterraines montrent des valeurs qui s'échelonnent entre 6.8 et 8 avec une moyenne d'environ 7.4. Elles sont dans les normes de potabilité, ce qui indique que les eaux

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

de la nappe calcaire dolomitique du jurassique sont légèrement alcalines. Tous les échantillons d'eaux souterraines sont inférieurs aux niveaux recommandés par l'OMS (2011) et l'Algérie.

I.3.1.3. Conductivité électrique et Total dissolved des sels (TDS)

La conductivité électrique donne une estimation directe sur la minéralisation totale des eaux. Elle est régie principalement par la concentration des ions chargés dans l'eau qui se trouvent sous l'influence de la nature lithologique des terrains et le temps de séjour de l'eau dans les formations géologiques (Baali et al. 2015). Les mesures de la CE des eaux effectuées montrent des valeurs qui s'échelonnent entre 0.67 et 1.82 mS/cm avec une moyenne d'environ 0.99 mS/cm. Les mesures de TDS varient entre 478 et 1273 mg/l avec une moyenne de l'ordre de 691 mg/l. Les concentrations les plus fréquentes se situent dans les limites recommandées par l'OMS (2011) et les directives algériennes (2011), sauf que 3% des échantillons sont au-dessus de la limite recommandée de 1000 mg / l (OMS, 2011) pour le TDS et de 1.5 mS/cm (OMS, 2011) pour la CE.

La carte de la conductivité électrique indique que les eaux les moins minéralisées (0,65 à 0,9 mS/cm) se trouvent dans la partie Est de la zone d'étude entre les villes de Sidi Kada, Nesmoth, Aouf, Ghriss, Froha et Matemore. Une augmentation prononcée de la conductivité électrique est observée dans les parties Nord-Ouest et Sud-Ouest de la zone d'étude (Figure IV.2b). Les valeurs de salinité plus élevées peuvent être liées à la dissolution des minéraux évaporitiques, principalement l'halite, l'anhydrite et le gypse. Les limites Nord et Ouest de la zone d'étude sont formées de marnes avec quelques évaporites (gypse et halite) et des structures argileuses du Miocène (Nadjib et al.2016).

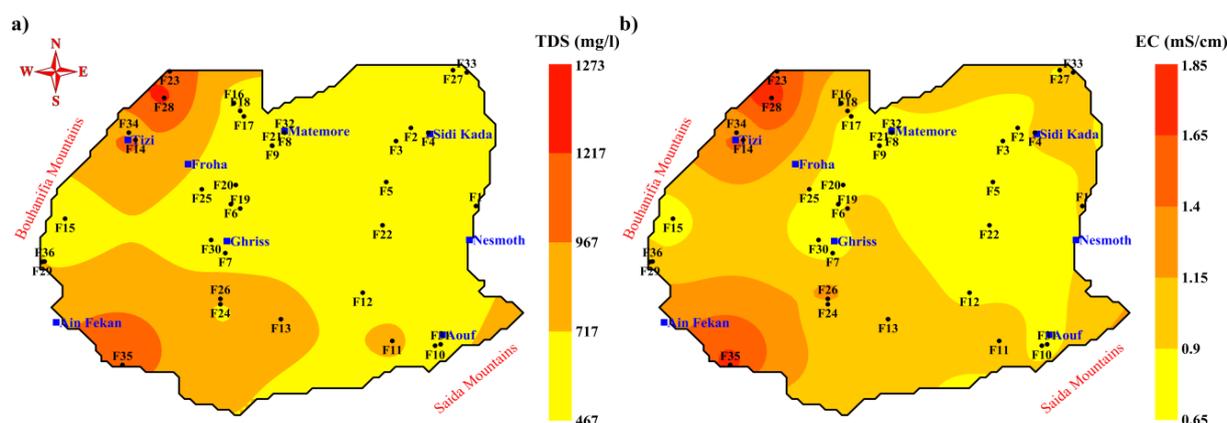
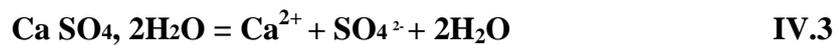
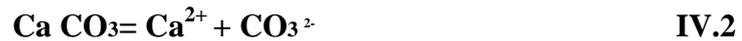


Figure IV.2 : Répartition spatiale de TDS (a) et CE (b).

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I.3.1.4. Le calcium et magnésium (Ca^{2+} et Mg^{2+})

Le calcium est un métal alcalin terreux, composant majeur de la dureté de l'eau. Il est présent dans la nature et dans le corps humain, où il est indispensable à la solidité osseuse et au fonctionnement des cellules musculaires et nerveuses. La présence des ions Ca dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit à la dissolution des formations carbonatées (Ca CO_3), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO_4).



Le magnésium est un élément indispensable pour la croissance, il favorise les réactions métaboliques, mais s'il est en grande quantité, il provoque des troubles digestifs chez l'adulte. Les origines de magnésium sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).



Les teneurs de Ca^{2+} et Mg^{2+} varient entre 31 et 120 mg/l et 26 et 142 mg/l avec une moyenne de l'ordre de 79.9 et 69.9 mg/l, respectivement. Les concentrations de ces deux éléments restent dans les limites de potabilité fixée par l'OMS et les normes algériennes. Le calcium et le magnésium en concentrations importantes provoquent les maladies néphrétiques.

I.3.1.5. Le sodium et potassium (Na^+ et K^+)

Le sodium est un élément très réactif ; en particulier s'il s'oxyde lentement à l'air humide (Nouayti et al. 2015). Le Sodium est toujours présent dans l'eau provenant du lessivage des formations géologiques riches en NaCl et de la dissolution des formations argileuses et marneuses. Le potassium est un élément indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux. Il provient généralement de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). Les concentrations de sodium et potassium oscillent entre 14 et 161 mg/l et 1 et 23, respectivement. Toutes les valeurs sont inférieures aux recommandations l'OMS (2011). Le sodium peut causer des crises d'hypertension et de cardiopathies. Le potassium a un effet laxatif.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I.3.1.6. Les sulfates SO_4^{2-}

La présence des sulfates dans l'eau est liée à la dissolution des évaporites, principalement le gypse et l'anhydrite. Les concentrations de SO_4^{2-} varient entre 16 et 208 mg/l avec une moyenne de l'ordre de 85.04 mg/l, et les teneurs plus élevées de sulfate peuvent être attribuées à la dissolution du gypse ou à des sources anthropiques telles que les effluents industriels et agricoles (Singh et al. 2013). Les plus fortes concentrations de sulfate ont été trouvées dans la région de Tizi (Figure IV.3). L'origine du sulfate est probablement la dissolution des marnes gypseuses du Miocène représentant le toit de l'aquifère Jurassique et affleurant à quelques kilomètres au nord au niveau des Monts de Beni Chougrane. La deuxième source de sulfate peut être les activités agricoles, notamment les engrais utilisés dans la culture de la vigne qui est largement présente dans la zone d'étude. Les sulfates provoquent des irritations gastro-intestinales.

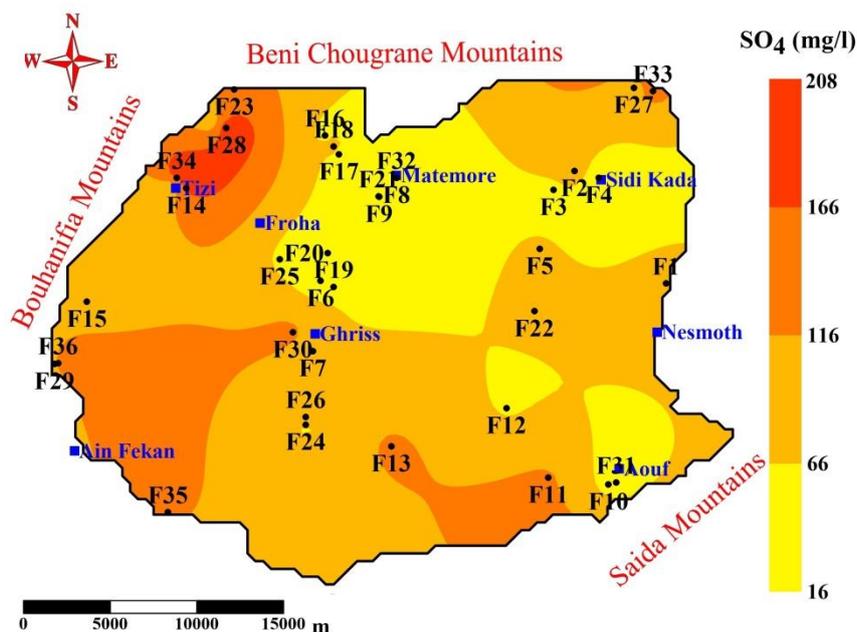


Figure IV.3 : Répartition spatiale de SO_4^{2-}

I.3.1.7. Les bicarbonates HCO_3^-

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution de la calcite ou de la dolomite par des eaux chargées en gaz carbonique, selon l'équation suivante :



L'altération des silicates peut également libérer des ions bicarbonate. Les eaux de la nappe du Jurassique supérieur contiennent des concentrations importantes en bicarbonates (ou Hydrogénocarbonate) oscillent entre 98 et 505 mg/l avec une moyenne de 396.3 mg/l, ce qui reflète des échanges notables entre l'encaissant et la phase aqueuse (Bekkoussa, 2020). Les

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

bicarbonates représentent les principaux éléments dominants dans les eaux de l'aquifère karstique étudiée (Figure IV.4)

La distribution spatiale du HCO_3^- montre que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le nord-est et le sud-est de la région (zone de recharge). La dominance de HCO_3^- dans les principaux échantillons d'eau souterraine peut provenir de l'altération carbonatée et silicatée (Narany et al.2014; Kim et al. 2017).

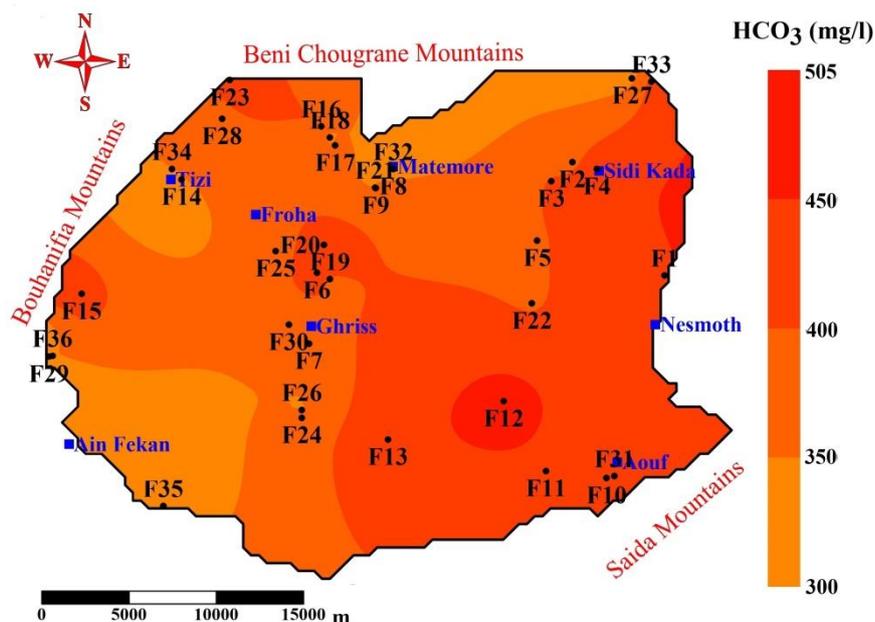


Figure IV.4 : Répartition spatiale de HCO_3^-

I.3.1.8. Les chlorures Cl^-

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques et ne se combine pas facilement avec les autres éléments chimiques. Il est dit conservatif. On constate que les valeurs évoluent entre 34 et 416 mg/l, environ 20% des échantillons analysés dépassaient la norme de l'OMS (250 mg / l, OMS 2011). L'abondance de ces éléments dans les nappes des zones arides est généralement liée à la présence des roches évaporitiques, notamment l'halite (Hamed et al. 2017).

De plus, la distribution spatiale de la concentration de Cl^- (Figure IV.5) met en évidence que les valeurs les plus élevées sont observées dans le nord-ouest et le sud-ouest de la zone d'étude. La valeur guide de cet élément est dépassée dans six forages situés principalement au nord-ouest (région de Tizi). La principale source lithologique de chlorure est l'altération de l'halite et les évaporites (Askri et al. 2016). Les chlorures sont agressifs et de mauvais goût. Elles sont nocives pour les plantes.

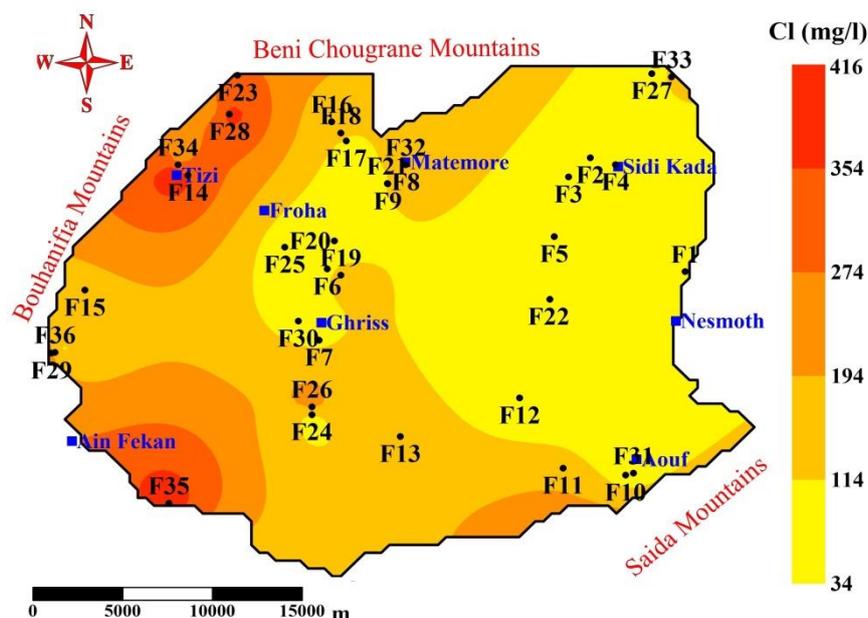


Figure IV.5 : Répartition spatiale de Cl.

I.3.1.9. Les nitrates NO_3^-

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, qui est très soluble (Mtoni et al. 2012). Les concentrations naturelles de nitrates dans les eaux souterraines sont généralement très faibles (généralement moins de 10 mg/l), mais les niveaux de nitrates augmentent rapidement en raison des activités humaines, telles que l'agriculture intensive, l'élevage, les déchets industriels et les effluents domestiques (Singh et al. 2013 ; Ameur et al. 2016). La carte des concentrations de NO_3^- montre des valeurs relativement modérées sauf dans six forages (F22, F5, F28, F23, F34 et F14) où la concentration est supérieure à 30 mg/l (Figure IV.6). Tous ces forages sont situés dans des zones agricoles où les agriculteurs utilisent des engrais industriels, du fumier d'élevage et utilisent des fosses septiques pour l'assainissement individuel qui sont autant de sources potentielles de contamination par les nitrates (Elisante et Muzuka, 2016). Lorsque les nitrates sont en concentrations élevées dans l'eau, ils provoquent l'irritation des muqueuses, des nausées, des vomissements et des selles sanguinolentes.

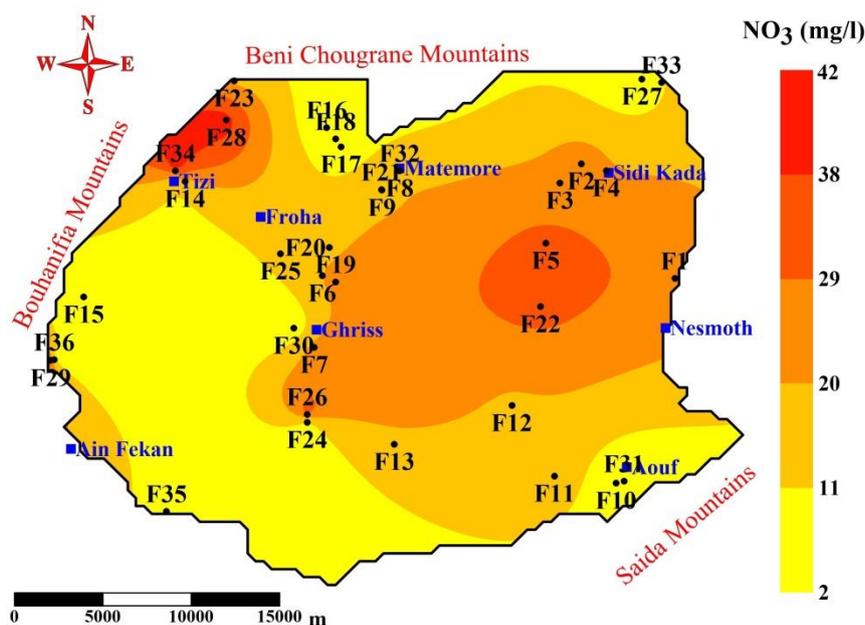


Figure IV.6 : Répartition spatiale de NO_3^-

I.3.1.10. Les nitrites et l'ammonium (NO_2^- et NH_4^+)

Les nitrites représentent une forme moins oxygénée et moins stable. Cette forme représente la forme de passage entre les nitrates et l'ammonium, et elle est toxique (Fadili et al. 2016). La présence des Nitrites dans l'eau en quantité importante dégrade la qualité de l'eau et pourrait affecter la santé humaine. L'ammonium résulte de la décomposition des matières organiques sous forme de radicaux NH_2 (Ogrinc et al. 2019). C'est la forme d'azote la plus toxique. Le contenu de ces éléments est très faible et négligeable et tous les échantillons d'eaux souterraines se situent dans les limites recommandées par l'OMS et l'Algérie (JORA 2011) (Annexe I).

I.3.1.11. Les phosphates (PO_4^{3-})

L'origine de l'existence des phosphates dans les eaux serait liée aux rejets urbains ou à la dissolution des engrais chimiques (Hadj Ammar et al. 2014), comme ils peuvent provenir du lessivage des terrains traversés par les eaux souterraines (origine lithologique). Les concentrations du phosphore varient entre 0 et 15.5 mg/l avec une moyenne de 0.8 mg/l. La valeur indicative du phosphore dans la réglementation algérienne est de 5 mg/l (Journal Officiel N° 18 du 23 Mars 2011). La valeur maximale (15.5 mg/l) est enregistrée au niveau du point F26. Les phosphates peuvent causer des problèmes de santé (endommager le foie et le cœur).

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

I.3.1.12. Les silicates (SiO_2)

La silice dans la nature se trouve sous la forme soluble (ionique) et colloïdale. Elle est d'origine essentiellement naturelle, liée aux formations silicatées (argiles, formations métamorphiques) ou d'origine industrielle, liée à l'industrie du verre, du mica, de la porcelaine et du ciment (Karanth, 1987). Les concentrations de cet élément sont comprises entre 6.2 et 32 mg/l, avec une moyenne de 14.1 mg/l. Les directives de l'OMS et la réglementation algérienne relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine ne donnent pas d'indication concernant la concentration maximale admissible et le niveau guide.

I.3.2. Classification hydro-chimique

I.3.2.1. Faciès chimiques

L'analyse de la composition en ions majeurs et leurs distributions dans le diagramme de Piper permettent de distinguer les principaux faciès chimiques des différents échantillons d'eau (Keesari et al. 2016). La projection des points d'eaux dans le diagramme de Piper montre que les eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada sont différentes et se caractérisent par trois faciès géochimiques (Figure IV.7). Le premier type $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ caractérise la majorité des échantillons analysés (75% des échantillons).

Ce faciès dominant est probablement lié à l'altération des minéraux carbonatés. Par ailleurs, 22 % des échantillons recueillis sont caractérisés par un faciès Cl-Mg qui pourrait être liée à la dissolution des évaporites telles que l'halite. Ce type d'eau est principalement localisé dans le nord-ouest et le sud-ouest (Figure IV.7), où des minéraux évaporitiques ont été observés et identifiés (marnes salées du Miocène). Or, le troisième faciès $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ne représente que 3 % des échantillons collectés. Ce faciès est lié principalement à l'altération des roches carbonatées et le processus d'échange d'ions $\text{Ca} \leftrightarrow \text{Na}$. La variabilité des types d'eau souligne la complexité des processus hydro-chimiques contrôlant le chimisme de l'eau dans la région (De Montatey et al. 2008 ; Motevalli et al. 2018).

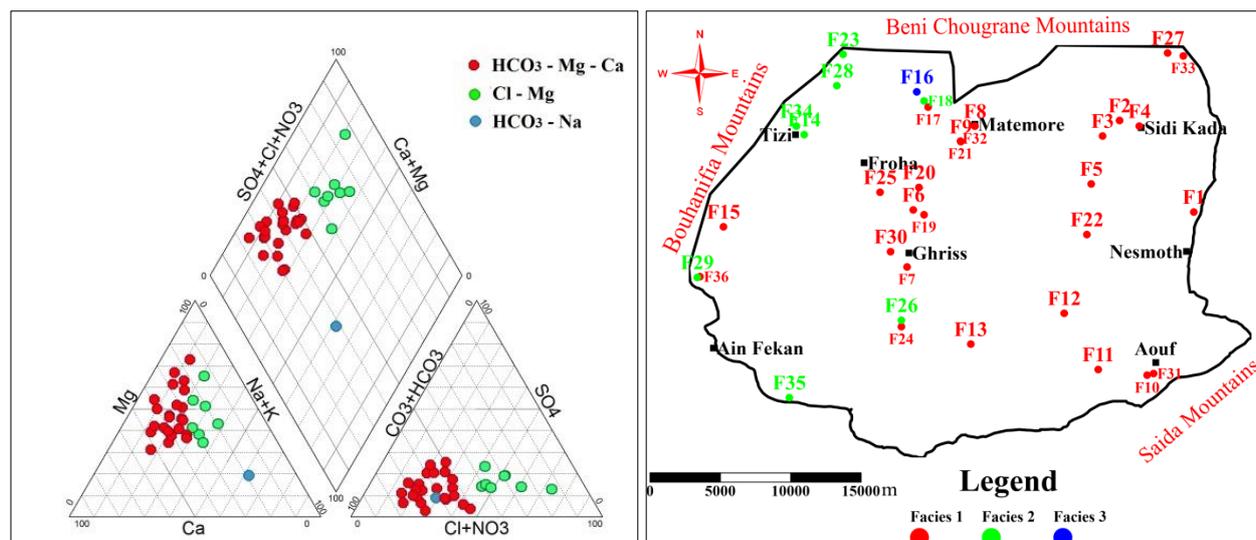


Figure IV.7 : Faciès géochimiques de l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada.

I.3.3. Aptitude des eaux karstiques des monts de Sidi Kada à l'irrigation

Les paramètres utilisés pour évaluer le potentiel d'utilisation des eaux souterraines pour des fins d'irrigation sont le pourcentage de Sodium (Na%), la Conductivité Electrique (CE), l'Indice de Perméabilité (IP), le Taux d'Adsorption du Sodium (SAR), le taux d'Adsorption du Magnésium (MAR) et le Carbonate de Sodium Résiduel (RSC). Ces paramètres sont calculés à partir des équations IV.7, IV.8, IV.9, IV.10 et IV.11. Les concentrations ioniques, utilisées dans les équations (IV.7 à IV.11), sont exprimées en méq/l.

Le calcul du pourcentage du Na%, selon l'équation IV.7, permet d'apprécier la dégradation éventuelle de la structure du sol et l'altération de ses propriétés. Un excès de sodium (Na% > 80%) peut être à l'origine des phyto-toxicités chez certaines plantes qui se manifestent par des brûlures et des dessèchements des feuilles.

$$N \% = \frac{Na+K}{Na+K+Ca+Mg} * 100 \quad \text{IV.7}$$

La conductivité électrique (CE) estime la quantité des sels solubles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^-) dans les eaux. Les valeurs élevées de la salinité indiquent une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau par les plantes, et par conséquent, la diminution des rendements des cultures (Mapoma et al. 2017).

Le SAR est l'un des principaux paramètres pour évaluer le potentiel d'utilisation des eaux à l'irrigation (Paul et al. 2019). Il exprime la sodicité du sol générée par les eaux d'irrigation riche en Na par rapport aux ions Ca et Mg (Equation IV.8). L'abondance de cet élément provoque une

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

dégradation de la structure des sols en réduisant la perméabilité et l'infiltration des eaux (Wilcox, 1953).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}} \quad \text{IV.8}$$

L'évaluation du MAR, selon l'équation IV.9, met en évidence l'importance du magnésium pour le sol et la plante (Alhassen et al. 2019). Ce dernier est considéré comme un élément indispensable lorsque le MAR est inférieur à 50. Dans le cas contraire, cet élément devient nuisible.

$$MAR = \frac{Mg}{Ca+Mg} \quad \text{IV.9}$$

Le calcul de l'indice de perméabilité (IP), selon l'équation IV.10, peut classer les eaux en trois classes. Les classes I et II, dont l'IP varie entre 25 et 100%, correspond à une bonne aptitude des eaux à l'irrigation. Cependant la classe III regroupe les échantillons d'eaux ayant un IP inférieur à 25% et pour lesquels les eaux sont inappropriées à l'irrigation.

$$IP = \frac{Na+\sqrt{HCO_3}}{Ca+Mg+Na} * 100 \quad \text{IV.10}$$

La présence des carbonates et des bicarbonates dans les eaux peut être évaluée par le calcul du RSC, selon l'équation IV.11. Ces deux éléments chimiques causent un risque majeur d'alcalinisation et de dégradation des propriétés physiques du sol si le RSC dépasse 1,5 méq/l.

$$RSC = [(HCO_3 + CO_3) - (Ca + Mg)] \quad \text{IV.11}$$

Les indices d'évaluation de l'aptitude des eaux de l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada à l'irrigation sont résumés dans le tableau IV.2. Les valeurs de Na% s'échelonnent entre 6.79 et 61.80 dont 18 points d'eaux représentent une qualité excellente pour l'irrigation, 17 points d'eau représentent une bonne qualité pour l'irrigation et un point d'eau seulement est caractérisé par une mauvaise qualité. Le Na% de la troisième catégorie est supérieur à 60%, par conséquent, peut induire des accumulations de sodium et détériorer les propriétés physiques du sol. Considérant le paramètre CE (mS/cm), les résultats révèlent qu'environ 14% des échantillons sont dans la catégorie de salinité moyenne (0.25-0.75 mS/cm), tandis que 86% des échantillons tombent dans la catégorie de salinité élevée (0.75 – 2 mS/cm).

L'utilisation de ces échantillons pour l'irrigation est autorisée pour les sols à texture grossière et les cultures tolérantes à l'eau saline (Aravinthasamy et al. 2020). Les résultats de MAR et IP indiquent que tous les puits sont acceptables pour l'irrigation.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Tableau IV.2 : Indices de classification de la qualité des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.

Paramètre	Classe	Nombre des échantillons
% N (meq/l)		
<20	Excellente	18
20 – 40	Bonne	17
40 – 60	Acceptable	-
60 – 80	Douteuse	01
>80	Inacceptable	-
CE (mS/cm)		
<0.25	Excellente	-
0.25 – 0.75	Bonne	05
0.75 – 2	Acceptable	31
2 – 3	Douteuse	-
>3	Inacceptable	-
SAR		
2 – 10	Faible	36
10 – 26	Elevée	-
>26	Très élevée	-
MAR		
<50	Acceptable	36
>50	Inacceptable	-
IP		
>75	Bien	01
25 – 75	Bonne	35
<25	Inacceptable	-
RSC (meq/l)		
<1.25	Bien	35
1.25 – 2.5	Douteuse	-
>2.5	Inacceptable	01

les valeurs de l'indice RSC sont faibles et ne dépassent pas 1,25 meq / l (35 puits), à l'exception un point (Tableau IV.2). Le RSC met en relief l'abondance des carbonates et des bicarbonates. Ces éléments peuvent nuire à la fertilité du sol lorsque le RSC dépasse 1,5 méq/l. Pour le risque sodium, tous les puits SAR sont inférieurs à 10, ce qui signifie un risque minimal d'accumulation de sodium.

Tous les échantillons de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada conviennent à l'irrigation et peuvent être utilisés pour tous les types de sols. Ce résultat est confirmé par le graphique CE versus Na%, présenté sur la figure IV.8, mettant en évidence que les eaux souterraines sont classées en trois catégories. Environ 30 % des échantillons d'eau représentent la catégorie « Excellente ». En outre, 69 % des échantillons tombent dans le champ « bonne ».

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Un seul échantillon est douteux à des fins d'irrigation, ce qui peut diminuer la perméabilité du sol et ainsi, réduire le rendement des cultures (Mapoma et al. 2017).

De plus, le graphique SAR versus CE montre que tous les échantillons d'eaux souterraines sont classés dans la catégorie « haute salinité avec une faible alcalinité » (C1S3) (Figure IV.9), indiquant l'adéquation des eaux souterraines pour l'irrigation de certaines cultures tolérantes contre l'eau saline (Richard 1954).

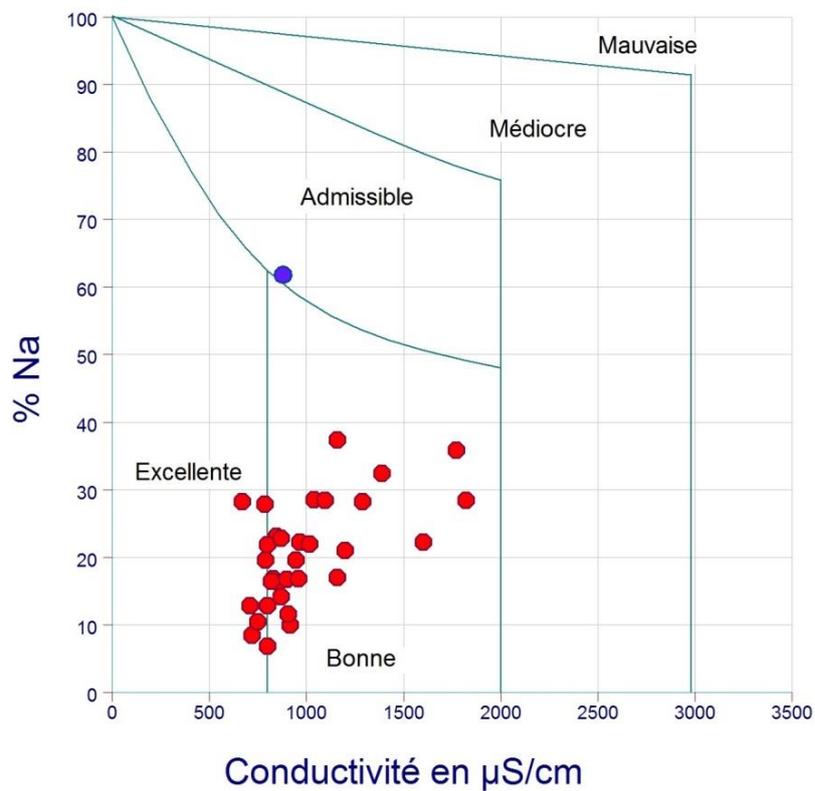


Figure IV.8 : Classification des eaux karstiques selon le diagramme de Wilcox

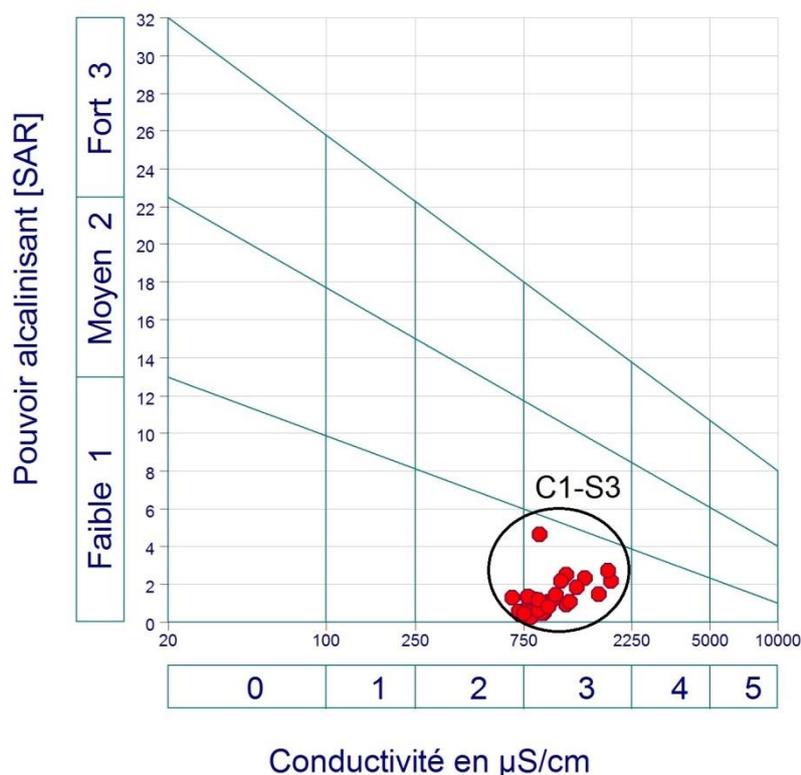


Figure IV.9 : Classification des eaux selon le diagramme USSL. Les valeurs du SAR (Sodium Hazard) sont exprimées en meq/l.

I.3.4. Analyse statistique multivariable

L'analyse statistique multivariable donne une image synthétique de l'ensemble des données en tenant compte de leur structure interne. Les analyses multivariées facilitent l'interprétation des données en présentant l'information contenue dans le tableau des résultats analytiques sous une forme plus condensée et généralement plus significative (Bekkoussa, 2009).

Le traitement des données a été réalisé par le biais de l'ACP et CHA en utilisant le logiciel XLSTAT 2014, pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux et identifier les facteurs responsables influant la composition chimique des eaux.

I.3.4.1. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation entre les différents descripteurs chimiques appliquée dans cette étude révèle des corrélations significatives entre certains éléments majeurs (Tableau IV.3). Elle permet de trouver la relation entre deux ou plusieurs variables. Les variables présentant un coefficient de corrélation $r > 0,7$ sont considérées comme fortement corrélées pour un seuil de 5 %. Elles sont moyennement corrélées lorsque $0,5 < r < 0,7$ pour le même seuil (Kumar et al. 2008, Bekkoussa 2020). À partir de matrice de corrélation regroupant 15 variables (Tableau IV.3), incluant le T,

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

pH, EC, les ions majeure (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- et NO_3^-) et les ions mineure (SiO_2 , NH_4^+ , NO_2^- and PO_4^{3+}), on peut dégager les observations suivantes :

- Une corrélation positive entre la conductivité électrique avec le magnésium et les sulfates ($r = 0.64$) et le sodium ($r = 0.7$) et les chlorures ($r = 0.91$), indiquant que ces éléments contribuent largement à la minéralisation des eaux souterraines dans l'aquifère étudié. Par contre le calcium, potassium et les nitrates montrent une corrélation très faible avec la conductivité électrique ($r < 0.5$), indiquant une faible participation de ces ions dans la salinisation totale des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada (Kenniche et al. 2022).
- Le pH est anté-corrélé avec toutes les variables.
- une corrélation significative entre le sodium et les chlorures avec un coefficient de corrélation de ($r = 0.79$), ce qui suggère que la dissolution des halites pourrait être le principal facteur affectant le comportement de l'hydrochimie de l'eau (Debieche, 2002).
- Le magnésium est fortement corrélé avec les chlorures ($r = 0.65$) et les sulfates ($r = 0.64$).

Tableau IV.3 : Matrice de corrélation de Pearson globale des paramètres physico-chimiques pour l'aquifère karstique des Monts de Sidi Kada

Variables	pH	T°C	CE (mS/cm)	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	Cl^- (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	SiO_2 (mg/l)	NH_4^+ (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	PO_4^{3+} (mg/l)
pH	1														
T°C	-0.250	1													
CE (mS/cm)	-0.178	-0.099	1												
Ca^{2+} (mg/l)	-0.045	0.151	0.392	1											
Mg^{2+} (mg/l)	-0.250	0.003	0.647	0.036	1										
Na^+ (mg/l)	-0.118	-0.034	0.706	0.224	0.385	1									
K^+ (mg/l)	-0.021	-0.177	0.303	0.059	0.245	0.330	1								
NO_3^- (mg/l)	0.081	0.041	0.260	0.148	0.568	0.068	0.086	1							
SO_4^{2-} (mg/l)	-0.221	0.043	0.648	0.442	0.648	0.543	0.409	0.252	1						
Cl^- (mg/l)	-0.097	-0.207	0.916	0.339	0.651	0.799	0.314	0.276	0.615	1					
HCO_3^- (mg/l)	-0.026	0.531	-0.260	0.260	-0.176	-0.211	-0.119	-0.122	-0.056	-0.434	1				
SiO_2 (mg/l)	-0.235	-0.014	0.302	0.088	0.205	0.492	0.146	-0.221	0.292	0.327	0.024	1			
NH_4^+ (mg/l)	0.101	0.043	-0.056	-0.244	-0.240	0.451	-0.020	-0.218	-0.047	0.044	-0.014	0.242	1		
NO_2^- (mg/l)	-0.212	-0.116	0.475	0.311	0.190	0.526	0.162	-0.047	0.252	0.546	-0.213	0.139	0.090	1	
PO_4^{3+} (mg/l)	0.150	-0.223	0.218	0.189	0.085	0.204	0.042	0.240	0.060	0.230	-0.151	0.059	-0.127	0.040	1

I.3.4.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

Pour comprendre les différents types d'eau de la région d'étude, l'investigation statistique des résultats obtenus a été approfondie. La méthode classification ascendante hiérarchique (CAH) est utilisée pour distinguer les groupes d'eau présentant des similitudes dans la composition hydro-chimique (Najib et al. 2016). Le dendrogramme obtenu par la Classification Ascendante Hiérarchique a révélé l'existence de trois classes d'eau (Figure IV.10).

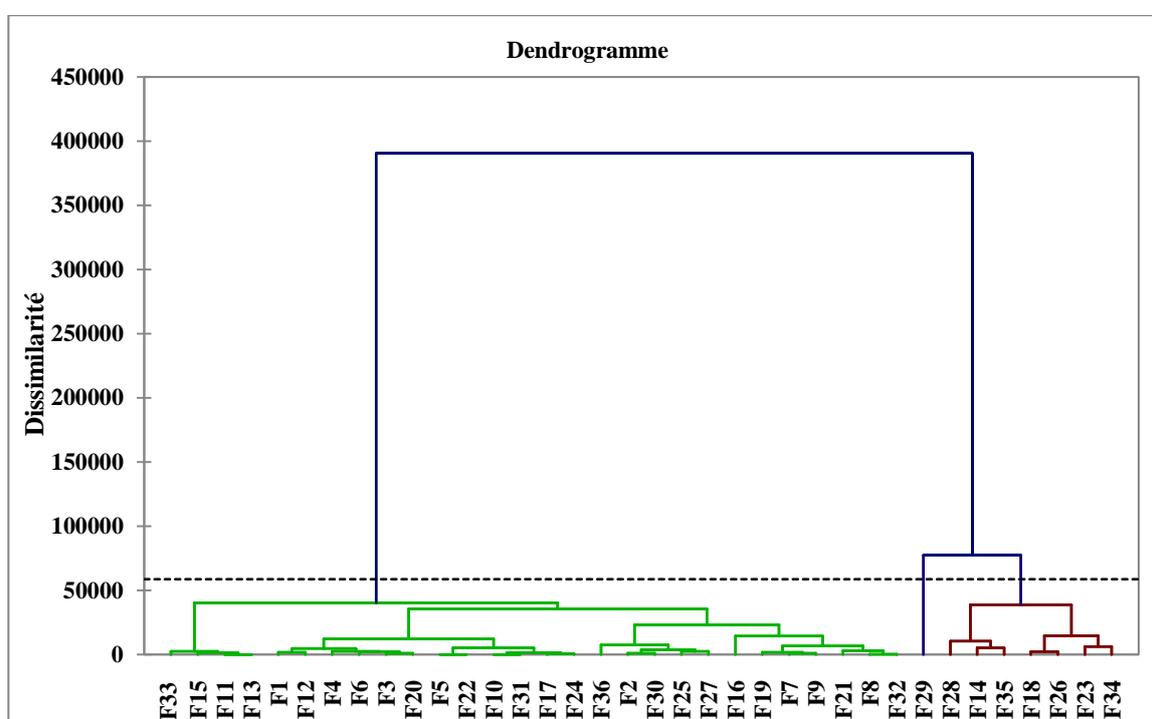


Figure IV.10 : Analyse hiérarchique des eaux souterraines

La classe 1 comprend 28 puits représentant 78 % des échantillons d'eau. Ils sont caractérisés par une salinité faible qui varie entre 0.67 mS/cm et 1.16 mS/cm, avec une moyenne de 0.86 mS/cm et un écart-type de l'ordre de 0.12 mS/cm (Tableau IV.4). Les résultats des analyses chimiques des principaux éléments montrent la prédominance du calcium, du chlorure et des bicarbonates, avec des moyennes de 78.13, 94.36 et 413.91 mg/l, respectivement. Les concentrations élevées en Ca sont également l'indice d'une combinaison de plusieurs processus et facteurs : géologique (dissolution d'évaporite), hydro-chimique (échange cationique) ou météorologique (évaporation et reconcentrations des sels). Ce groupe est caractérisé par des concentrations faibles en nitrates qui

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

ne dépassent dans aucun point la norme de potabilité, en plus le potassium est présent avec de concentration très faible.

La seconde classe (classe 2) regroupe 19 % des points d'eaux totale. La moyenne de salinité pour cette classe est de 1.45 mS/cm. Cette classe est essentiellement dominée par les bicarbonates et les chlorure. Ils varient entre 300 mg/l et 432 mg/l, 211 mg/l et 416 mg/l, respectivement. Les teneurs en nitrate s'échelonnent entre 7 mg/l et 42 mg/l. Les concentrations moyennes en sodium et sulfate sont respectivement de 128 mg/l et 149.86 mg/l.

La troisième classe (classe 3) est représentée par un puits (F29) et concerne 3 % des échantillons d'eau. Cette classe est marquée par une salinité moyenne (1.20 mS/cm), une prédominance de bicarbonates, de chlorure et de magnésium, avec des valeurs de 98 mg/l, 282 mg/l et 103 mg/l, respectivement.

Tableau IV.4 : Statistique descriptives des trois classes obtenues à partir de la CAH

Paramètre	Classe 1				Classe 2				Classe 3
	Min	Max	Moy	Ecart-type	Min	Max	Moy	Ecart-type	
pH	6.8	8	7.43	0.30	7	7.9	7.31	0.35	7.6
T°C	16.3	25	21.49	2.78	18	24	21.04	2.23	17.3
CE (mS/cm)	0.67	1.16	0.86	0.12	1.09	1.82	1.45	0.29	1.20
Ca ²⁺ (mg/l)	31	120	78.13	23.26	56	120	93.43	19.69	36
Mg ²⁺ (mg/l)	26	90	60.18	15.20	75	142	104.00	29.75	103
Na ⁺ (mg/l)	14	157	47.11	26.66	92	161	128.00	24.00	58
K ⁺ (mg/l)	1	23	3.64	4.47	2	10	5.86	3.39	8
NO ₃ ⁻ (mg/l)	2	32	15.39	9.36	7	42	23.86	14.70	38
SO ₄ ⁻ (mg/l)	16	144	69.30	37.21	92	208	149.86	48.47	72
Cl ⁻ (mg/l)	34	170	94.36	40.90	211	416	307.71	79.47	282
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	337	505	413.91	43.81	300	432	368.43	46.48	98
SiO ₂ (mg/l)	6.2	23.4	13.14	4.68	9.86	32	18.49	7.32	11
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0	0.49	0.06	0.09	0	0.12	0.06	0.05	0.05
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0	0.08	0.02	0.02	0	0.35	0.09	0.12	0.01
PO ₄ ³⁺ (mg/l)	0	2.04	0.32	0.45	0	15.5	2.72	5.69	0.15

I.3.4.3. Analyse en composante principal (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique essentiellement descriptive; son objectif est de présenter, sous une forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données. Ce tableau doit être constitué, en lignes, par des individus sur lesquels sont mesurées des variables quantitatives (Khadri, 2009). L'analyse en composantes

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

principales (ACP) est réalisée à l'aide de 36 puits échantillonnés et de 15 variables. pH, T, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , SiO_2 , NH_4^+ , NO_2^- et PO_4^{3+} . Cette méthode permet à la fois de réduire les données et de les interpréter facilement (Houatmia et al. 2015).

Le tableau suivant montre les valeurs propres ainsi que leurs variabilités simples et cumulées.

Selon le critère de KAISER nous avons choisi quatre premiers facteurs de l'ACP (valeur propre supérieure à l'unité) après une rotation varimax, qui expriment 64.56 % de la variance totale dans l'ensemble des données d'origine.

Tableau IV.5 : Valeur propre et pourcentage de la variance exprimée

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	4.71	2.01	1.73	1.23
Variabilité (%)	31.42	13.40	11.52	8.22
% cumulé	31.42	44.82	56.34	64.56

Tableau IV.6 : Poids factoriels des principales composantes principales (avec rotation varimax).

	F1	F2	F3	F4
pH	-0.23	-0.08	-0.50	-0.41
T°C	-0.14	0.41	0.70	0.11
CE (mS/cm)	0.91	0.08	-0.02	0.03
Ca²⁺ (mg/l)	0.41	0.28	0.04	0.54
Mg²⁺ (mg/l)	0.70	0.47	0.01	-0.25
Na⁺ (mg/l)	0.83	-0.35	0.18	-0.18
K⁺ (mg/l)	0.43	0.02	-0.02	-0.34
NO₃⁻ (mg/l)	0.30	0.67	-0.30	-0.29
SO₄²⁻ (mg/l)	0.77	0.25	0.17	-0.04
Cl⁻ (mg/l)	0.94	-0.05	-0.10	-0.04
HCO₃⁻ (mg/l)	-0.36	0.56	0.45	-0.27
SiO₂ (mg/l)	0.42	-0.33	0.42	-0.12
NH₄⁺ (mg/l)	0.03	-0.62	0.36	-0.45
NO₂⁻ (mg/l)	0.58	-0.31	0.03	0.41
PO₄³⁺ (mg/l)	0.27	0.00	-0.57	0.05

Le facteur F1 explique 31.4 % de la variance totale. Le facteur F1 est fortement corrélé avec la conductivité électrique (0.91), le magnésium (0.70), le sodium (0.83), le sulfate (0.77) et le chlorure (0.94). Ce facteur représente la minéralisation (ou la salinité) des eaux. C'est le mécanisme le plus important qui impacte la chimie des eaux dans l'aquifère étudié. Les paramètres HCO_3^- , T et pH sont négativement corrélés avec ce facteur. Les échantillons avec des

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

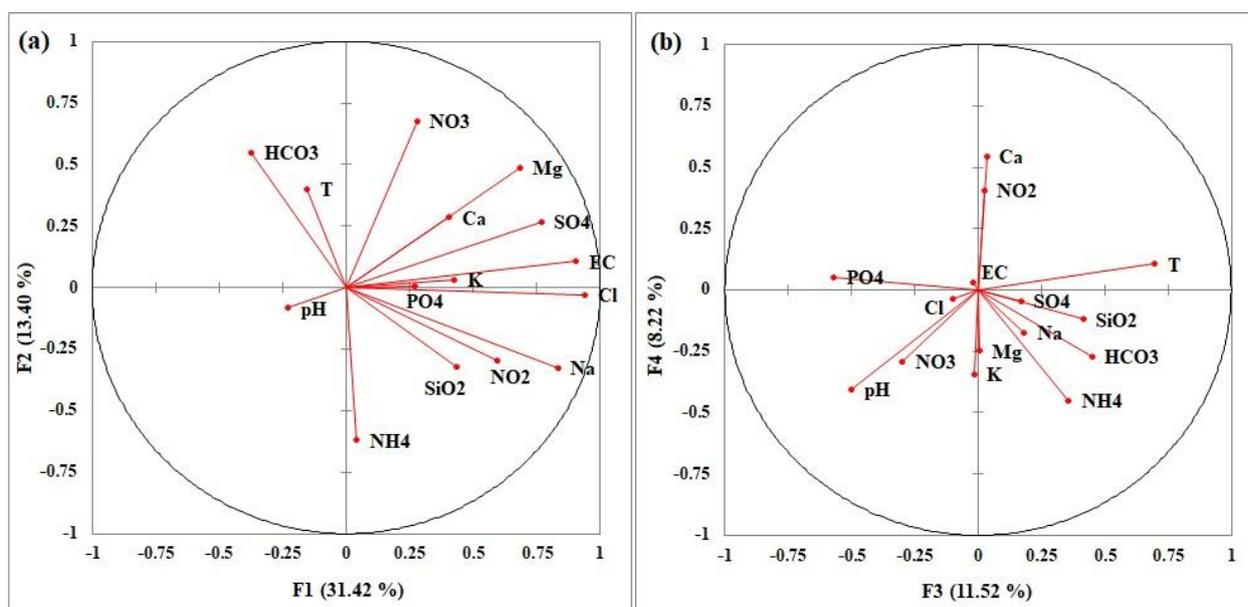
concentrations en bicarbonates et des températures plus élevées sont originaires de l'aquifère karstique profond, alors que l'eau plus minéralisée a une origine superficielle (Kenniche et al. 2022).

Le facteur F2 représente 13.4 % de la variance totale. Il est caractérisé par une corrélation positive avec les nitrates (0.67) et les bicarbonates (0.56), une corrélation négative élevée avec l'ammonium (-0.62) et une faible corrélation pour les restes.

Les corrélations élevées de NO_3^- et NH_4^+ au facteur F2 peuvent être attribuées aux activités agricoles et à l'utilisation intensive des engrais et/ou une contamination par les fosses septiques. La corrélation négative de l'ammonium peut être expliquée par l'oxydation de ce dernier (nitrification) qui est une source importante de NO_3^- . La nitrification est un processus en deux étapes dans lequel le NH_4^+ est d'abord converti en NO_2^- puis en NO_3^- par des micro-organismes spécifiques (Jalali, 2010). Le NH_4^+ provient principalement de l'épandage d'engrais azotés organiques ou inorganiques par les agriculteurs.

Le facteur F3 explique 11.5 % de la variance totale. Il est caractérisé par une corrélation positive élevée avec la température (0.70) et une corrélation négatives moyenne avec le pH (-0.50) et les phosphates (-0.57). Ce facteur peut être expliqué par la pollution au phosphore d'origine minérale et engrais de fumier.

Le facteur F4 représente 8.2 % de la variance totale. F4 montre une corrélation positive avec le calcium (0.54), ce qui indique une influence de la dissolution des minéraux carbonatés (Zhang et al. 2014).



Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Figure IV.11 : Projections des variables selon le plan factoriel (a) F1/F2 et (b) F3/F4

I.3.5. Etude des ions majeurs

Afin de mieux comprendre les processus de minéralisation des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada, nous allons essayer de formuler des hypothèses sur l'origine des ions par l'établissement des corrélations entre les éléments chimiques par le biais de diagrammes binaires, l'analyse des indices de saturation vis-à-vis des minéraux potentiellement existant dans les eaux souterraines.

I.3.5.1. Etude des indices de saturation des eaux par rapport aux minéraux

La connaissance de la saturation des eaux vis-à-vis de certains minéraux apporte des éléments clés à la compréhension des phénomènes d'équilibre dans les eaux. Ainsi, elle permet de définir la forme chimique sous laquelle certains ions sont transportés dans la solution (Ben Hamouda, 2008). En effet, les processus de la dissolution/précipitation de l'halite, du gypse, de l'anhydrite, de la calcite et de la dolomite sont mis en évidence par le calcul de l'indice de saturation par le code PHREEQC (Plummer et al. 1976 ; Parkhurst and Appelo 1999). L'équilibre eau minéral est souvent exprime par l'indice de saturation (IS) calculé par la formule suivante :

$$IS = \text{Log} (PAI/Ks) \quad \text{IV.12}$$

Avec :

PAI : le produit d'activité ionique des ions concernent,

Ks : la constante d'équilibre.

Une solution est en équilibre avec une phase minérale lorsque IS est égale à 0 (flux de dissolution égal au flux de précipitation). La solution est dite sous-saturée lorsque IS est inférieur à 0 et sursaturée lorsqu'il est supérieur à 0. Vu l'incertitude sur les mesures relatives aux paramètres physico-chimiques in situ et l'analyse des éléments chimiques, la saturation est obtenue dans un domaine plus large $-0.1 < IS < 0.1$. L'ensemble des calculs qui conduit aux indices de saturation a été réalisé avec le logiciel Diagramme.

Tableau IV.7 : Statistique sur les Indices de saturation des principaux minéraux présents dans les eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.

	IS Anhydrite	IS Calcite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Halite
Min	-2.63	-0.51	-0.55	-2.41	-7.74

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Max	-1.61	1.04	2.13	-1.38	-5.79
Moy	-2.10	0.26	0.76	-1.87	-6.83

L'ensemble des points analysés indiquent une sous-saturation vis-à-vis de l'anhydrite, du gypse et de l'halite. L'état de sous-saturation de ces minéraux explique bien les fortes teneurs en Cl^- , Na^+ et SO_4^{2-} . Les réactions entre ces minéraux et l'eau sont données par les équations IV.13, IV.14 et IV.15. En revanche, un état de saturation vis-à-vis de la calcite (CaCO_3) et de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) est observé dans les échantillons d'eau analysée.

Les résultats de calculs des indices de saturations des eaux analysées vis-à-vis de certains minéraux sont représentés sur la figure IV.12.

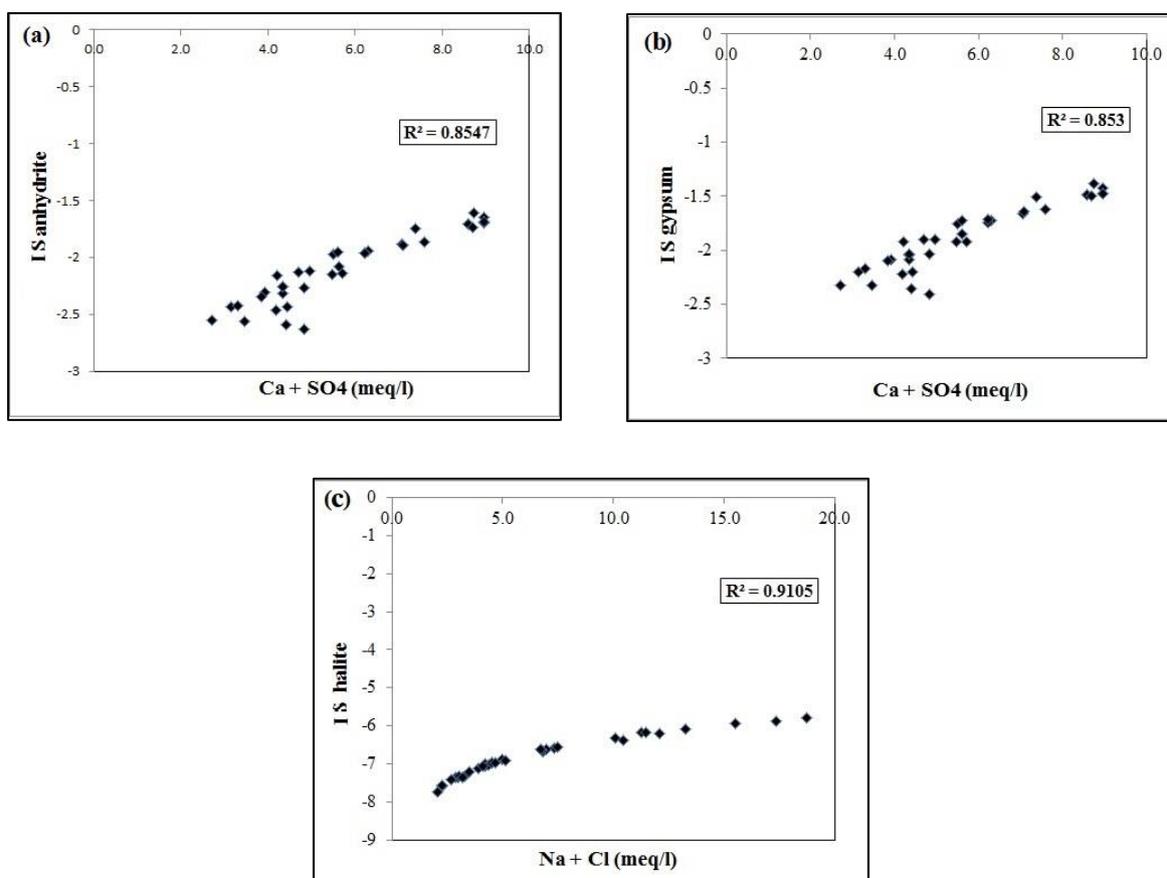
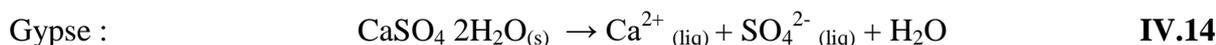
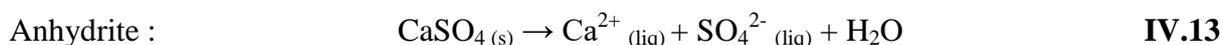


Figure IV.12 : Relations entre les éléments chimiques majeurs et les indices de saturations : (a): IS anhydrite versus $\text{Ca} + \text{SO}_4^{2-}$, (b): IS gypse versus $\text{Ca} + \text{SO}_4$, (c): IS halite versus $\text{Na} + \text{Cl}$

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

La figure IV.12c montre une corrélation positive importante ($R^2 = 0.91$) qui existe entre les indices de saturation de l'halite et les concentrations de $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$. Ceci confirme que les ions Na^+ et Cl^- dissous dans les eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada, ont une origine commune qui serait la dissolution de la halite (Kamel et al. 2006 ; Garcia et al. 2001). Cependant, une forte corrélation ($R^2 = 0.85$) est observée entre les indices de saturation de l'anhydrite, du gypse et les concentrations de $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ (Figure IV.12a et IV.12b). Les eaux de l'aquifère étudié sont sous-saturées en gypse et en anhydrite, ce qui vient à renforcer l'hypothèse de la dissolution de ces minéraux dans les eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada (Bekkoussa, 2009 ; Debieche, 2002).

I.3.5.2. Origine et comportement de quelques éléments majeurs

Afin de bien souligner les processus majeurs contrôlant la chimie des eaux souterraines dans l'aquifère karstique des montagnes de Sidi Kada, différents diagrammes sont réalisés.

-Les carbonates (ions Ca-Mg- HCO_3)

L'anion dominant est le bicarbonate qui semble cohérent avec la géologie locale composée de roches calcaires et dolomites. Le cation associé Ca^{2+} ou Mg^{2+} (Figure IV.13) permet de retracer les contributions liées aux processus de dissolution des carbonates mais aussi du gypse qui est présent dans la zone, ainsi que les interactions avec les couches de silicate ou argile trouvées dans la formation carbonatée qui produisent également du bicarbonate (Mg/Ca) à partir de la plagioclase Ca^{2+} , de l'amphibole et des phyllosilicates. Dans le cas de l'Anorthite :



Sur la figure IV.13, certains échantillons d'eau sont distribués près ou en dessous de la ligne de relation $y=x$, indiquant que Ca^{2+} ou Mg^{2+} proviennent des processus décrits ci-dessus à savoir la dissolution des silicates (Liu et al. 2021). Cependant, la plupart des échantillons sont situés sous la ligne $y = x$ indiquant un excès de Ca^{2+} et/ou de Mg^{2+} qui sont dû à la dissolution des carbonates ou/et un processus d'échange cationique (échange entre Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les argiles et Na^+ dans l'eau).

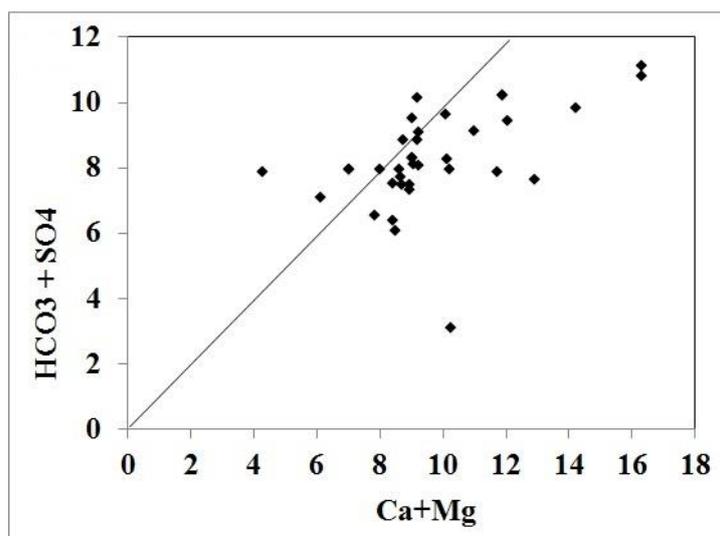


Figure IV.13 : Relation entre (HCO + SO4) vs (Ca + Mg)

-Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

Ces deux éléments chimiques sont souvent liés à la dissolution de l'halite dans les eaux naturelles. Le graphique de Na^+ versus Cl^- , représenté sur la Figure IV.14, montre que plusieurs points sont proches de ($\text{Na}/\text{Cl}=1$) indiquant la dissolution de l'halite (Askri et al. 2016 ; Fadili et al. 2016). Cependant, la majorité des autres points (sauf un) montrent un excès de Cl^- par rapport à Na^+ , ce qui pourrait être lié à des réactions de dissolution des évaporites contenant Cl tel que le MgCl_2 présentes dans les couches géologiques, ou la contamination des effluents domestiques.

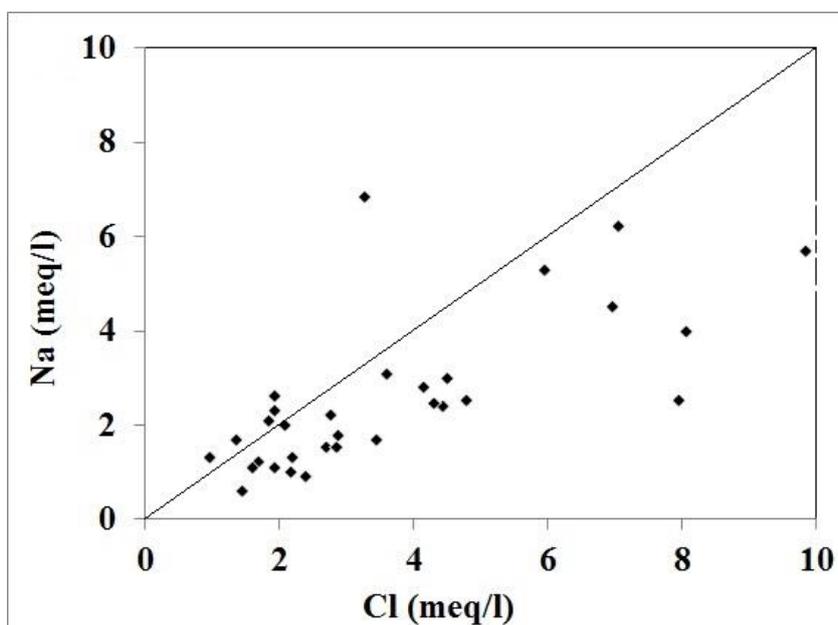


Figure IV.14 : Relation entre les ions Na et Cl

-Le couple $\text{Ca}^{+2} / \text{SO}_4^{2-}$

Le graphe binaire de variation de Ca^{+2} en fonction de SO_4^{2-} , reporté dans la figure IV.15 montre que tous les points d'eau sont situés au-dessus de la ligne 1: 1. Un excès en Ca par rapport aux SO_4^{2-} observé pourrait être expliqué par l'existence d'autre origine pour le calcium autre que la dissolution du gypse.

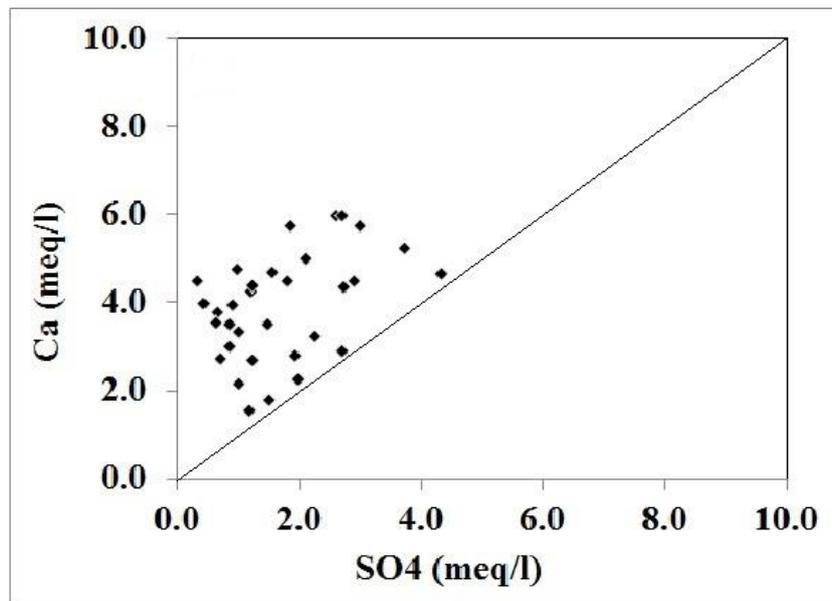


Figure IV.15 : Relation entre les ions Ca et SO_4

Le phénomène d'échange cationique est mis en évidence par la relation $[(\text{Ca}+\text{Mg}) - (\text{SO}_4+\text{HCO}_3)]$ en fonction de $[(\text{Na}+\text{K}) - \text{Cl}]$. Le diagramme d'échange cationique représenté dans la figure IV.16 souligne que près de 70% des échantillons d'eau souterraine tombent sur la ligne droite avec une pente -1.05. Ces échantillons sont situés sur le côté gauche du diagramme de dispersion, représentant l'appauvrissement en Na^+ et un dégagement d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} (Hadj Ammar et al, 2014). Cette caractéristique a confirmé que l'échange d'ions pourrait être un processus important dans le comportement hydrochimique de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada (Garcia et al. 2001).

Soixante-dix pour cent des échantillons montrent un échange entre $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ dans les argiles avec Na^+ dans l'eau (Motni et al, 2012).

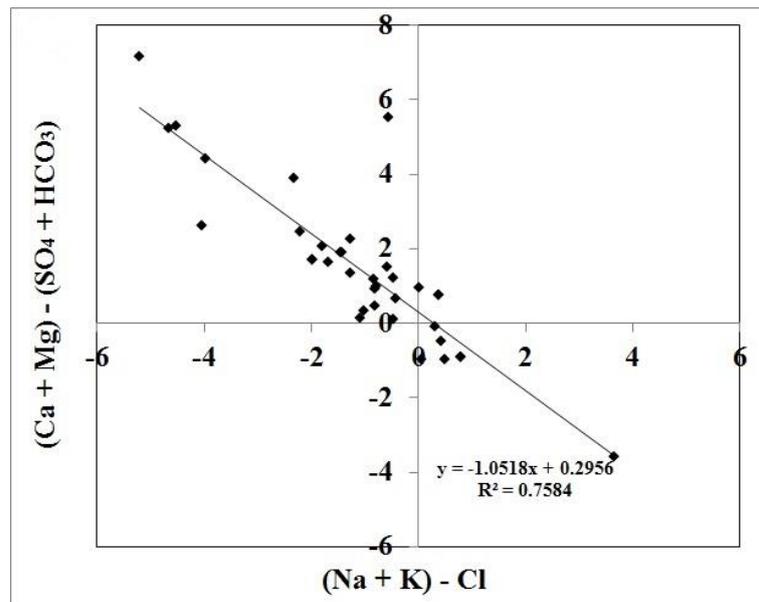


Figure IV.16 : Diagramme d'échange cationique

-Le couple Ca^{+2} / Mg^{+2}

Des diagrammes binaires (Figure IV.17 et IV.18) ont été utilisés pour distinguer les différentes origines de Ca^{2+}/Mg^{2+} (altération des carbonates, altération des silicates, dissolution des évaporites) (Paul et al. 2019).

Le rapport Mg/Ca peut être utilisé pour analyser l'influence de l'altération des carbonates (calcite et dolomie) et des silicates sur les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines. Un rapport Mg/Ca variant entre 0.5 (dominance calcite) et 1 (dominance dolomie) indique le domaine de la dissolution des carbonates, tandis que des valeurs faibles de ce rapport (inférieures à 0.5) indiquent la dissolution des silicates principalement plagioclase-Ca et amphibole-Ca (Liu et al. 2021; Ruiz-Pico et al. 2019). La figure IV.17 montre que les échantillons d'eau tombent principalement dans des zones représentatives de la dissolution de la calcite et de la dolomie confirmant que la composition hydrochimique des eaux est plus impactée par la dissolution des carbonates que par l'altération des silicates (Motni et al. 2012). Cependant, les échantillons avec un rapport Mg/Ca supérieur à 1.5 sont probablement impactés par la dissolution de $MgCl_2$, et ce compte tenu de la forte corrélation observée entre Mg^{2+} et Cl^- ($R = 0.65$).

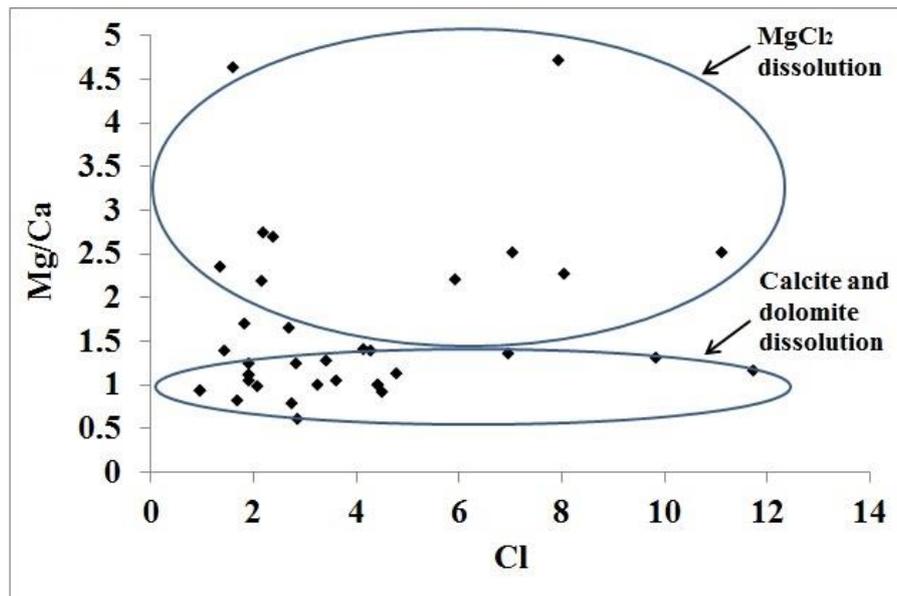


Figure IV.17 : Relation Mg /Ca vs Cl

Les deux figures IV.18a et IV.18b suggèrent une influence de l'altération des silicates et confirment le rôle des carbonates dans le processus de minéralisation de l'eau. Une forte corrélation est observée entre les rapports élémentaires Ca/Na vs. HCO_3/Na ($R^2=0.77$), montrant effectivement l'influence à la fois des silicates et des carbonates. On observe également que certains points ont tendance à se rapprocher de la zone d'altération carbonatée (Ruiz-Pico et al. 2019). L'altération des silicates est confirmée par les concentrations importantes de SiO_2 dans les échantillons (14.2 mg/l en moyenne). Les silicates proviennent de certaines formations gréseuses incrustées dans l'aquifère jurassique et observés dans de nombreuses diagraphies stratigraphiques de forages.

La part de dissolution des évaporites à l'origine du Ca^{2+} et du Mg^{2+} est marginale, ce qui est confirmé par les données, où 84 % des échantillons présentent un rapport sulfate/carbonate inférieur à 30 %.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

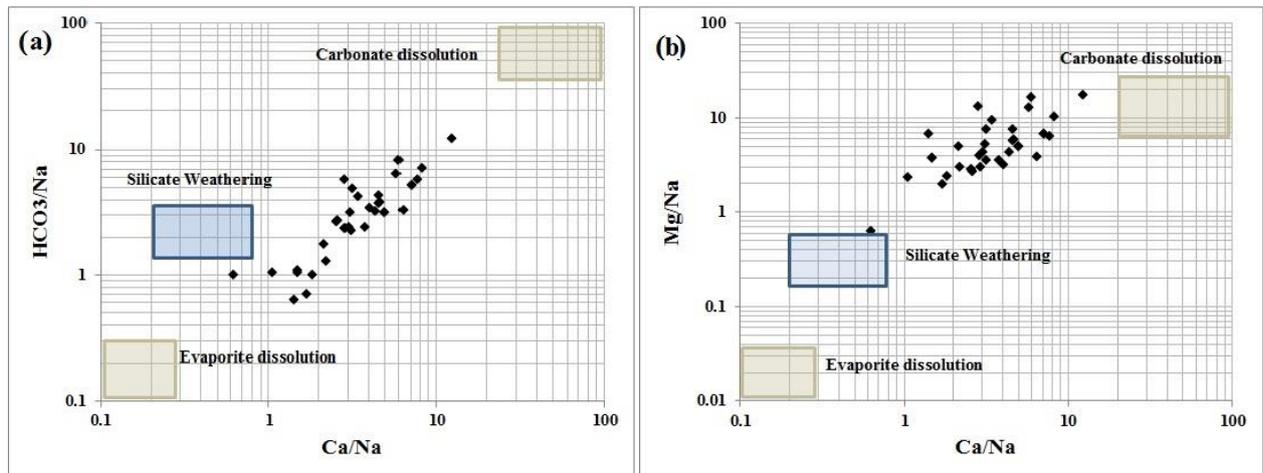


Figure IV.18 : Diagrammes bivariable (a) : HCO₃/Na vs Ca/Na ; (b) : Mg/Na vs Ca/Na

I.3.6. Altération des roches

De nombreux processus naturels contrôlent la géochimie des eaux souterraines tels que la dissolution des minéraux, l'hydrolyse dans la zone d'altération, l'échange d'ions, l'oxydoréduction, les précipitations, etc.

Gibbs (1970) a suggéré qu'un graphe représentant le TDS par rapport au $\text{Na} / (\text{Na} + \text{Ca})$ et $\text{Cl} / (\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ pourrait fournir des informations sur l'importance relative des principaux mécanismes naturels de contrôle de la chimie des eaux souterraines. Les diagrammes de Gibbs (figure IV.19) indiquent que tous les échantillons sont situés dans la région de dominance d'interaction avec la roche. Ces diagrammes mettent clairement en évidence que la composition des eaux souterraines est influencée par les processus d'altération et/ ou dissolution des roches. De plus, les concentrations en ions bicarbonate dépassent de loin les sulfates et les chlorures pour la majorité des échantillons, ce qui indique que l'interaction roche-eau, plutôt que l'apport de polluants de l'atmosphère et/ou des sols, est le processus dominant contrôlant l'évolution chimique de ces eaux (Rose 2002).

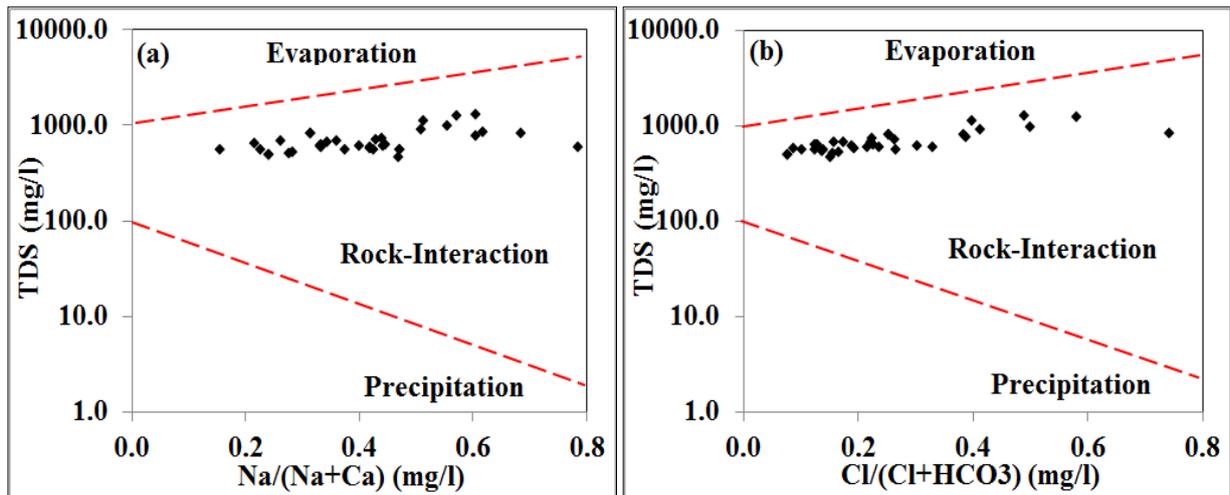


Figure IV.19: Diagrammes de Gibbs

II. Etude de qualité bactériologique des eaux

La détection et la quantification de tous les micro-organismes présents dans l'eau et potentiellement pathogènes prend du temps, les coûts sont élevés et les résultats obtenus ne sont pas toujours positifs ou ne permettent pas de confirmer la présence de micro-organismes. L'objectif de l'examen microbiologique de l'eau est de fournir des informations quant à la potabilité, c'est à dire sans risque d'ingestion de micro-organismes qui causent des maladies, provenant généralement d'une contamination par des matières fécales humaines ou d'autres animaux à sang chaud. Soulignons que les micro-organismes présents dans les eaux naturelles sont pour la plupart inoffensifs pour la santé humaine (Locas et al. 2008). Ces micro-organismes pathogènes incluent notamment les virus, les bactéries, les protozoaires et les helminthes. Les germes pathogènes sont généralement associés aux coliformes et streptocoques fécaux: la présence de ces derniers indique une pollution par les eaux vannes, les eaux de station d'épuration, les rejets d'élevages industriels...etc, et la possibilité d'occurrence de germes pathogènes (Yasin et al. 2015).

Notre but est d'évaluer la qualité bactériologique de l'eau de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada, d'identifier les différents germes responsables de la pollution de ces eaux et de définir les principales causes de cette pollution.

II.1. Généralité sur les paramètres bactériologique

L'objectif de l'examen microbiologique de l'eau est de fournir des informations quant à la potabilité, c'est à dire sans risque d'ingestion de micro-organismes qui causent des maladies, provenant généralement d'une contamination par des matières fécales humaines ou d'autres animaux à sang chaud. Cette étude consiste à rechercher :

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

II.1.1 Les coliformes

Ce sont des bactéries gram négatif appartenant à la famille des Enterobacteriaceae qui sont capables de fermenter le lactose. Les coliformes sont d'origine animale et humaine, leur présence indique une contamination récente par des matières fécales (Khadri S, 2009). Ce groupe est constitué de deux catégories de bactéries : les coliformes totaux et les coliformes fécaux.

- a) **Les coliformes totaux :** Ce sont des bâtonnets, anaérobie facultatif, gram (-) non sporulant, ils sont utilisées comme indicateur de la qualité microbiologique de l'eau. Ils sont présents dans les excréments d'animaux, le sol et la végétation et peuvent avoir d'autres sources à part la matière fécale à savoir les cours d'eau, les eaux de ruissellement et certains types d'effluents industriels (Ghazali D et Zaid A, 2013). Ce groupe est présenté par les germes (Enterobacter, Serratia, Yersinia, Rahnella, et Buttiauxella). La présence de ces bactéries dans les puits peut signifier que les eaux de surface s'infiltrent dans les puits.
- b) **Les Coliformes Fécaux (Escherichia – Coli) :** E. coli est le seul membre du groupe des coliformes totaux que l'on trouve exclusivement dans les intestins des mammifères dont les humains. La présence d'E. coli dans de l'eau indique une contamination récente par des matières fécales, cela peut vouloir dire que l'eau est contaminée par du fumier ou des eaux usées provenant d'une fosse septique environnante ou encore d'un parc d'engraissement, et peut indiquer la présence possible de pathogènes responsables de maladies, comme des bactéries, des virus et des parasites. Même si la plupart des souches d'E. coli sont inoffensives, certaines souches, comme l'E. coli O157:H7, peut causer des maladies.

II.1.2. Les streptocoques fécaux

Les Streptocoques sont des témoins de contamination fécale assez résistant y compris dans les milieux salés. Ils peuvent aussi se multiplier dans les milieux à pH élevée (9.6), on peut donc les utiliser comme indicateurs de la présence d'organismes pathogènes, appelés aussi streptococcies à entérocoques groupe D, vivent dans l'intestin de l'homme et sont éliminés avec les celles (Payment et Locas, 2011). La localisation fréquente de l'infection sur les voies urinaires, les autres localisations sont les méninges l'endocardie.

II.1.3. Les Salmonelles

Elles sont transmises par l'ingestion d'une eau polluée par les eaux usée. Elles sont en général considérées comme pathogènes bien que leur virulence et leur pouvoir pathogène varient énormément (Rodier, 2009). Ce sont des entérobactéries bacilles à Gram négatifs, mobiles pour la plupart (ciliature péritriche), mais certaines sont immobiles. Ces germes provoquent chez l'homme

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

la fièvre typhoïde ou paratyphoïde, transmise d'homme à homme par l'intermédiaire d'aliments ou de boissons contaminés par les déjections.

II.1.4. Le vibron cholérique

le vibron cholérique ou le *Vibrio cholerae* est une bactérie à gram négatif, en forme de bâtonnet incurvé, mobile et responsable chez l'homme du choléra, une maladie épidémique contagieuse (Bechiri N, 2011). C'est un germe assez fragile, sensible à la lumière, à la chaleur, au froid, à la dessiccation et aux antiseptiques. Dans la nature il résiste longtemps dans l'eau, aux pluies, dans la boue et dans les égouts.

II.2. Analyse bactériologique

II.2.1. Echantillonnage

L'appréciation de la qualité bactériologique de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada a été suivie par le biais de l'analyse de l'eau récoltées au niveau de 36 puits en 2017. Ces échantillons ont été prélevés avec toutes les conditions d'asepsie nécessaires dans des contenants stériles de verre (flacons), d'une capacité d'environ 250 ml. Les flacons ont été stérilisés soit à l'autoclave 120°C pendant 15 minutes, soit au four Pasteur 170°C durant 1 heure. Les prélèvements ont été transportés dans une glacière dont la température été comprise entre 4 et 6 °C durant un délai maximal de 8 heures (Ouhmidou et al. 2015). Ces analyses sont effectuées au laboratoire biologique de l'université de Mustapha Stambouli – Mascara.

II.2.2. Méthodes d'analyses

II.2.2.1. Recherche des coliformes totaux

La colométrie consiste à déceler et à dénombrer les germes coliformes et parmi lesquels les coliformes fécaux.

Elle compte deux temps :

- La recherche présomptive des coliformes.
- La recherche confirmative des coliformes fécaux.

➤ **Milieux de culture et réactifs :**

- Bouillons lactose au pourpre de bromocrésol (BCPL) à double concentration (D/C) et simple concentration(S/C).
- Milieu de confirmation Schubert muni d'une cloche de durham.
- Réactif de Kovacs pour la recherche d'indole.
- Table NPP (Annexe I).

a) Test présomptif de la présence ou l'absence des coliformes

➤ **Mode opératoire:**

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Il est effectué en utilisant le bouillon lactose au pourpre de bromocrésol. Tous les tubes sont munis de cloches de Durham pour déceler le dégagement éventuel de gaz dans le milieu.

Ensemencement :

On utilise :

- Un flacon contenant 50ml de BCPL (D/C) avec 50ml d'eau à analyser.
- 5 tubes de 10ml de bouillon BCPL à double concentration avec 10 ml d'eau à analyser.
- 5 tubes de 10ml de bouillon BCPL à simple concentration avec 1ml d'eau à analyser.
- L'incubation se fait à 37°C ; la cloche ne devant pas contenir de gaz au départ.

Lecture :

- La lecture se fait 48h après l'incubation.
- Tous les tubes présentant un aspect trouble de couleur jaune avec du gaz dans la cloche sont considérés comme positif notés (+) c'est-à-dire qu'ils renferment des coliformes totaux.

Expression des résultats :

On note le nombre de tubes positifs dans chaque série et se reporte à la table NPP (Annexe I) pour obtenir le nombre de coliformes totaux contenus dans 100 ml.

b) Test confirmatif

➤ Mode opératoire:

- A partir de chaque tube BCPL positif (+) pour la recherche de coliformes totaux, ensemercer 2 à 3 gouttes dans un tube de milieu indole mannitol (milieu de Schubert) muni d'une cloche de Durham

- Incuber à 44°C pendant 24h.

- Ajouter 2 à 3 gouttes de réactif de Kovacs aux tubes contenant le bouillon de Schubert avec la cloche de Durham positif (+).

Lecture :

Tous les tubes présentant une réaction indole positive (anneau rouge en surface) sont considérés comme positifs (+).

Expression des résultats :

Le dénombrement des coliformes fécaux s'effectue de la même manière que celui des coliformes totaux et les résultats sont exprimés dans 100ml d'eau à analyser.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

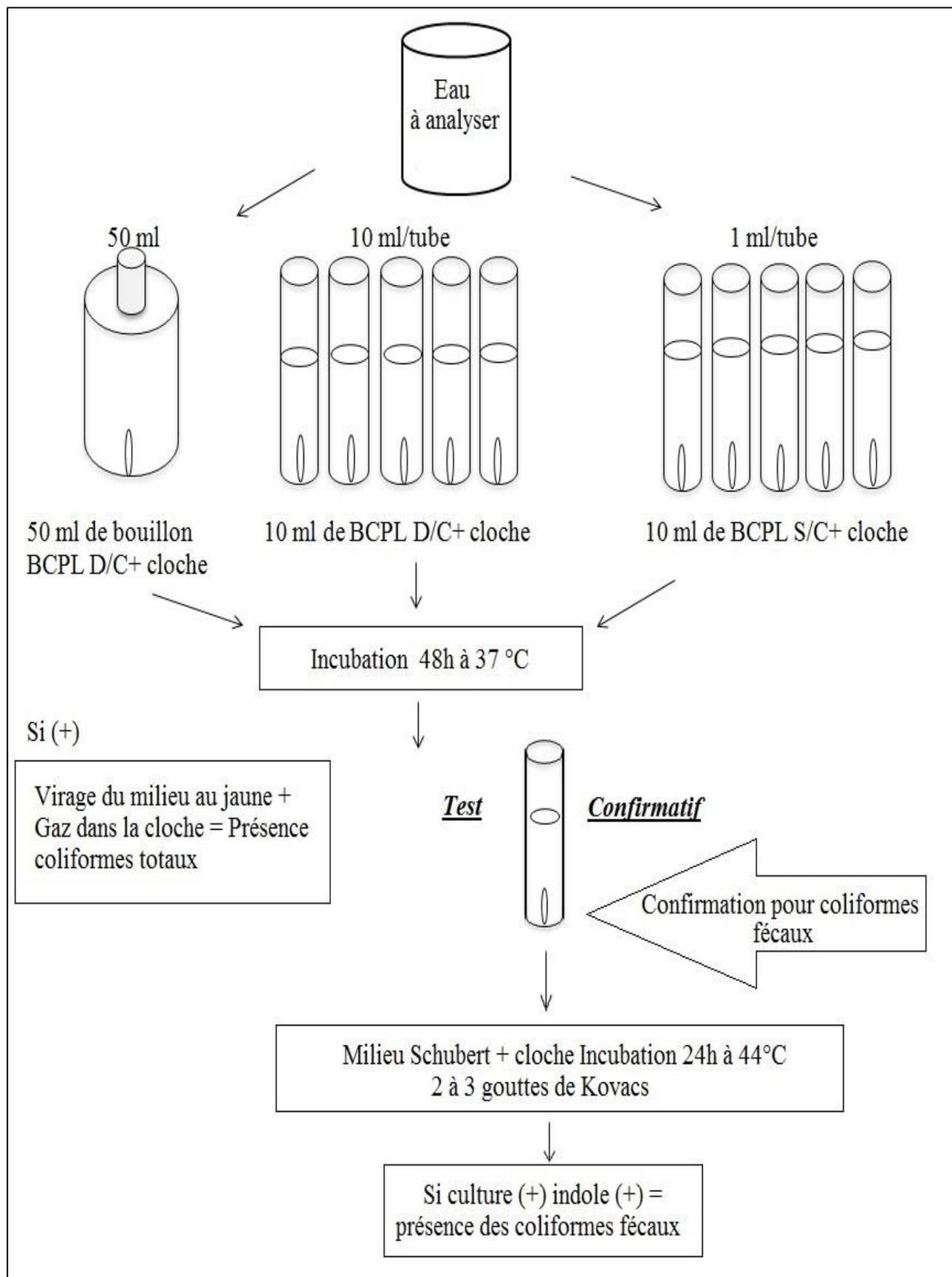


Figure IV. 20: Recherche et dénombrement des coliformes dans l'eau

II.2.2.2. Recherche des Streptocoques fécaux

➤ **Principe:**

Rechercher et dénombrer les streptocoques fécaux considérés comme des témoins de pollution fécale.

Elle compte deux temps :

- La recherche présomptive du streptocoque.
- La recherche confirmative des streptocoques fécaux.

➤ **Milieu de culture :**

- Milieu de Roth à D/C.
- Milieu de Roth à S/C.
- Milieu de litsky.

➤ **Mode opératoire:**

-1^{ère} étape : Test présomptif

La recherche se fait en bouillon à l'azide de sodium (bouillon de Rothe) simple et double concentration.

On ensemence :

- 1 flacon contenant 50ml de bouillon de Rothe double concentration avec 50 ml d'eau.
- 5 tubes de 10 ml de bouillon de Rothe double concentration avec 10 ml d'eau.
- 5 tubes de 10 ml de bouillon de Rothe double concentration avec 1 ml d'eau.
- Incubation pendant 48h à 37°C.

Lecture :

- Les tubes présentant une louche microbienne sont considérés comme susceptibles de contenir un streptocoque fécal.

- Le test confirmatif est obligatoire.

-2^{ème} étape : Test confirmatif

On ensemence :

- 2 à 3 gouttes dans un bouillon à l'éthyle violet et azide de sodium (EVA ou litsky), à partir de chaque tube positif (+).

- Incubation pendant 24h à 37°C.

Lecture :

- Tous les tubes présentant une culture et un jaunissement sont considérés comme positifs (+).

- On note généralement la présence dans le fond des tubes d'une pastille violette.

➤ **Expression des résultats :**

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Noter le nombre de tubes positifs (+) dans chaque série et se reporter aux tables du NPP pour connaître le nombre de streptocoques fécaux contenus dans 100ml d'eau.

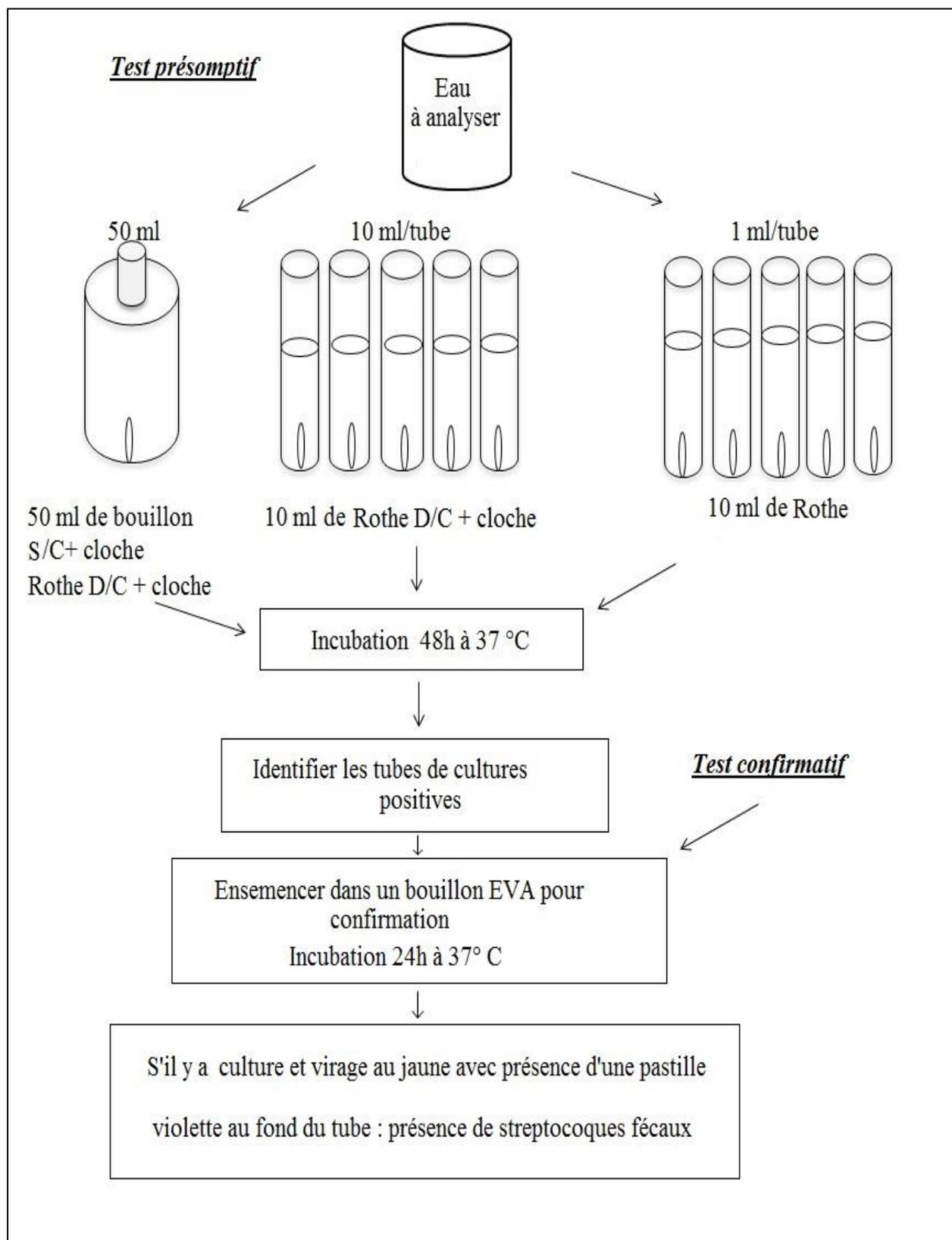


Figure IV. 21 : Recherche et dénombrement des streptocoques fécaux dans l'eau

II.2.2.3. Recherche des Salmonelles

➤ Milieu de culture:

- Bouillon au sélénite (SFB).
- Gélose Hektoen (HK).

➤ Mode opératoire :

-Phase du 1er enrichissement

Ensemencer séparément 2 flacons de 100ml d'eau à analyser dans deux flacons de SFB.

-Phase du 1er isolement et du 2ème enrichissement

Après agitation des flacons de SFB du 1er enrichissement, effectuer sur chacun d'eux :

- Un isolement sur 2 boîtes d'Hektoen (HK1).
- Un 2ème enrichissement en ensemençant 1 ml du SFB1 sur un tube de SFB simple concentration (SFB2).
- Incuber le tout pendant 24h à 37°C.

-Phase du 2ème isolement

- A partir du tube du 2ème enrichissement (SFB 2), effectuer un 2ème isolement sur deux boîtes d'Hektoen (HK2).
- Incuber pendant 24h à 37°C.

➤ Expression des résultats:

Sur Hektoen, les colonies de salmonelles sont de tailles moyennes, lisses colorées en vert (couleur du milieu) avec en général un centre noir exprimé par 100ml.

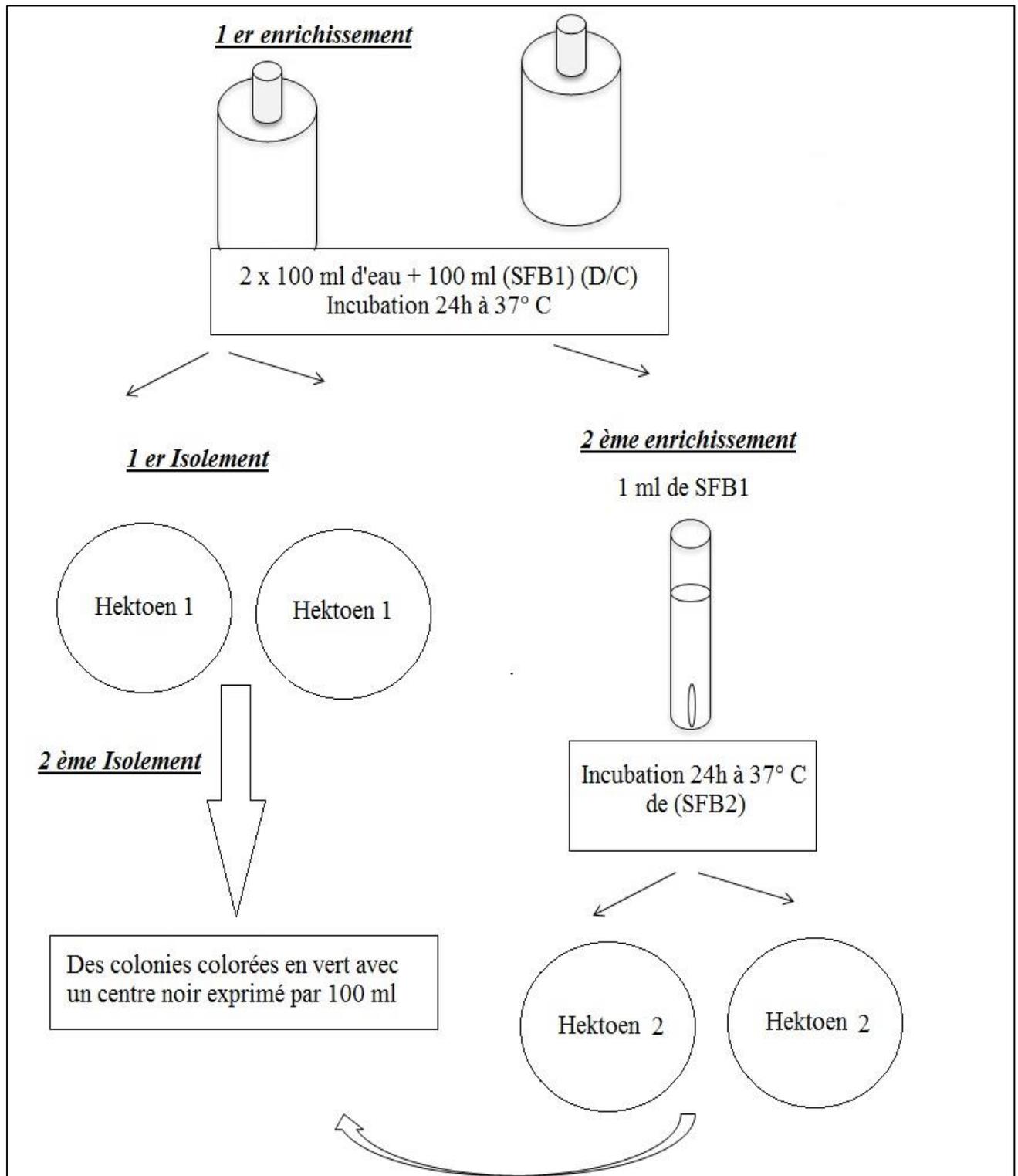


Figure IV. 22 : Recherche des salmonelles.

II.2.2.4. Recherche des Vibrions cholériques

➤ **Milieu de culture :**

- Gélose nutritive alcaline biliée (GNAB).
- Eau peptone alcaline concentrée 10 fois (EPA).

➤ **Mode opératoire :**

-Phase de prélèvement et du pré-enrichissement

- Prélever 450ml d'eau directement dans un flacon contenant 50ml de milieu de culture (eau peptone concentrée 10 fois).
- Incuber pendant 24h à 37°C.

-Phase d'enrichissement

A partir du premier enrichissement (EPA1) on effectue un premier isolement sur gélose GNAB 1.

- On réalise un deuxième enrichissement en portant 1 ml de flacon d'enrichissement sur eau peptone (EPA2).
- On incube pendant 24h à 37°C.
- On effectue un deuxième isolement à partir du deuxième enrichissement sur gélose

GNAB2.

- On incube pendant 24 h à 37°C.

➤ **Expression des résultats:**

Les colonies de vibrion cholérique ont 1 à 1,5mm de diamètre et sont transparentes, lisses et d'aspect légèrement bleuté.

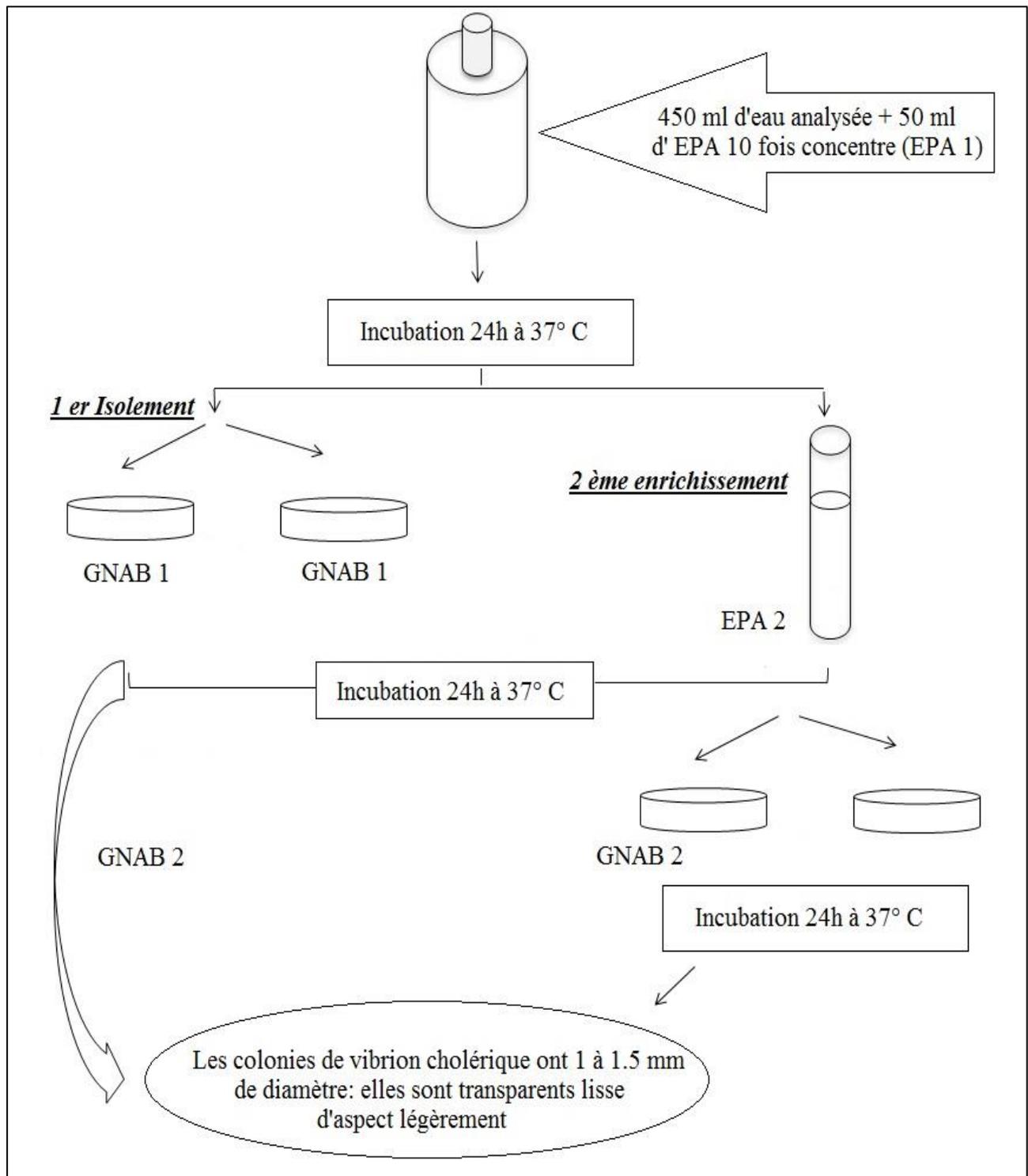


Figure IV. 23 : Recherche de vibron cholérique.

II.3. Résultats bactériologiques

D'après les résultats des paramètres bactériologiques qui sont représentés dans le tableau IV. 8, montre que les valeurs des coliformes totaux et fécaux varient entre 0 et 16 nb/10 ml et 0 et 6 nb/ml, avec des moyens de 2.42 et 0.63 nb/ml, respectivement.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Tableau IV. 8 : Les paramètres bactériologique de l'aquifère karstique

Paramètres bactériologique	Normes d'OMS (2011)	Normes Algérien (2011)	Min	Max	Moy	Ecarte - type
Coliformes totaux (nb/100 ml)	0	0	0	16	0.83	2.76
Coliformes fécaux (nb/100 ml)	0	0	0	6	0.17	1
Streptocoque fécaux (nb/100 ml)	0	0	0	0	0	0
Salmonella (nb/51 ml)	Absence	Absence	0	0	0	0
Vibron Cholérique (nb/10 ml)	Absence	Absence	0	0	0	0

Les résultats des analyses bactériologiques des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada sont présentés dans la figure IV. 24. Les analyses bactériologiques de l'eau indiquent que 19 % et 3 % des échantillons étaient caractérisés par la présence de coliformes totaux et fécaux, respectivement. La présence de ces bactéries dans les puits peut signifier que les eaux de surface s'infiltrent dans la nappe karstique et peut être dû à l'infiltration des eaux usées (rejets des stations d'épuration municipale, fosses septiques environnantes et/ou aux parcs d'engraissement) (Sharma et al. 2013). En ce qui concerne le nombre de streptocoques fécaux, de salmonelles et de vibrions cholériques était négligeable dans tous les échantillons d'eau souterraine.

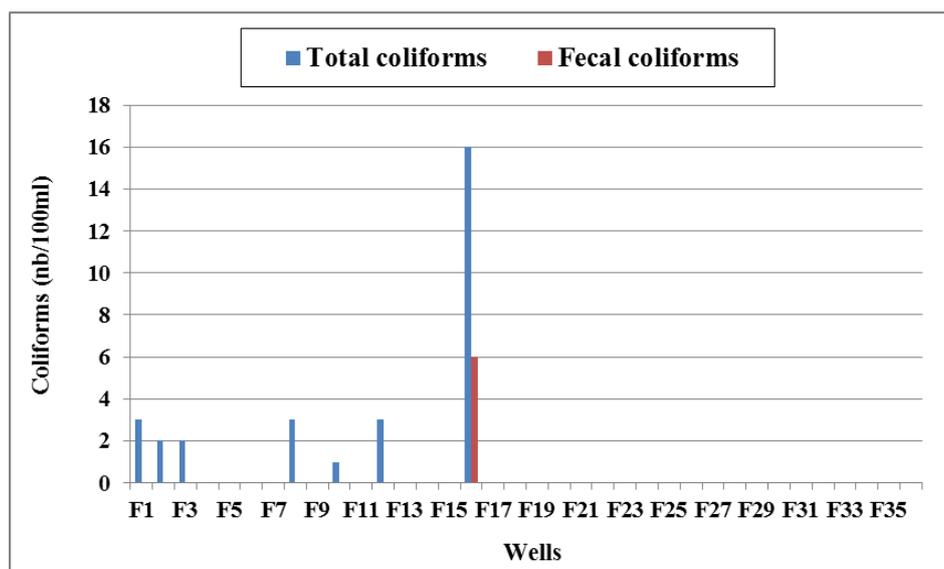


Figure IV. 24: Variation des coliformes totaux et fécaux des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

II.4. Les maladies à transmission hydrique (MTH)

Le mot MTH recouvre un large spectre de pathologie d'origine bactérienne parasitaire ou virale dont l'élément commun est le mode de contamination : l'eau.

L'eau est une ressource indispensable à la vie. D'autre part, elle représente la première cause de mortalité et de maladie dans le monde. En Algérie, malgré les efforts consentis, les résultats restent à ce jour insuffisants. Il est clair que les changements climatiques ainsi que le mode de gestion de l'eau est en étroite relation avec l'ampleur des maladies à transmission hydrique. Dans ce contexte, le concept de gestion intégrée des ressources dans un cadre multisectoriel permet d'actionner, au même temps, sur divers facteurs tels que : la réhabilitation du réseau d'assainissement et d'alimentation en eau potable, la tarification de l'eau, l'environnement, la prévention visant à assurer une gestion optimale. Par conséquent, il devient nécessaire de faire participer l'ensemble des intervenants dans le domaine de la gestion de l'eau afin d'assurer des résultats notables à un coût minimum. L'hospitalisation devra représenter le dernier recours contre ces maladies (Belghiti M.L, 2013).

II.4.1. Les différents types de maladies hydriques

L'eau contaminée par des excréments humains ou animaux est à l'origine des maladies dites du : Maladies péril fécal, qui sont provoqués par des virus (Les hépatites virales, Poliomyélite, ...etc.) et les maladies bactériennes, elles sont le plus souvent d'origine bactérienne (Le choléra, la fièvre typhoïde et les dysenteries) et les maladies parasitoses, elles sont provoqués par les parasite (La bilharziose, L'oxyurose....etc.).

a) Maladies d'origine bactérienne

Les eaux peuvent transmettre un certain nombre de maladies d'origine bactérienne. Parmi ces maladies on peut citer :

- **Le choléra** : est une maladie infectieuse épidémique produite par une bactérie vibron cholera, le vibron cholérique, caractérisée par des selles très fréquente, des vomissements, un amaigrissement rapide, un abattement profond avec abaissement de la température et pouvant se terminer par la mort.
- **Les fièvres typhoïdes, paratyphoïdes** : sont des infections causée par des bactéries qui sont transmises lors de l'ingestion d'aliments ou d'eau contaminée par des selles, une eau propre est un bon assainissement permettent de prévenir la propagation de la typhoïde et de la paratyphoïde. L'eau contaminée est l'une des voies de transmission de la maladie.
- **Les gastro-entérites (salmonella typhi, salmonella paratyphi A et B et E. coli)** : est une infection inflammatoire du système digestif pouvant entrainer de la nausée, des

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

vomissements, des crampes abdominales, des flatulences et de la diarrhée, ainsi que de la déshydratation, de la fièvre et des céphalées.

- **Les Schigelloses ou dysenteries bacillaires (shigella spp)** : sont des enterobavteriaceae pathogènes strictes, rencontrées exclusivement chez l'être humain. L'espèce shigella dysenteries est responsable de la dysenteries bacillaire ou shigellose. Les shigella sont des bactéries très proches d'Escherichia coli.

b) Maladies d'origine virale

A côté des maladies d'origine bactérienne, nous avons des maladies virales. On peut citer :

- **La poliomyélite (poliovirus)** : c'est une maladie très contagieuse provoquée par un virus qui envahit le système nerveux et peut entraîner une paralysie totale en quelques heures. Le virus se propage d'une personne à une autre principalement par la voie fécale- orale ou moins fréquemment par le biais d'un véhicule commun (eau ou aliments contaminés).
- **Les hépatites A (virus de l'hépatite A)** : une maladie aigue qui dure typiquement quelques semaines. Elle guérit spontanément la plupart du temps, sans laisser de séquelles. Elle n'évolue jamais vers une forme chronique.
- **Les hépatites E (virus de l'hépatite E)** : se comporte comme le virus de l'hépatite A et peut provoquer le même type d'affection. L'évolution est une règle générale favorable, l'hépatite E peut rarement évoluer vers uniforme chronique chez des patients immunos supprimés.

c) Maladies d'origine parasitaire

En plus des maladies d'origine bactérienne et virale, on a d'autres maladies d'origine Hydrique dues à des parasites comme :

- **L'Ankylostome duodénale (Ankylostomiase)** : sont des parasitoses intestinales provoquées par deux nématodes (petits vers rond très voisins), qui entraînent par leur présence dans le duodéno-jéjunum de mammifères une seule et même maladie.
- **Les Dracunculose médinoises (Dracunculose)** : est une maladie parasitaire causée par un nématode. Le vers parasite responsable de cette maladie est appelé médinoise. Le nom de dracunculose vient de latin « petit dragon ».

II.5. Mesures préventives pour disposer d'une eau de boisson de bonne qualité

- a) L'aménagement et la protection des points d'eau réalisés et zones de captage pour éviter tout risque de contamination de l'eau.

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

- b) La collecte, le transport et le stockage à domicile de l'eau dans des conditions sanitaires satisfaisantes.
- c) Le suivi de la qualité de l'eau (ce qui implique nécessairement des systèmes d'exploitation et de maintenance des ouvrages performants et des systèmes de mesure de la qualité de l'eau fiables).
- d) Sensibiliser et éduquer à l'hygiène individuelle afin de modifier les comportements
 - Se laver les mains ;
 - Rendre l'eau potable (filtration, ébullition, javellisation...etc.) et protéger son stockage ;
 - Laver les ustensiles de cuisine à l'eau propre ;
 - Veiller à une bonne hygiène alimentaire.
- e) Mobiliser et responsabiliser les communautés à l'hygiène collective par des messages adaptés
 - Construire (au bon emplacement), utiliser et entretenir les latrines et fosses septiques ;
 - Protéger les points d'eau, les adductions d'eau, les réservoirs de stockage.

III. L'indice de qualité des eaux souterraine (IQE)

L'indice de qualité des eaux (IQE) est défini comme une technique d'évaluation qui fournit l'influence composite de la qualité individuelle des paramètres de l'eau sur la qualité globale (Varol et Davraz, 2014) pour la consommation humaine. L'indice de qualité de l'eau est un paramètre important pour démarcation de la qualité des eaux souterraines et aptitude à la consommation.

Nous avons calculé l'indice de qualité de l'eau (IQE) qui résume, selon une approche fiable, les données relatives à la qualité de l'eau à des fins de communication humaine (Saeedi et al. 2010; Nourbakhsh et al. 2015).

Pour le calcul de l'IQE, trois étapes sont suivies. En premier étape, chacun des 10 paramètres choisis (TDS, pH, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) a reçu un poids (w_i) en fonction de son importance relative dans la qualité globale de l'eau utilisée à des fins de consommation (tableau IV. 9). Le poids maximum de 5 a été attribué aux paramètres comme le TDS, NO_3^- et Cl^- en raison de leur importance majeure dans la qualité de l'eau évaluation et leur impact majeur sur la santé (Srinivasamoorthy et al. 2008 ; El Baba et al. 2020). Cependant, la valeur 1 a été attribuée au paramètre HCO_3^- en raison de ses moindres impacts. Les autres paramètres ont un poids

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

compris entre 1 et 5 selon sur leur importance dans la détermination de la qualité de l'eau. Dans la deuxième étape, le poids relatif (W_i) est calculé à partir de l'équation suivante:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{IV.17}$$

Avec :

W_i : le poids relative ;

w_i : le poids de chaque paramètre ;

i : le nombre des paramètres.

Tableau IV. 9: le poids (w_i) et poids relative (W_i) de chaque paramètre chimique

Paramètre	Poids (w_i)	Poids relative (W_i)
TDS	5	0.14
pH	3	0.09
Na ⁺	4	0.11
K ⁺	2	0.06
Ca ²⁺	3	0.09
Mg ²⁺	3	0.09
Cl ⁻	5	0.14
SO ₄ ²⁻	4	0.11
HCO ₃ ⁻	1	0.03
NO ₃ ⁻	5	0.14

Dans la troisième étape, une échelle d'évaluation de la qualité (q_i) pour chaque paramètre est attribuée en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par son standard respectif selon les directives énoncées dans le règlement de l'OMS (2011) et les résultats multipliés par 100 :

$$q_i = (C_i / S_i) \times 100 \quad \text{IV.18}$$

Avec :

q_i : la qualité ;

C_i : la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau en mg / l.

S_i : la concentration admissible d'eau pour chaque paramètre chimique en mg/l selon les directives de l'OMS (2011).

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

Pour calculer l'IQE, le SI est d'abord déterminé pour chaque paramètre chimique, qui est ensuite utilisé pour déterminer l'IQE selon l'équation suivante :

$$SI_i : W_i \times q_i \quad \text{IV.19}$$

$$IQE = \sum SI_i \quad \text{IV.20}$$

Les valeurs de l'IQE calculées sont classées en cinq catégories de qualité :

- >50 excellente ;
- 50 – 100 bonne ;
- 100 – 200 mauvaise ;
- 200 – 300 très mauvaise;
- <300 impropre à la consommation.

Les types d'eau, déterminés sur la base des valeurs d'IQE et les analyses bactériologiques, sont donnés dans le tableau IV. 10.

Tableau IV. 10: comparaison entre les résultats physico-chimique et bactériologique de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada

Forage	IQE	Qualité des eaux (physico-chimique)	Qualité des eaux (bactériologique)
F1	47.01	Excellente	Mauvaise
F2	45.97	Excellente	Mauvaise
F3	41.08	Excellente	Mauvaise
F4	45.50	Excellente	Bonne
F5	43.25	Excellente	Bonne
F6	41.31	Excellente	Bonne
F7	47.86	Excellente	Bonne
F8	46.29	Excellente	Mauvaise
F9	44.07	Excellente	Bonne
F10	36.87	Excellente	Mauvaise
F11	57.34	Bonne	Bonne
F12	41.29	Excellente	Mauvaise
F13	57.34	Bonne	Bonne
F14	76.14	Bonne	Bonne
F15	48.97	Excellente	Bonne
F16	43.50	Excellente	Mauvaise
F17	34.33	Excellente	Bonne
F18	56.15	Bonne	Bonne
F19	51.65	Bonne	Bonne
F20	39.40	Excellente	Bonne
F21	43.86	Excellente	Bonne
F22	43.25	Excellente	Bonne

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

F23	71.69	Bonne	Bonne
F24	40.48	Excellente	Bonne
F25	39.10	Excellente	Bonne
F26	68.49	Bonne	Bonne
F27	38.40	Excellente	Bonne
F28	95.88	Bonne	Bonne
F29	64.50	Bonne	Bonne
F30	40.56	Excellente	Bonne
F31	36.87	Excellente	Bonne
F32	46.67	Excellente	Bonne
F33	55.52	Bonne	Bonne
F34	80.51	Bonne	Bonne
F35	80.65	Bonne	Bonne
F36	45.01	Excellente	Bonne

Le tableau IV. 10 présente le calcul de l'IQE pour chaque échantillon d'eau souterraine. Les valeurs obtenues de l'IQE varient entre 34.33 et 95.88, ce qui suggère que tous les échantillons d'eaux souterraines de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada sont d'excellente et bonne qualité.

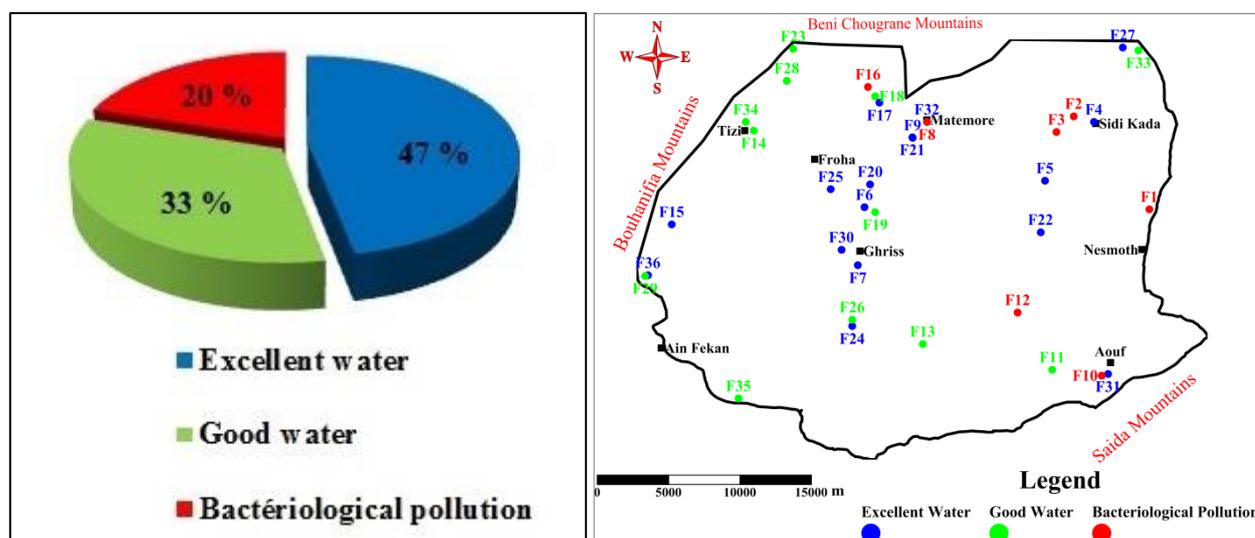


Figure IV. 25. Diagramme circulaire de la qualité d'échantillons d'eau souterraine

Les résultats de la figure IV. 25 mettent en évidence que 47 % des échantillons d'eau souterraine appartiennent à la classe excellente, tandis que 33 % sont classés comme de bonne qualité. Cependant, bien qu'ils soient chimiquement considérés de bonne qualité, 20 % de tous les échantillons présentaient une contamination bactérienne (Figure IV. 25). Tous ces échantillons ont un indice de qualité bon à excellent, ce qui souligne l'importance de la prospection de la qualité bactériologique des eaux destinées à la consommation humaine (Bouderbala, 2017).

Chapitre IV : Etude de la qualité hydro-chimique et bactériologique des eaux

IV. Conclusion

Le présent chapitre, relatif à l'étude de la qualité des eaux a permis de mettre en évidence l'importance des caractéristiques physico-chimiques et bactériologique des eaux à des fins de consommation humaine et d'irrigation, et sur la compréhension des processus contrôlant la chimie des eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada. Les paramètres physico-chimiques de tous les échantillons sont pour la plupart inférieurs aux directives internationales et nationales pour l'eau potable. La cartographie de ces paramètres révèle d'une part une augmentation prononcée de la minéralisation dans les parties nord-ouest et sud-ouest de la zone d'étude, et d'autre part une répartition identique des ions Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et CE. Les eaux souterraines de la zone appartiennent aux types $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$, Cl-Mg et $\text{HCO}_3\text{-Na}$. La composition chimique et la minéralisation des eaux souterraines sont principalement contrôlées par les dissolutions de minéraux carbonatés et d'évaporites. Les résultats ont également révélé que les processus secondaires avaient un impact sur l'hydrochimie des eaux souterraines, tels que l'échange de cations, l'altération des silicates et la contamination anthropique. Les statistiques multivariées a permis dans notre cas d'identifier des processus supplémentaires impactant l'hydrochimie des eaux souterraines. En effet, l'ACP a révélé non seulement le rôle de la dissolution des minéraux carbonatés et de l'évaporite dans la minéralisation mais souligne également les deux types prédominants de recharge, à savoir une superficielle et une profonde. De plus, les facteurs d'ACP mettent en évidence le mécanisme de nitrification et le rôle des activités agricoles dans la qualité des eaux souterraines. Selon les valeurs d'IQE, les eaux souterraines de l'aquifère karstique de la montagne Sidi Kada ont été classées de bonne à excellente qualité. Cependant, 20 % des échantillons appartenant à ces classes présentent une contamination bactériologique résultant d'une pollution discrète ou de fosses septiques défectueuses pour l'assainissement individuel en milieu rural. Par conséquent, l'eau destinée à la consommation humaine doit être analysée bactériologiquement et les propriétés chimiques ne sont pas suffisantes pour estimer la qualité globale de l'eau. Les gestionnaires de la ressource en eau de la zone étudiée doivent prendre des décisions visant à : améliorer la protection des forages destinés notamment à l'alimentation en eau potable, installer des réseaux d'assainissement performants en milieu rural, et surveiller périodiquement la nappe étudiée pour en préserver la qualité.

Chapitre V :

Vulnérabilité à la

pollution des eaux

V.1. Introduction

Face au risque grandissant et imprévisible de contamination des eaux souterraines et compte tenu de l'incapacité des techniques de décontamination des nappes polluées à restaurer complètement la potabilité des eaux, la stratégie la plus avantageuse demeure la protection des ressources en eau dans leur gisement. Cette stratégie est basée essentiellement sur l'élaboration de document cartographique (carte de vulnérabilité ou carte de sensibilité) que le gestionnaire de la ressource en eau pourra utiliser lors de l'implantation d'installations, qui a des titres variés peuvent être des sources de pollution. Le but de l'établissement de cette cartographie est de montrer quelles sont, suivant les paramètres qui contrôlent la vulnérabilité, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans le sous-sol, de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites des captages et de prévoir les mesures compensatoires à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou à créer pour limiter les risques de pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle.

Les aquifères karstiques sont connus comme étant très vulnérables à la pollution, principalement en raison de la vitesse d'écoulement élevée au long des voies d'écoulement souterraines des zones particulières (Bakalowicz, 2000). Par conséquent, les contaminants peuvent facilement atteindre les nappes et être rapidement transporté dans des conduits karstiques sur de grandes distances. Pour ces raisons, il est très important de déterminer le niveau de vulnérabilité des aquifères karstiques pour leur protection et leur réhabilitation, mais aussi pour l'aménagement du territoire.

Depuis 1985 jusqu'à ce jour, les chercheurs dans le monde entier ont développés de nombreuses méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines. Au début des années 2000, la technologie SIG a commencé à être utilisée dans de telles analyses. Certaines des méthodes ont été développées principalement pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Elles ont été utilisés pour la protection des aquifères karstiques, on citera à titre d'exemple **DRASTIC**, **AVI**, **GOD**, **EPIK**, **REKS**, **VULK**, **LEA**, **PI**, **COP**, **SINTACS** et **CC-PESTO**... (Biondic et al. 2021). Dans cette étude, nous avons utilisé deux méthodes (**DRASTIC** et **GOD**), tout en essayant de comparer entre leurs résultats.

V.2. La pollution

Le terme pollution peut être défini comme suit : « c'est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaines, au travers des effets directs ou indirects des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes (Nouar, 2007) Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autre produits biologiques (Kachi, 2007 ; Aké et al. 2009). Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives des milieux ou encore en enlaidissant la nature. »

V.2.1. Principales origines des pollutions

- **origine domestique** : Dans le cas d'un assainissement collectif ou individuel défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, microorganismes, etc.) Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionnée, les stations d'épuration urbaines surchargées, etc... (Dibi et al. 2013). Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviats riches en polluants (Almasri. 2008).

- **origine industrielle** : Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité: substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds, etc. Les pollutions sont exceptionnelles mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations, etc.) Un cas particulier est celui des exploitations minières (Dekkaki et al. 2016).

- **origine agricole** : La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux (Khemmoudj et al. 2014). L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines. Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, par rejet dans des puits perdus, des gouffres et des bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert (Sinan et Razack,

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

2009). Les élevages intensifs de bovins et volailles produisent une grande quantité de déjections azotées qui doit être stockée en réservoirs étanches avant d'être utilisée comme engrais (ou comme aliments).

• **origine urbaine et routière** : Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident, etc.) En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou mauvais fonctionnement des stations d'épuration, en particulier absence de traitement), par les fuites de cuves de carburants (essence, fioul), par les cimetières (Zhang et al. 1996). L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux, etc.) Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe (Figure V.1).

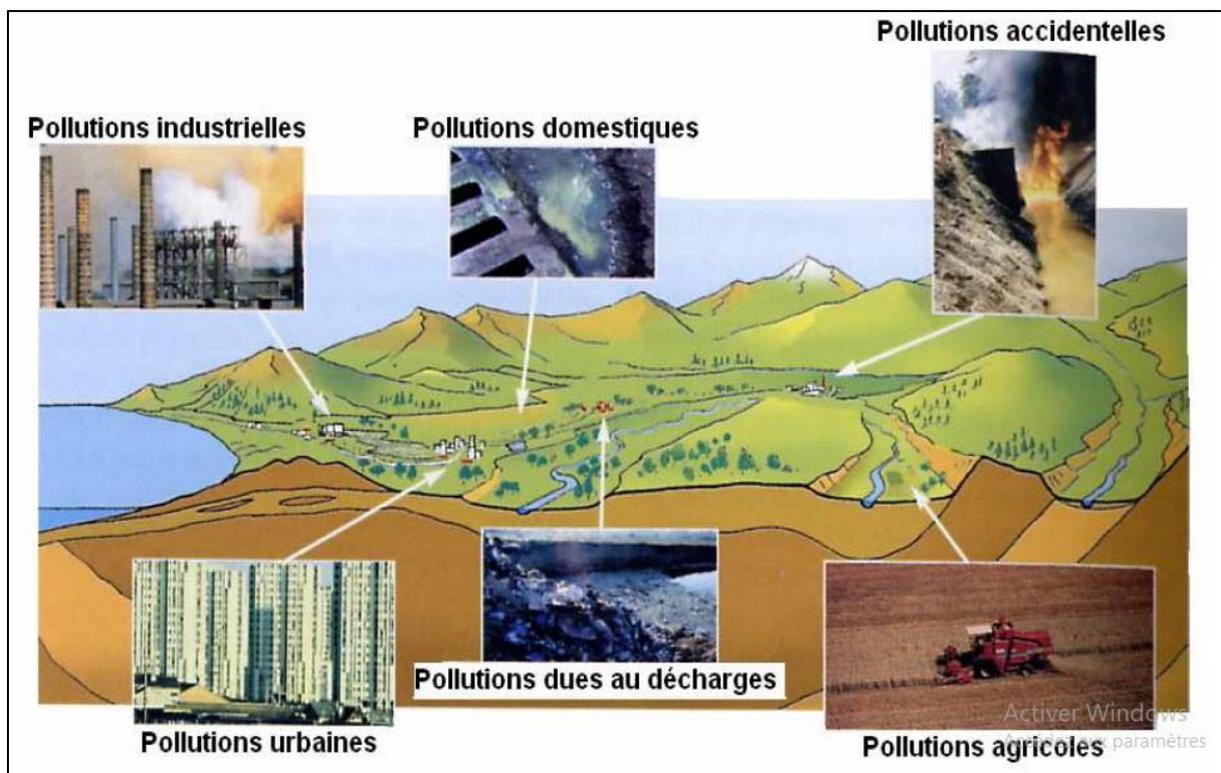


Figure V.1 : Principales causes de pollution (Seghir, 2008)

V.3. La vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

V.3.1. Définition

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension (Murat et al. 2003). La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la qualité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins importants relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dite (Guillaume et Marie, 2015).

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al. 2001) :

- *la vulnérabilité intrinsèque* est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.
- *la vulnérabilité spécifique* est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

A mentionner qu'à l'échelle de l'investigation, les deux types de vulnérabilité ne peuvent être placés sur le même niveau. La vulnérabilité intrinsèque est considérée comme invariante dans le temps, alors que la vulnérabilité spécifique est instantanée, liée surtout aux sources de pollution (Margat, 1968). D'autre part, la vulnérabilité spécifique est prise en compte pour répondre généralement à un problème bien particulier (spécifique).

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution dépend du type de nappe (libre ou captive), de l'épaisseur de la zone non saturée et de sa composition lithologique, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère (Crivert, 2003). Les nappes libre sont les plus vulnérables: les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à 'rincer' les particules de la zone non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées (Stigter et al. 2006). Pour atteindre une nappe libre en milieu

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

poreux, les polluants transportés par les eaux d'infiltration doivent franchir de nombreux obstacles.

- **la zone de l'interface sol**, où l'activité chimique et microbiologique est intense (oxydation, réduction...). De nombreux corps sont modifiés chimiquement, les polluants organiques peuvent être métabolisés et minéralisés. Néanmoins, cette biodégradation peut aboutir à des métabolites plus au moins toxiques (Margat, 1968). Les complexes argilo humiques peuvent fixer de nombreux corps minéraux et organiques par adsorption ;

- **la zone non saturée** : Comme le sol, elle joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est d'autant plus efficace que la granulométrie est plus faible ;

- **la zone saturée** : La filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe; le polluant est dilué dans la masse d'eau.

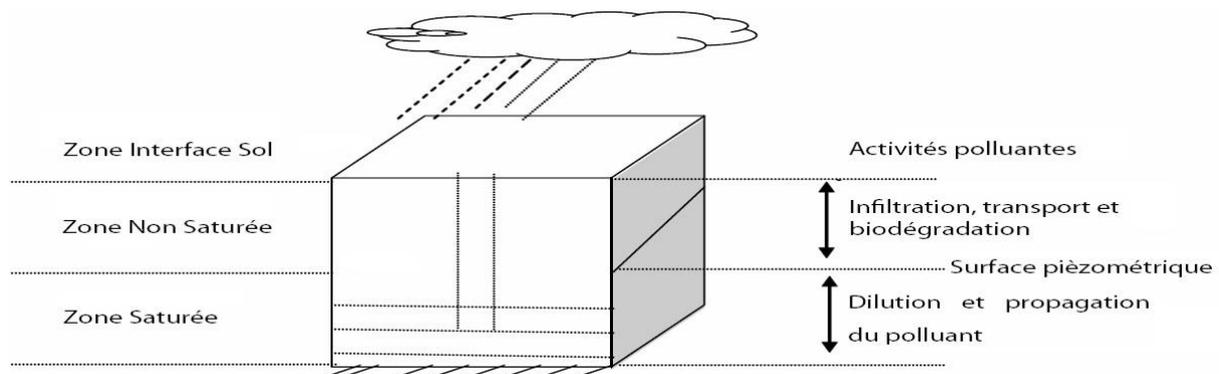


Figure V.2 : Schéma de la contamination des eaux souterraines (Amharref et al. 2007)

Les cartes de vulnérabilité montrent quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface et les réservoirs contenant la première nappe d'eau souterraine, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains (Gnakri, 2013). La vulnérabilité à la pollution doit être considérée sous trois aspects :

A- L'introduction de polluant dans les nappes ; c'est-à-dire le transit, selon un trajet surtout vertical, de corps polluants, entraînés par les eaux d'infiltration ou des fluides polluants depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine, à travers le sol et des roches non saturées d'eau.

B- La propagation de la pollution ; l'écoulement de l'eau ainsi polluée, entraînée par le mouvement naturel de la nappe atteinte ; elle peut entrer plus ou moins rapidement, selon les caractéristiques de l'aquifère et la pente (Drias et Toubal, 2015).

C- La persistance plus ou moins prolongée ; après la suppression du foyer de pollution : cette durée de séjour est fonction du renouvellement naturel de l'eau dans l'aquifère et également de la nature du polluant.

V.3.2. Les méthodes de cartographie de la vulnérabilité des aquifères

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (Gogu et Dassargues, 1998). Elles peuvent être classées en quatre grandes catégories :

- **Les méthodes de cartographies à index**

Basés sur la combinaison des cartes de divers paramètres d'une région (critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre.

- **Les modèles de simulation**

Ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants (Schnebelen, 2001).

- **Les méthodes statistiques**

Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Ces méthodes fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination sur la zone d'étude (Vrba et Zaporozec, 1994).

- **Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères**

Elles prennent en compte l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues, 2000).

Différentes méthodes ont été développées, testées notamment à l'échelle européenne. Les principales et les plus utilisées dans le domaine karstique et fissuré sont présentées ci-dessous.

V.4. Méthode « DRASTIC »

La méthode DRASTIC, développée aux Etats-Unis par l'Agence américaine de la Protection de l'Environnement (EPA) en 1985 par Aller et al. Elle est très utilisée dans le monde entier, ceci est confirmé par la quantité importante des travaux et des articles publiés dans ce sens (El kayssi et al. 2020).

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

La méthode DRASTIC permet d'évaluer la vulnérabilité verticale intrinsèque à la pollution, et de déterminer aussi le degré de protection des aquifères, en se basant sur sept paramètres qui sont :

- D: Depth to groundwater table (profondeur d'aquifère).
- R: Net Recharge (Recharge efficace).
- A: Aquifer media (Milieu aquifère).
- S: Soil media (Type de sol).
- T: Topography (Topographie ou la pente).
- I: Impact of Vadose Zone (impact de la zone vadose).
- C: Hydraulic conductivity (Conductivité hydraulique ou perméabilité).

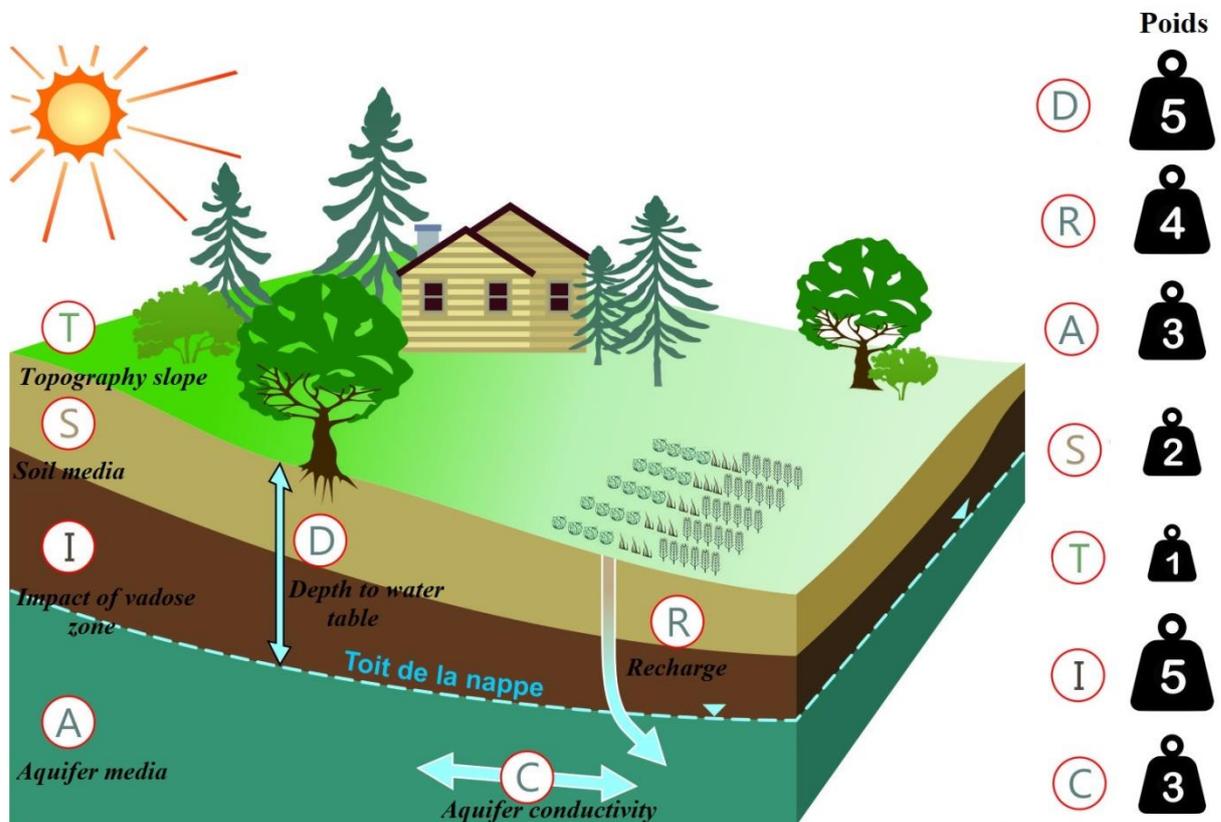


Figure V.3: Définition des paramètres DRASTIC et leurs poids respectif (PACES-SLSJ)

L'importance relative de chaque facteur est évaluée par un poids fixe variant d'une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs qui le sont moins (Figure V.3). Chaque paramètre est trié à des cotes variant entre 1 et 10 (Chaffai et al. 2006). La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la pollution (Tableau V.1).

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

Tableau V.1 : Les Côtés attribués aux différentes classes de la méthode DRASTIC

Profondeur d'aquifère (m) (D)		Recharge (cm/an) (R)		
Classe	Côte	Classe	Côte	
0 à 1.5	10	0 à 5	1	
1.5 à 4.5	9	5 à 10	3	
4.5 à 9	7	10 à 18	6	
9 à 15	5	18 à 25	8	
15 à 23	3	>25	9	
23 à 31	2			
> 31	1			
Milieu aquifère (A)			Type de sol (S)	
Classe	Côte	Côte – type	Classe	Côte
Shale massif	1-3	2	Sol mince ou roc	10
Roches ignées/métamorphiques	2-5	3	Gravier	10
Roches ignées/métamorphiques altérées	3-5	4	Sable	9
Till	4-6	5	Tourbe	8
Lits de grés, calcaire et shale	5-9	6	Argile fissurée	7
Grés massif	4-9	6	Loam sableux	6
Calcaire massif	4-9	6	Loam	5
Sable et gravier	4-9	8	Loam silteux	4
Basalte	2-10	9	Loam argileux	3
Calcaire karstique	9-10	10	Terre noire	2
			Argile	1
Pente du terrain (%) (T)		Impact de la zone vadose (I)		
Classe	Côte	Classe	Côte	Côte -type
0-2	10	Couche imperméable	1	1
2-6	9	Silt/argile	2-6	3
6-12	5	Shale	2-5	3
12-18	3	Calcaire	2-7	6
>18	1	Grés	4-8	6
		Lits de calcaire, gris et shale	4-8	6
		Sable et gravier avec silt et argile	4-8	6
		Roches métamorphiques/ignées	2-8	4
		Sable et gravier	6-9	8
		Basalte	2-10	9
		Calcaire karstique	8-10	10
Conductivité hydraulique (m/j) (C)				
Classe		Côte		
0.04-4		1		
4-12		2		
12-29		4		
29-41		6		
41-82		8		
>82		10		

L'indice de vulnérabilité DRASTIC (ID) décrit le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. Cet indice est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$ID = Dp \cdot Dc + Rp \cdot Rc + Ap \cdot Ac + Sp \cdot Sc + Tp \cdot Tc + Ip \cdot Ic + Cp \cdot Cc$$

Avec **p** étant le poids du paramètre et **c** la cote associée.

L'indice ainsi calculé représente une évaluation du niveau de risque de contamination des aquifères. Ce risque augmente avec les valeurs de l'indice (Bentekhici et al. 2018).

Tableau V.2: les classes de l'indice de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC	Degré de vulnérabilité
< 80	Très faible
80 - 120	Faible
121 - 160	Moyen
161 - 200	Elevé
> 200	Très élevé

La carte de synthèse de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère est obtenue en faisant la somme pondérée des valeurs indicielles des sept paramètres DRASTIC (Jourda, 2005).

V.4.1. Application de la méthode DRASTIC et réalisation des cartes thématiques

a) Profondeur d'aquifère (D)

La profondeur du niveau d'eau dans la nappe est un paramètre important, il détermine l'épaisseur des matériaux de la zone d'aération à travers laquelle un contaminant percole avant d'atteindre le niveau piézométrique (Latifi et Chaab, 2017). Ce paramètre permet de représenter de façon indirecte le temps de propagation verticale d'un polluant dans la zone non saturée vers l'aquifère (Rouabhia, 2006). Les indices ainsi calculés permettent de dresser la carte correspondante (Figure V.4). Elle fait ressortir de forts et faibles indices aux Sud de la région d'étude (entre 4.5 m et 31). La région de Guerdjoum est caractérisée par des indices dont les valeurs sont supérieures à 31 m.

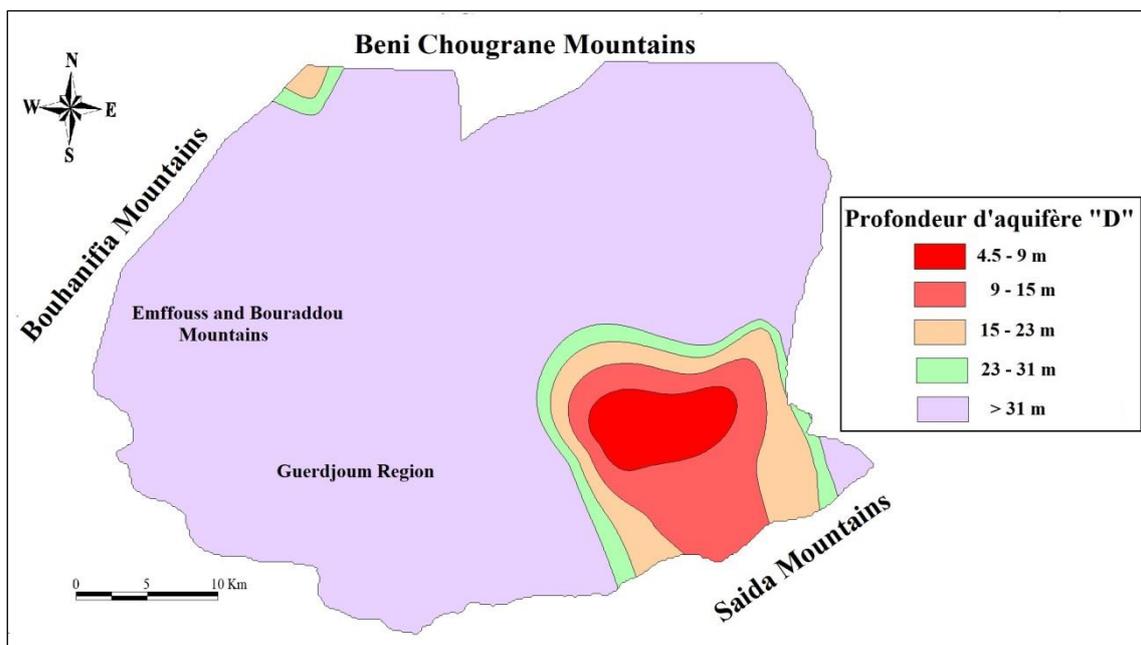


Figure V.4 : Carte de paramètre profondeur d'aquifère « D ».

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

b) Recharge efficace (R)

La recharge correspond à la quantité d'eau franchissant la surface du sol pour renouveler les stocks d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain dans les formations aquifères. La recharge d'aquifère provient principalement de l'infiltration directe des eaux de ruissellements et des eaux de précipitation à travers les sédiments grossiers des bordures (Foster, 2002). Pour l'estimation de ce paramètre en se basant sur les coefficients d'infiltration pour chaque formation constituant l'aquifère, on a établi la recharge nette (Tableau V.3). Donc l'indice de recharge « IR » selon la classification de DRASTIC est représenté dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : Les indices de la recharge nette

Formations	Coefficient d'infiltration	Recharge (mm/an)	Côte (R _C)	Poids (R _P)	R _C * R _P
Plio-quadernaires (Sable et gravier)	20	69.3	3	4	12
Pliocène (Grés et calcaire)	12	41.8	1		4
Jurassique (Calcaire karstique)	15	54.6	3		12

La carte de recharge nette (R) montre deux domaines d'indice de vulnérabilité (Figure V.5) : L'un couvrant la partie centrale de la région (région de Guerdjoum), les monts de Sidi Kada au Sud et les monts d'Emffouss et Bouraddou à l'Ouest, avec un indice de vulnérabilité de l'ordre de 12. L'autre couvrant la partie Nord de la région, avec un indice de vulnérabilité de l'ordre de 4.

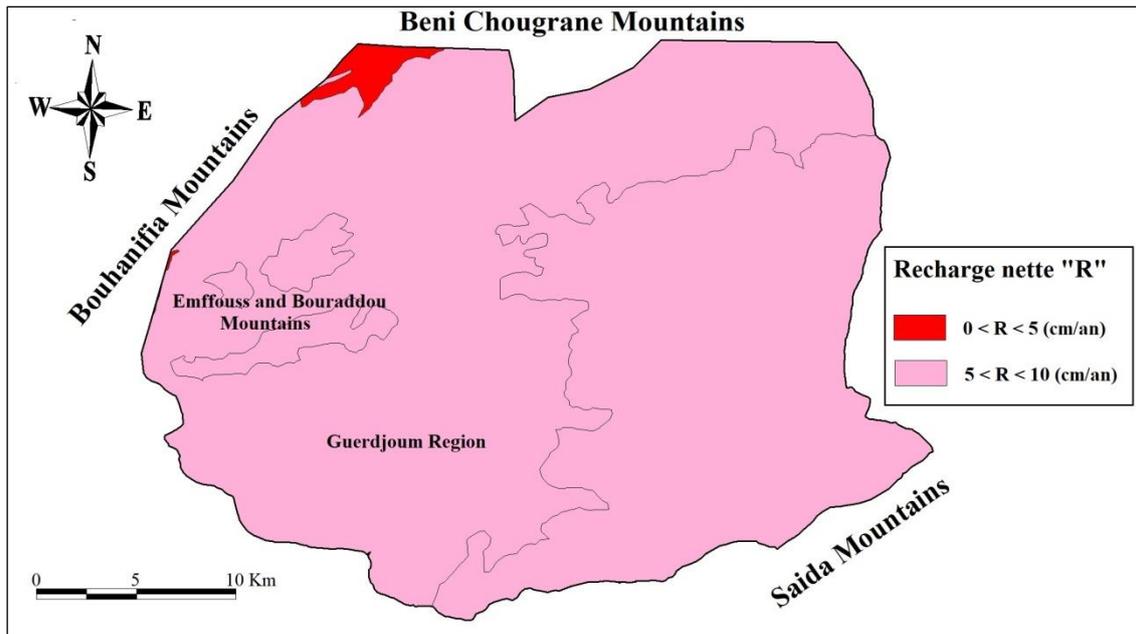


Figure V.5 : Carte du paramètre recharge nette « R ».

c) Milieu aquifère (A)

La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques (Mohamed, 2001). Ce paramètre est obtenu par corrélation litho stratigraphique. Les résultats sont représentés dans le tableau V.4 et la figure V.6.

Tableau V.4 : Les indices de paramètre milieu aquifère

Formation	Côte (A_C)	Poids (A_P)	$A_C * A_P$
Sable et gravier	8	3	24
Grés et calcaire	6		18
Calcaire karstique	10		30

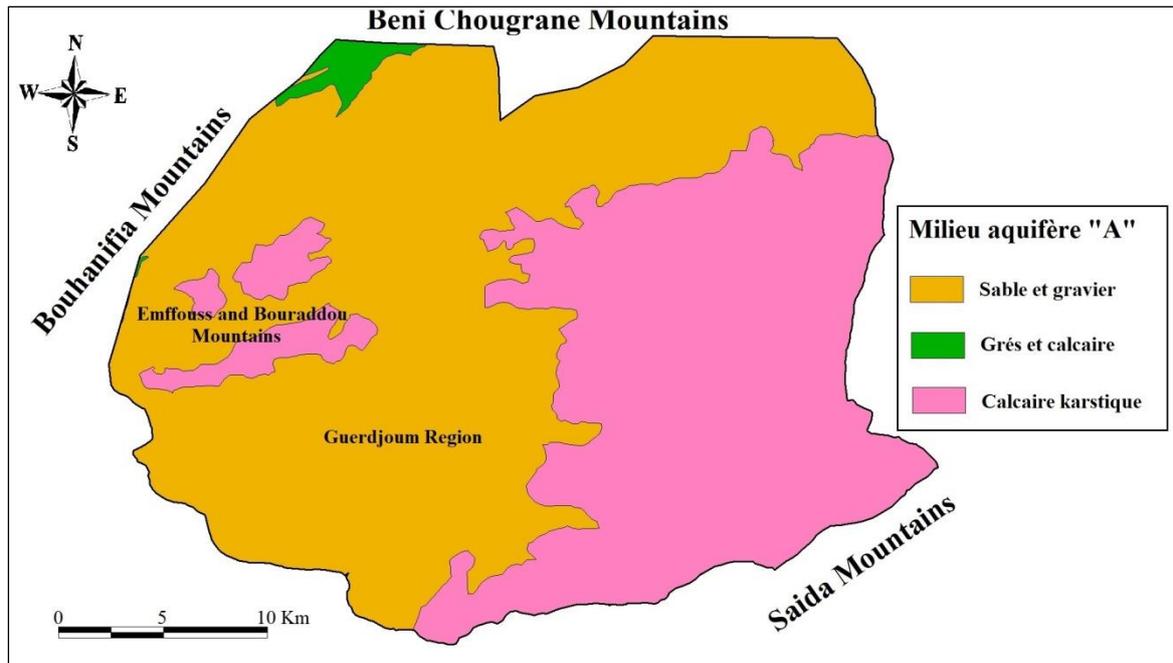


Figure V.6 : Carte du paramètre milieu aquifère « A ».

d) Type de sol (S)

Le type de sol a un impact considérable sur la contamination des aquifères par les polluants provenant de la surface (Hamza et al. 2008). Il peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers la nappe phréatique. La carte pédologique de la région montre quatre type de sol, les résultats sont représentés dans le tableau V.5 et la figure V.7.

Tableau V.5 : Les indices de paramètre type de sol

Type de sol	Côte (S_C)	Poids (S_P)	$S_C * S_P$
Gravier	10	2	20
Loam sableux	6		12
Sable	9		18
Sol mince ou roc	10		20

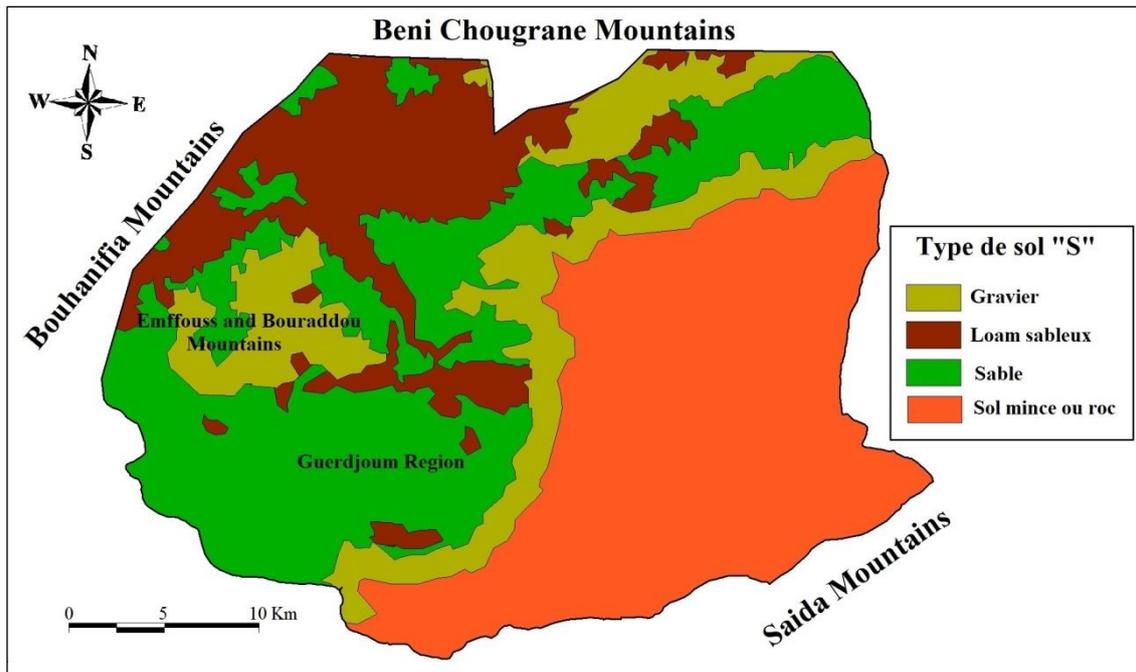


Figure V.7 : Carte du paramètre type de sol « S »

e) Topographie ou la pente (T)

Le modèle numérique de terrain (MNT) permet de réaliser une carte des pentes de la région. La pente du terrain influence directement le temps de concentration des polluants. Ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers la nappe (Attoui, 2014). En effet, plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Les indices de paramètre topographie varient entre 5 et 10 (Figure V.8).

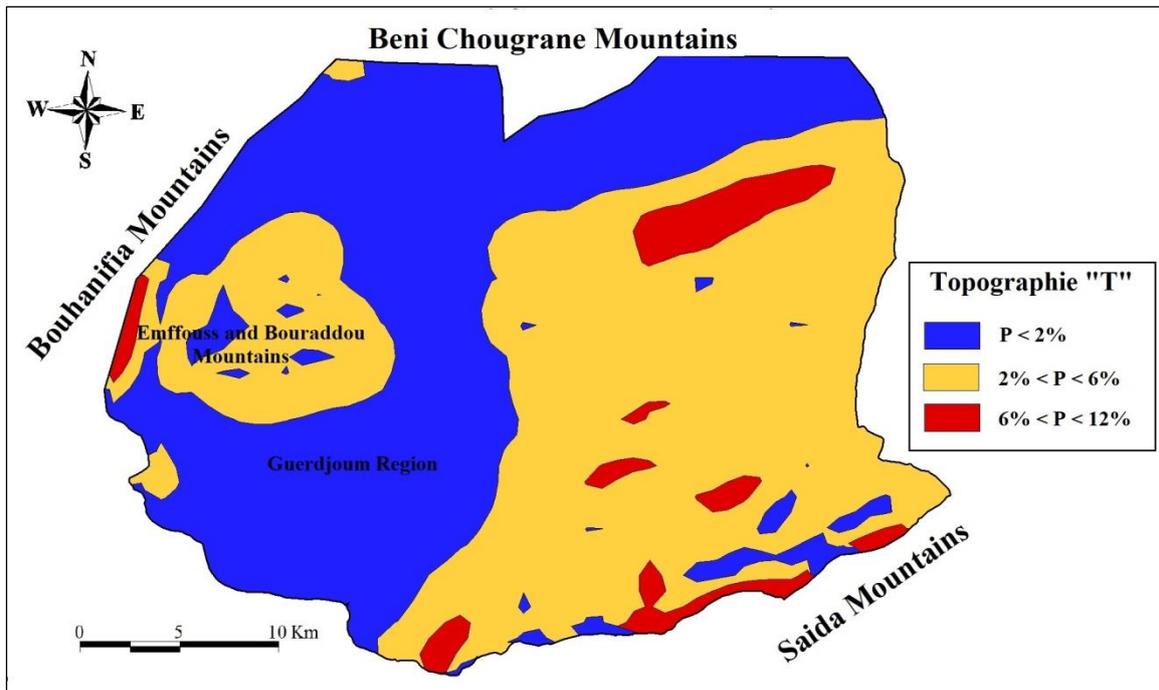


Figure V.8 : Carte du paramètre topographie « T »

f) Impact de la zone vadose (I)

L'impact de la zone non saturée (zone d'aération) est un paramètre très important par la méthode DRASTIC, Il a un poids d'une valeur de 5, car la nature et l'épaisseur de la zone comprise entre la surface du sol et la nappe, contrôlent de façon notable, la vulnérabilité à la pollution des aquifères (Hamza et al. 2004). Nous avons déterminé ce paramètre à partir de la texture des terrains qui constituent la zone non saturé (Tableau V.6 et Figure V.9).

Tableau V.6 : Les indices de paramètre impact de la zone vadose

Formation	Côte (I_C)	Poids (I_P)	$I_C * I_P$
Sable et gravier	8	5	40
Grés et calcaire	6		30
Calcaire karstique	10		50

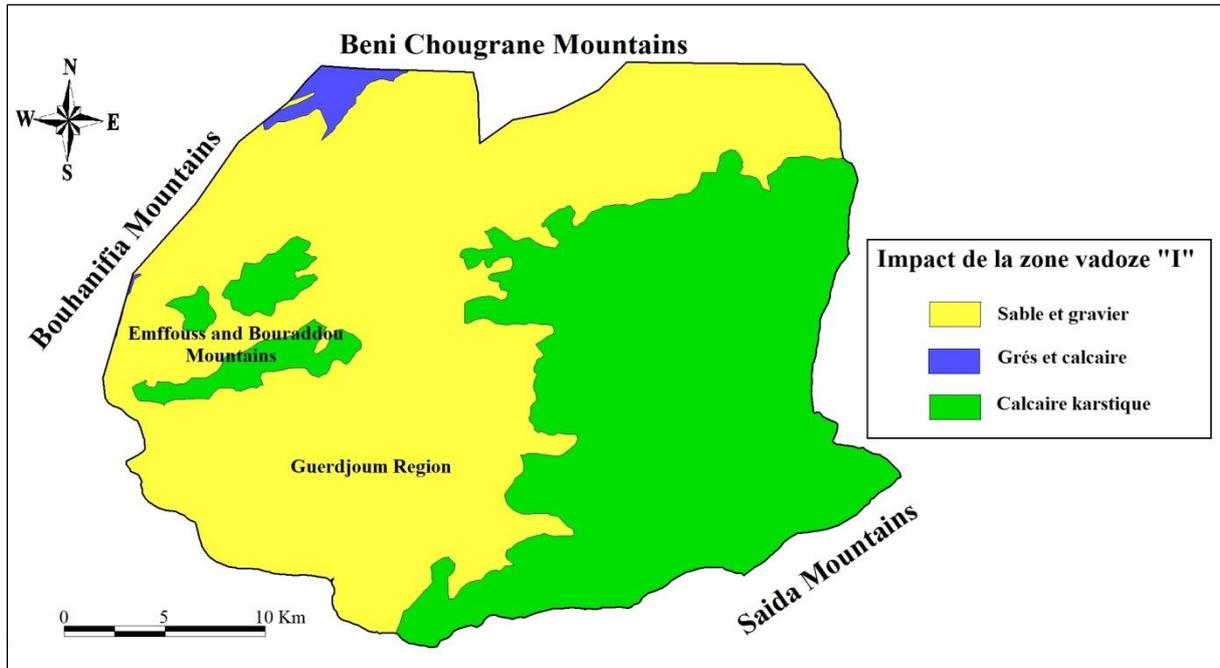


Figure V.9 : Carte du paramètre impact de la zone vadose « I »

g) Conductivité hydraulique ou perméabilité (C)

La conductivité hydraulique d'un aquifère décrit la capacité d'un milieu aquifère (sol et roche) à transmettre de l'eau à travers des espaces de pores ou des fractures et joue un rôle important dans la vitesse et la dispersion de la migration des polluants (El kayssi et al. 2020). Le coefficient de perméabilité traduit la vitesse à laquelle l'eau, transportant le polluant par dispersion, circule dans le sous-sol (Latifi, 2018). Ainsi, les vitesses d'écoulement souterrain fortes sont caractérisées par une grande vulnérabilité. La méthode DRASTIC attribue un poids moyen de 3 à la perméabilité. Les valeurs de l'indice pour ce paramètre sont reportées dans le tableau suivant et la figure V.10. La distribution spatiale de ce paramètre représente une perméabilité faible dans la majorité de la zone d'étude et une perméabilité importante à l'Ouest.

Tableau V.7 : Les indices de paramètre conductivité hydraulique

Perméabilité (m/j)	Côte (C_C)	Poids (C_P)	$C_C * C_P$
0.04-4	1	3	3
4-12	2		6
12-29	4		12
29-41	6		18
41-82	8		24
>82	10		30

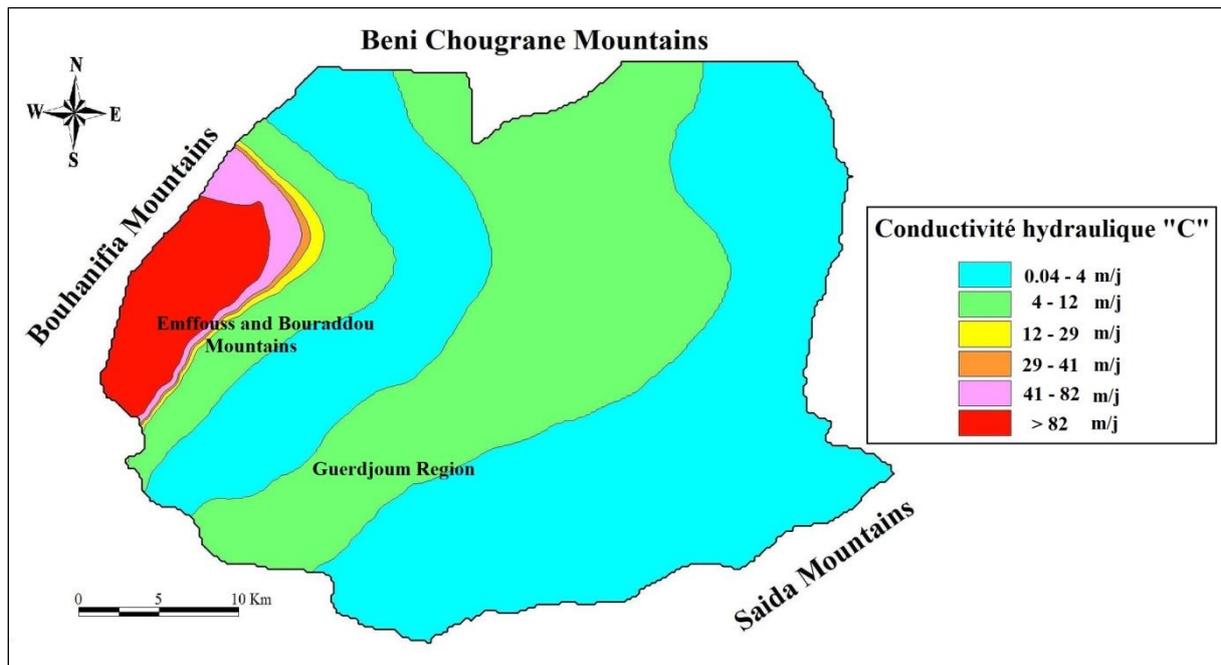


Figure V.10 : Carte du paramètre conductivité hydraulique « C »

V.4.2. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon DRASTIC

L'observation de la carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines selon la méthode de DRASTIC permet de distinguer deux classes:

-La classe « faible » occupe la partie centrale de la zone d'étude (région de Guerdjoum), donne lieu à une pollution moins sévère et représente plus de 52 % de la superficie totale. Ce faible indice de vulnérabilité résulte de la texture de sol sablo-argileuse, d'un degré de perméabilité faible et une profondeur importante de la nappe.

-La classe « modérée » traduisant une vulnérabilité moyenne à la pollution sur une superficie de l'ordre de 48 % de la zone cartographiée (Figure V.11). Elle se localise aux monts de Sidi Kada au Sud de la région et au niveau des monts d'Emffouss et Bouraddou à l'Ouest. Cet indice de forte vulnérabilité dans ces zones est dû aux la sensibilité des calcaires vis-à-vis des contaminants et des profondeurs moins importantes. Dans ces zones, des mesures préventives adéquates sont nécessaires afin de limiter les risques.

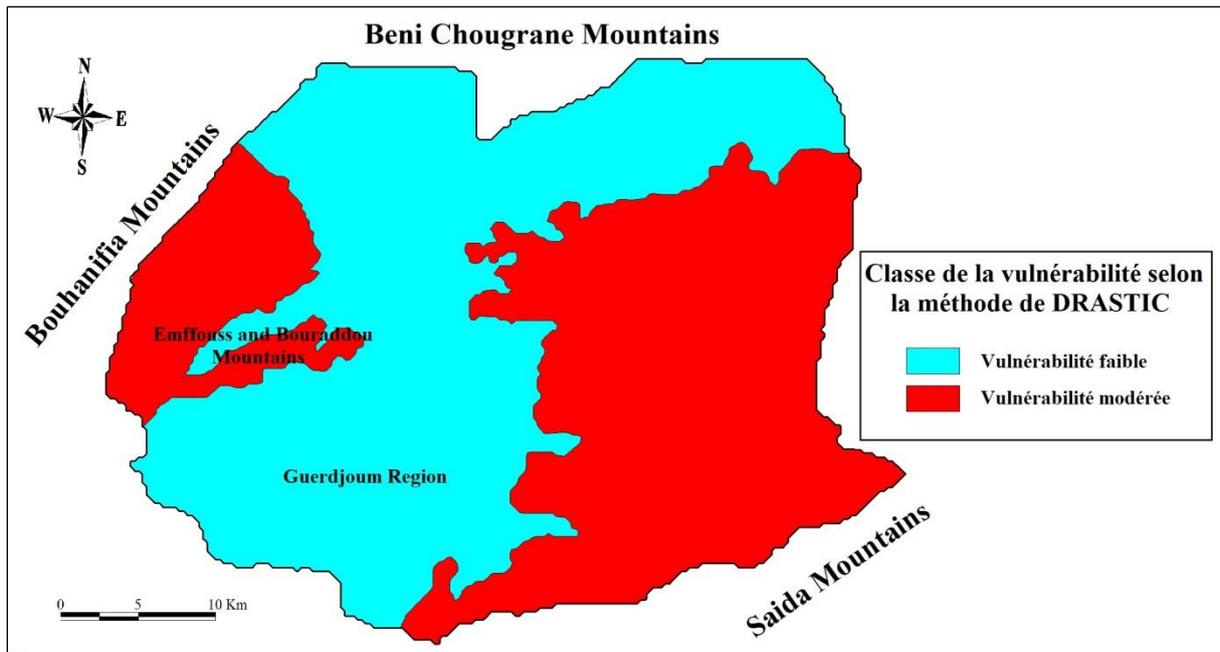


Figure V.11 : Carte de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon la méthode DRASTIC

V.5. Méthode « GOD »

La méthode GOD a été conçue en Angleterre par Foster en 1987. Elle permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère face à une percolation verticale de polluants via la zone non saturée (ZNS) et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée (Achour, 2014 ; Taazzouzte et al. 2020).

L'approche employée pour ce modèle a recours à trois paramètres :

G : Groundwater occurrence (type d'aquifère);

O : Overall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en termes de lithologie et de porosité);

D : Depth to groundwater table (profondeur de la nappe).

L'indice de vulnérabilité GOD (I_{GOD}) est obtenu par la multiplication des indices de chacun des trois paramètres selon l'équation suivante :

$$I_{GOD} = I_G * I_O * I_D$$

Avec:

I_G : type d'aquifère ;

I_O : lithologie de l'aquifère ;

I_D : profondeur de nappe.

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

Les côtes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à "1".

Elles sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau V.8 : Valeurs des côtes du paramètre type d'aquifère « G »

Type d'aquifère	Côte
Captive artésienne	0.1
Captive	0.2
Semi captive	0.3
Semi libre	0.5
Libre	1

Tableau V.9 : Valeurs du paramètre Lithologie de l'aquifère « O »

Lithologie de l'aquifère	Côte
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, loess, shale, calcaire fin	0.5
Sable éolien, siltite, tuf, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier (colluvion)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1

Tableau V.10 : Valeurs du paramètre profondeur de la nappe « D »

Profondeur (m)	Côte
>100	0.4
50-100	0.5
20-50	0.6
10-20	0.7
5-10	0.8
2-5	0.9
<2	1

D'une manière générale, les indices GOD sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême" (tableau V.11).

Tableau V. 11 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode GOD selon (Murat et al. 2003) (In Ake et al. 2009)

Intervalle	Classe GOD
0 – 0.1	Vulnérabilité très faible
0.1 – 0.3	Vulnérabilité faible
0.3 – 0.5	Vulnérabilité modérée
0.5 – 0.7	Vulnérabilité forte
0.7 – 1	Vulnérabilité extrême

V.5.1. Application de la méthode GOD et réalisation des cartes thématiques

a- Paramètre « G » type d'aquifère :

D'après les logs des forages et des études faites sur la région, on observe qu'il existe trois types des nappes (Figure V.12), l'une libre qui s'étend le Sud de la région d'étude (monts de Sidi Kada) et les horsts d'Emffouss et Bouraddou à l'Ouest avec un indice de l'ordre de 1. La deuxième nappe est semi-libre (avec une couverture de surface) qui s'étend sur toute la région de Guerdjoum avec un indice de l'ordre de 0.5. La troisième nappe est captive disparaît au Nord de la région avec un indice de l'ordre de 0.2.

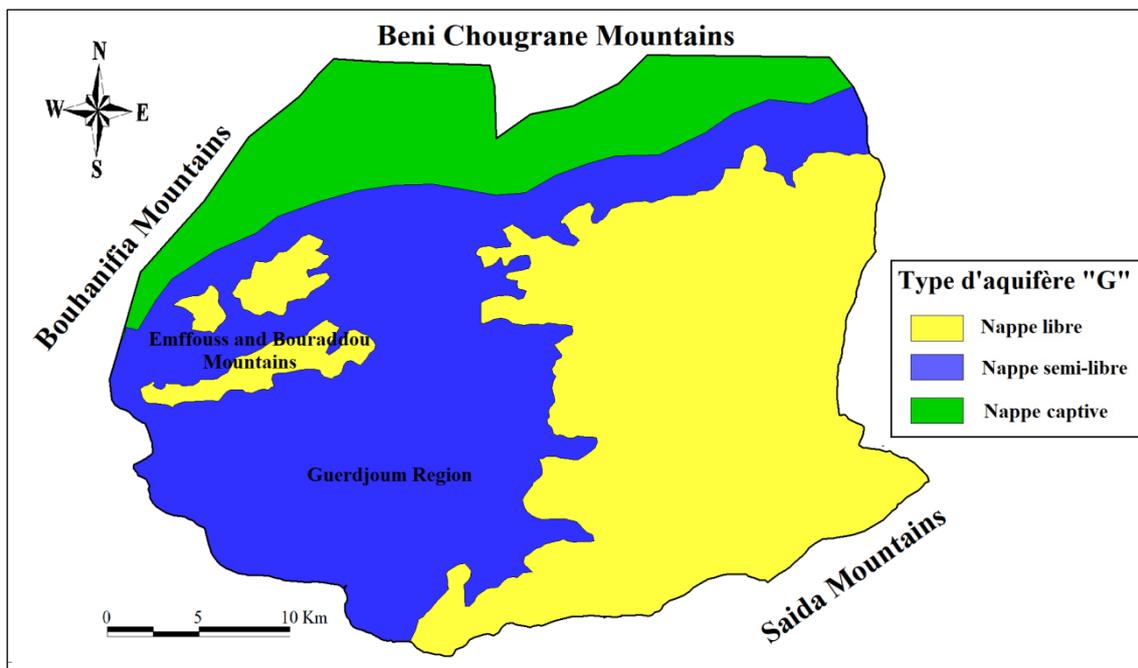
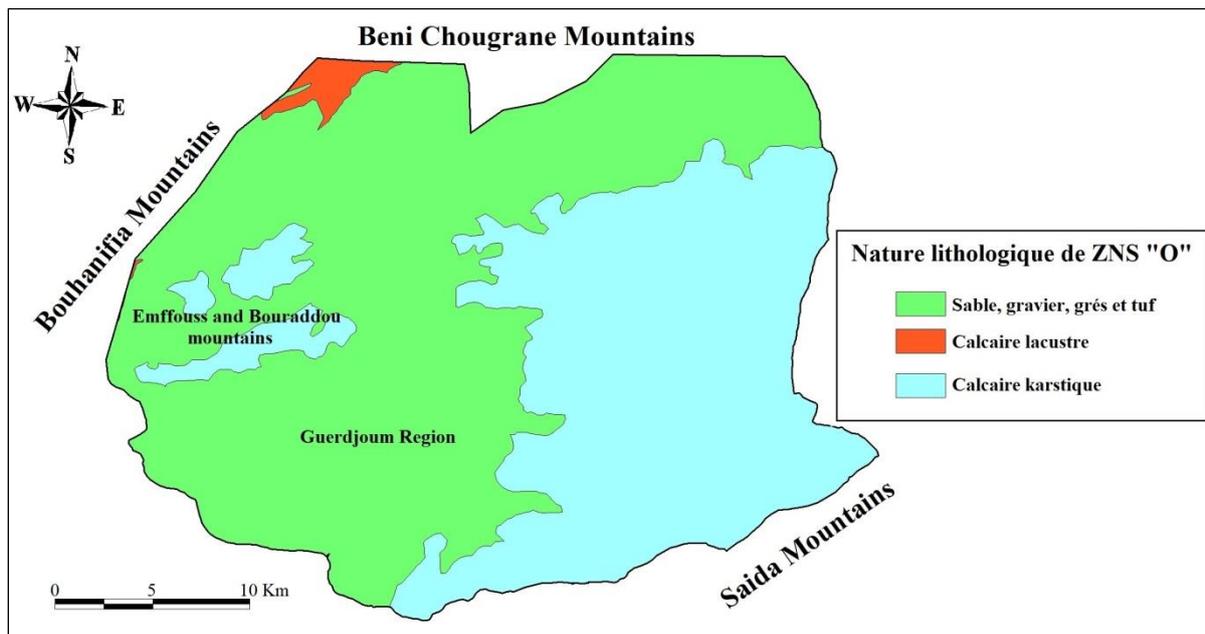


Figure V.12 : Carte du paramètre "G" type d'aquifère

b- Paramètre « O » Nature lithologique de la ZNS :

C'est un paramètre à très grande importance dans la méthode GOD. La nature lithologique de la zone non saturée joue un rôle prépondérant dans la propagation du polluant vers la nappe (Murat et al. 2003). Afin de déterminer ce paramètre, on s'est basé sur la carte géologique de la région, les logs stratigraphiques et les rapports des études visant le contexte structurale (Figure V.13). La carte de la lithologie de la zone non saturé (ZNS) montre la présence de trois classes :

- la première classe représentée par les (sable alluviaux et fluviaux, gravier, grés, tuf) occupe la partie centrale (région de Guerdjoum) avec un indice de 0.7.
- la deuxième classe est celle des calcaires lacustre couvrant la partie Nord de la région (nappe Pliocène) avec un indice de 0.9.
- la dernière classe contenue par les calcaires karstique qui occupe les affleurements au Sud de la région (les monts de Sidi Kada) et les horsts (les monts d'Emffouss et Bouraddou) à l'Ouest avec un indice de 1.



c- Paramètre « D » profondeur de la nappe :

La profondeur de l'aquifère est un facteur important dans l'étude de la vulnérabilité, car toute atténuation du polluant s'opère en relation avec la profondeur (Ewodo et al. 2016). Dans cette partie, les niveaux sont compris entre 6 – 173 m. La carte réalisée indique que les zones les

plus profondes se localisent au Nord-Est et au Centre de la plaine (la région de Guerdjoum) et les forages les moins profondes se localisent au Sud de la région d'étude (Figure V.14).

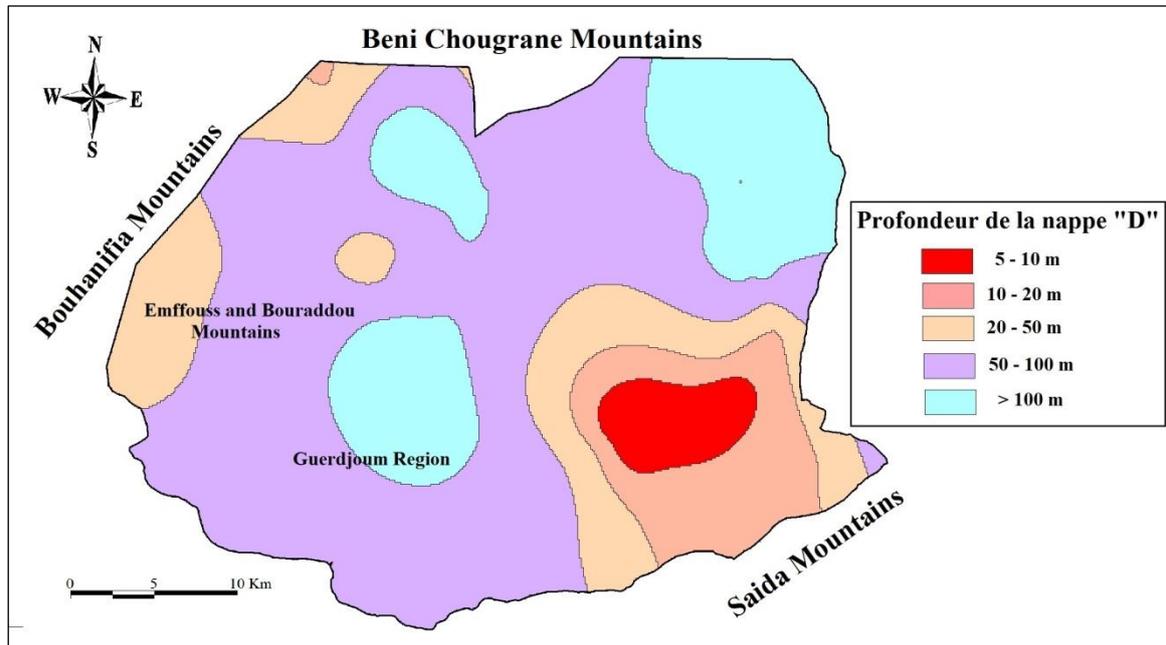


Figure V.14 : Carte du paramètre "D" profondeur de la nappe

V.5.2. Interprétation de la carte de vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon GOD

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines karstique des monts de Sidi Kada par la méthode de GOD a permis de trouver cinq classes (Figure V.15). Ces classes peuvent être regroupées en trois zones formant respectivement 64%, 15% et 21% de la surface totale.

Classe à vulnérabilité très faible et faible : Cette classe occupe la partie Nord et Centrale de la zone d'étude (région de Guerdjoum) avec l'indice global de la vulnérabilité est compris entre 0 et 0.3. Cette faiblesse est due à l'importance de la profondeur de la nappe.

Classe à vulnérabilité moyenne : c'est la classe la moins répandue de cette méthode GOD dans la région d'étude. Elle se retrouve préférentiellement dans la partie Nord de la commune de Sidi Kada, où l'indice global varie de 0.3 à 0.5. La distribution spatiale de cette classe s'expliquerait par la nature lithologique de la zone non saturée constituée de sables graveleux favorables à l'infiltration d'un polluant.

Classe à vulnérabilité forte et extrême : ces deux classes occupent les monts de Sidi Kada au Sud de la région et les horsts d'Emffouss et Bouraddou à l'Ouest avec un indice global varie entre 0.5 et 1. La vulnérabilité est plus élevée dans ces parties à cause de la sensibilité

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

des calcaires vis-à-vis des contaminants et des niveaux très proche du sol dans la partie Est, ce qui expose les eaux souterraine à des pollutions venant de la surface. Les zones à forte et à très forte vulnérabilité nécessitent un contrôle et une limitation des activités potentiellement polluantes, car ces zones sont, d'une part, susceptibles d'être polluées et, d'autre part les écoulements souterrains peuvent entraîner le polluant vers d'autres zones peu vulnérables (Pouye et al. 2022).

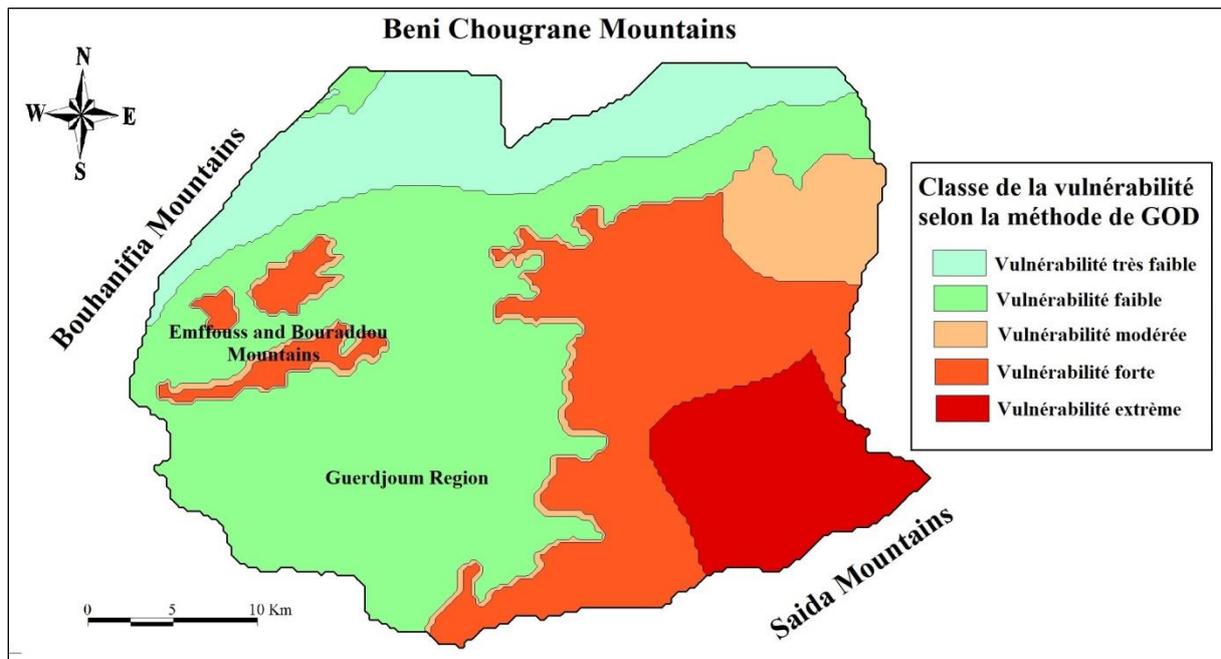


Figure V.15 : Carte de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada selon la méthode GOD

V.6. Validation des cartes de vulnérabilité de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada

Les nitrates sont les éléments qui révèlent le plus une pollution d'origine anthropique. Cet élément a été choisi pour valider les cartes de vulnérabilité obtenues. Les concentrations en nitrate contenues dans les eaux de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada pour l'année 2017 sont comprises entre 2 et 42 mg/l. Trois classes de concentration de nitrate sont observables (Figure V.16) : la classe de concentration de nitrate faible (2-15 mg/l), moyenne (15 - 40 mg/l) et forte (> 40 mg/l).

La zone de concentration faible en nitrate couvrent 45% de la superficie totale, elle occupe la partie Nord et Centrale de la région d'étude (région de Guerdjoum). La zone de concentration moyenne en nitrate couvre les monts de Sidi Kada au Sud, elle représente 54% de la surface

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

totale. La zone de concentration forte en nitrate est presque négligeable dans ce bassin, elle représente 1% de superficie totale (Figure V.16).

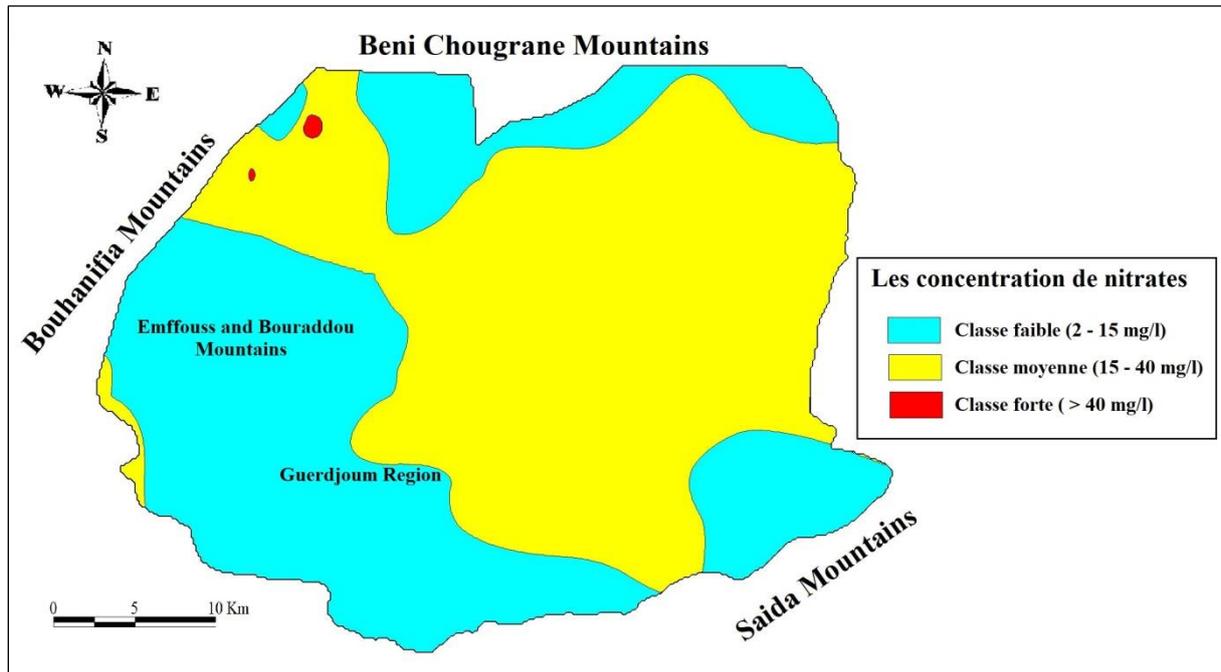


Figure V.16 : Les concentrations de nitrates de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada

La comparaison des cartes de vulnérabilité à la pollution obtenues par les méthodes DRASTIC et GOD avec la carte des concentrations en nitrate, montre ce qui suit :

- Les zones présentant des teneurs en nitrate variant entre 5 et 15 mg/l (classe faible) sont presque les mêmes zones de faible vulnérabilité selon les deux méthodes DRASTIC et GOD.
- Les régions représentant des valeurs de nitrates variant de 15 à 40 mg/l (classe moyenne) sont les mêmes que les régions à vulnérabilité moyenne seulement, selon DRASTIC et varient quelque peu selon GOD.
- La présence de la vulnérabilité extrême selon la méthode GOD n'est pas validée par les concentrations de nitrates dans la nappe. Cette classe n'est pas également observée selon la méthode DRASTIC.

Enfin, nous concluons que la méthode DRASTIC reflète mieux la réalité sur terrain et pourrait être plus adéquate pour cartographier la vulnérabilité dans cette région. Ces résultats sont confirmés par plusieurs auteurs dans les pays du bassin de la Méditerranée. On cite par exemple, Hamza et al. 2010 en Tunisie, Stigter et al. 2006 au Portugal, Salemi et al. 2012 en Italie et Boufekane et Saighi, 2013 dans la région de Jijel, au Nord-Est de l'Algérie.

V.7. Actions envisageables en cas de contamination

Pour les puits municipaux :

- ✓ Vérification des sources potentielles de contamination, car leur présence combinée à une vulnérabilité élevée d'un aquifère permet d'évaluer le risque réel de contamination.
- ✓ Plan de suivi de la qualité de l'eau souterraine pour les activités présentant des risques significatifs et situées dans des zones d'utilisation significative d'eau souterraine jugées vulnérables.
- ✓ Changement des pratiques pour réduire le risque relié aux activités ayant le plus de potentiel de contamination; changement de vocation ou d'affectation du territoire pour réduire la densité des activités anthropiques.
- ✓ Élimination des sources présentant un risque élevé; recherche de sources d'approvisionnement moins à risque.

Pour les puits privés :

Pour protéger un puits d'une contamination, notamment par la présence de bactéries, les populations qui prennent leur eau potable à partir d'ouvrages individuels de captage devraient être sensibilisées aux pratiques suivantes (PACES-SLSJ) :

- ✓ s'assurer que la tête de leur puits excède la surface du sol pour éviter les infiltrations d'eau de surface directement dans le puits;
- ✓ procéder à l'échantillonnage pour fins d'analyse, au moins une fois par année (coliformes et nitrates);
- ✓ procéder à la désinfection de l'ouvrage de captage au moins une fois par année;
- ✓ s'assurer que l'élément épurateur individuel est adéquat et fonctionne correctement;
- ✓ éviter la présence d'animaux domestiques à proximité du puits.

V.8. Conclusion

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est une méthodologie qui est devenue impérative afin d'assurer la gestion qualitative des ressources en eau et la protection des captages d'eau potable. Elle apparaît donc nécessaire et incontournable, car elle permet d'identifier facilement les zones sensibles à des pollutions potentielles. Elle permet aussi d'orienter l'aménagement du territoire.

Chapitre V : Vulnérabilité à la pollution des eaux

L'application des méthodes DRASTIC et GOD a permis d'estimer les indices de la vulnérabilité à la pollution de la nappe karstique des monts de Sidi Kada a révélé que :

- La vulnérabilité se focalise sur les classes « Faible » et « Modérée » selon la méthode DRASTIC et « Faible », « Modérée » et « Forte » selon la méthode GOD, avec la classe la plus dominante est la classe faible pour les deux méthodes, qui occupe 52% et 64% de la surface totale, respectivement. Les résultats ont révélés également que les affleurements des calcaires dolomitiques (karst) sont par définition des régions vulnérables. Les résultats de la validation des cartes de vulnérabilité aux nitrates de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada montre que, la méthode DRASTIC pourrait être adéquate pour la cartographie de la vulnérabilité dans notre région. Cette méthode permet donc de délimiter les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte lors de la protection des ressources souterraines contre la pollution.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'aquifère karstique des monts de Sidi Kada représente l'un des réservoirs d'eau souterraine les plus importants dans le nord-ouest de l'Algérie. Malgré son importance vitale pour la région, ses potentialités et son fonctionnement demeurent largement méconnus. La dégradation qualitative de cette nappe, très vulnérable, constitue une préoccupation tant pour les gestionnaires de la ressource que pour la communauté scientifique. L'objectif de cette étude était de réaliser un diagnostic complet de la qualité des eaux de cette nappe, en incluant les paramètres physico-chimiques et bactériologiques, ainsi que de comprendre les processus qui régissent l'hydrochimie de ces eaux et l'origine des principaux éléments chimiques majeurs. La méthodologie employée repose sur plusieurs approches : la cartographie des éléments physico-chimiques clés, l'utilisation de statistiques descriptives et multivariées, l'élaboration et l'interprétation de graphes binaires, ainsi que l'estimation et la comparaison de deux indices de vulnérabilité.

Au terme de ce travail, les différents résultats obtenus nous permettent de conclure ce qui suit:

La zone d'étude est située au Nord-Ouest de l'Algérie, à l'extrémité Sud du sous-bassin de l'Oued Fekan, elle appartient à la wilaya de Mascara et couvre une superficie de 856 km² et un périmètre de 126.4 km. La zone étudiée est marquée par un relief modéré à fort et des pentes moyennes à faible allant jusqu'à 0.16 %.

L'étude hydro-climatique a révélé que la région d'étude possède un climat de type Méditerranéen, caractérisé par un été chaud et sec et un hiver froid et humide avec une précipitation moyenne annuelle de 346.01 mm/an et une température moyenne de l'ordre de 17.19 °C. Le bilan hydrique établi estimé pour une période de 42 ans (1969-2011) montre que, 83 % des précipitations s'évaporent, environ 10.78 % ruissèlent et seulement 6.23% des précipitations s'infiltraient vers la nappe.

L'étude géologique de la région consiste en une synthèse des travaux déjà réalisés. La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tellien Oranais, elle est constituée par trois aquifères : la superficiel de Plio-quatenaire, l'aquifère des calcaires et grès du Pliocène et l'aquifère des calcaires dolomitique du Jurassique qui est une nappe de type karstique et qui fait l'objet de cette étude. La piézométrie de la nappe étudiée montre que le sens d'écoulement des eaux souterraines est orienté du Sud-Est au Nord-Ouest vers l'exutoire qui est la source d'Ain Fekan.

Conclusion générale

La comparaison des niveaux piézométriques de la nappe des calcaires dolomitique du Jurassique des monts de Sidi Kada entre 2012 et 2018 a révélée un rabattement de plus de 40 m observé pour une période de 06 ans, ce qui permet d'affirmer que l'aquifère étudié souffre d'une surexploitation liée principalement à l'intensification des activités agricoles et à l'augmentation des volumes d'eau destinés à l'alimentation en eau potable.

Sur le plan hydro-chimique, Les paramètres physico-chimiques de tous les échantillons sont pour la plupart inférieurs aux normes de l'OMS et aux normes Algériennes pour l'eau potable. L'hydrochimie du système aquifère est influencée par la dissolution de minéraux carbonatés et les évaporites, l'échange de cations, l'altération des silicates et la contamination anthropique. Les résultats ont permis d'identifier trois types d'eau : $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$, Cl-Mg et $\text{HCO}_3\text{-Na}$. Les facteurs de l'Analyse en Composante Principale mettent en évidence le mécanisme de nitrification et le rôle des activités agricoles dans la qualité des eaux de l'aquifère karstique. En plus, L'IQE calculé a permis de classer les échantillons d'eau souterraine en deux catégories : excellente et bonne.

La pollution bactériologique représente 20 % des échantillons des eaux, causée par les coliformes totaux et fécaux, résultant essentiellement de l'infiltration des eaux usées dans la nappe karstique.

Deux méthodes ont été adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique des monts de Sidi Kada. L'utilisation des méthodes DRASTIC et GOD fait ressortir que les affleurements des calcaires dolomitiques (karst) notamment dans la partie Sud-Est sont des régions très vulnérables. L'étude comparative entre les deux méthodes et les concentrations de nitrates a révélé que la méthode DRASTIC est la mieux adapté pour cartographier la vulnérabilité dans notre région.

Les résultats de ce travail permettront aux gestionnaires de la ressource et à tous les acteurs du secteur de l'eau dans la région de prendre les mesures adéquates pour la durabilité et la pérennité de la nappe karstique des monts de Saida. Nous recommandons ce qui suit :

- L'implantation des forages collectifs ou individuels destinés à l'alimentation en eau potable ou à l'irrigation en se basant sur la qualité des eaux et la vulnérabilité de la nappe ;
- Préserver les zones les plus vulnérables d'éventuelle contamination d'origine agricole en imposant des restrictions strictes limitant l'utilisation irrationnelle d'engrais ou de produits phytosanitaires ;

Conclusion générale

- Informer les citoyens sur le risque des systèmes d'assainissement individuel (fosse septique) dans les régions rurales ;
- Réaliser un suivi de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe karstique des monts de Sidi Kada ;
- Implantation d'un réseau de surveillance automatique de la piézométrie de la nappe étudiée.

Cette étude a permis de comprendre les principaux traits qui caractérisent le fonctionnement hydraulique et hydro-chimique d'une nappe vitale pour toute une population. Cependant, beaucoup de zones d'ombres restent à éclairer et nécessitent des études plus poussées faisant intervenir entre autre les techniques isotopiques et la modélisation hydrogéologique. Ceci constitue les perspectives de nos futurs travaux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdou Babaye M S (2012). Évaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dragol (Lipatko-Niger). Thèse de Doctorat, l'Université de Liège et de l'Université d'Abdou Moumouni de Niamey, 265 p.
- Achour M (2014). Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : cas de la vallée du M'zab (Ghardaia – Algérie). Thèse de magister en sciences de la terre, Université d'Oran.
- Aguilera H and Murillo JM (2009). The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environ Geol J.* 57, 963–974 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1381-2>
- Ahoussi KE, Koffi YB, Kouassi AM, Soro G, Soro N et Biemi J (2012). Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and chemical Sciences.* 6(4): 1854-1873, August 2012. ISSN 1991-8631
- Aké G.E., Dongo K., Boyossoro H.K., Dibi B., Sale M.B., Biemi J. (2009) : Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrate dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la côte d'Ivoire). *European Journal of scientific Recherche.* Vol.31 N°1 PP157-171.
- Al Fares W (2002). Caractérisation des milieux aquifères karstiques et fracturés par différentes méthodes géophysiques. Thèse de Doctorat, Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université Montpellier II.
- Alhassan HI, Ghanim H, Abdul-Hadi S (2019) Hydrochemistry of shallow groundwater and its assessment for drinking and irrigation purposes in Tarmiah district, Baghdad governorate, Iraq. *Ground Sustain Develop J* 10-100300. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100300>
- Almasri M. N. (2008). Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *J Environ Manage* 88:577–593
- Aller L, Bennet T, Lehr JH, Petty RJ, Hacket G (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035), 1987.
- Ameur M, Hamzaoui–Azaza F et Gueddari M (2016). Nitrate contamination of Sminja aquifer groundwater in Zaghuan, northeast Tunisia: WQI and GIS assessments. *Journal of Desalination and Water Treatment.* ISSN: 1944-3994 (Print) 1944-3986 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/tdwt20>
- Amharref M, Aassine S, Bernoussi A S, Haddouchi B Y (2007). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du Gharb (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(2), 185–199. <https://doi.org/10.7202/015812ar>
- ANRH (2016). Inventaire des points d'eau de la plaine de Ghriiss. Rapport de la Direction régionale Ouest de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Oran, Algérie.
- APHA (1995) Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, nineteenth ed. American Public Health Association, Washington, DC, p500.
- Aravinthasamy P, Karunanidhia D, Subramanib T, Anand B, Priyadarsi D, Roys D, Srinivasamoorthd K (2019) Fluoride contamination in groundwater of the Shanmuganadhi River basin (south India) and its association with other chemical constituents using geographical information system and multivariate statistics. *Geochem J* 80, 125555. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125555>
- Aravinthasamy P, Karunanidhi D, Subramani T, Priyadarsi D, Ragunath R (2020). Demarcation of groundwater quality domains using GIS for best agricultural practices in the drought-prone Shanmuganadhi Rier basin of South India. *Environ Sci Pollut Res J* 28, pages 18423–18435 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08518-5>
- Askri B, Ahmed AT, Al-Shanfri RA, Bouhlila R, Al-Farsi KBK (2016). Isotopic and geochemical identifications of groundwater Salinization processes in Salalah coastal plain- Sultanate of Oman. *Geochem J* 76. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2015.12.002>

Références bibliographiques

Assens G, Besbes, M. & De Marsily, G (1977). Etude hydrogéologique de la plaine de Mascara sur modèle mathématique (Hydrogeological Study of the Plain of Mascara on Mathematical Model). Ecole nationale supérieure des mines de paris, Centre d'informatique Géologique, Paris, France (in French).

Attoui, 2014. Etat de la vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région d'Annaba- El-Tarf et identification des sites d'enfouissement de déchets. Thèse de doctorat en science, option hydrogéologie. Université de Bedji mokhtar – Annaba- Algérie.

Baali F, Fehdi C, Rouabhia A, Mouici R, Carlier E (2015). Hydrochemistry and isotopic exploration for a karstic aquifer in a semi-arid region : case of Cheria Plain, Eastern Algeria. Carbonates Evaporites. 30 (1): 99-107. <https://doi.org/10.1007/s13146-014-0214-5>

Bakalowicz M (2000). Karst water resources protection and country management, La Houille Blanche, 86:7-8, 122-126. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2000086>

Barcelo A et Coudray J (1996). Nouvelle carte des isohyètes annuelles et des maxima pluviométriques sur le massif du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 9(4), 457–484. <https://doi.org/10.7202/705262ar>

Bechiri N (2011). Evolution du chimisme des eaux de surface et souterraines dans le bassin versant de la Seybouse (Nord – Est Algérien). . Mémoire de magister, en Qualité des eaux et impact sur l'homme et l'environnement, université de Badji Mokhtar – Annaba.

Bekkoussa B (2009). Modélisation du transfert et de la propagation des nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Ghriss. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de Technologie d'Oran, 179 p.

Bekkoussa B, Jourde H, Batiot-Guilhe C, Meddi M, Khaldi A, Azzaz H (2013). Origin of salinity and principal major elements in the Plio-Quaternary aquifer of the Ghriss plain, northwest Algeria. Hydrol Sci J 58, 1111–1127. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.800639>

Bekkoussa S, Bekkoussa B, Taupin JD, Patris N, Meddi M (2018). Groundwater hydrochemical characterization and quality assessment in the Ghriss plain basin, northwest Algeria. AQUA 67(5):458–466. <https://doi.org/10.2166/aqua.2018.013>

Bekkoussa S (2020). Approche Hydrogéologique et Hydrochimique des Echanges entre Aquifères Profonds et Superficiels du Bassin d'Oued Fekan. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Mascara.

Belghiti M.L, Chahlaoui A, Bengoumi D et El Moustaine R (2013). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc). Larhyss Journal, 14: 21-36.

Benadela L, Bekkoussa B, Gaidi L. (2022). Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria. Journal of Groundwater Science and Engineering, 10(3): 233-249. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.03.003>

Ben cheikh N (2013). Etude des relations hydrodynamiques entre la nappe profonde de Sfax et les systèmes aquifères meridionaux (Menzel Habib et Gabès Nord) : Origine (s) et mécanismes de minéralisation des eaux souterraines. Thèse de Doctorat en Génie de l'Environnement et de l'Aménagement. L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie.

Benfetta H, Achour B, Remini B (2011). Problematique de surexploitation des eaux souterraines dans les zones arides : Cas de la plaine de Ghriss Mascara- Algérie. Courrier du Savoir – N°11, Mars 2011, pp.81-86

Benfetta H, Sahnoun A, Achour B, Ouaja A (2017).Epuraton des eaux usées dans la wilaya de Mascara. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°31, Sept 2017, pp. 249-258.<https://www.researchgate.net/publication/320386480>

Ben Hamoda M.F (2008). Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères côtiers du cap bon : cas des nappes de la côte orientale et d'El Haouaria, Tunisie. Thèse de doctorat, Institut national agronomique de Tunisie, université de 7 novembre à Carthage.

Références bibliographiques

- Benhattab K, Bouvier C, Meddi M (2014). Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles dans le bassin hydrographique - Chélif, Algérie. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27(3), 189–203. <https://doi.org/10.7202/1027805ar>
- Bensaoula F, Adjim M, Bensalah M (2007). L'importance des eaux karstiques dans l'approvisionnement en eau de la population de Tlemcen. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 06, Décembre 2007, pp. 57-64
- Bentekhici N, Benkesmia Y, Berrichi F, Bellal S A (2018). Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest algérien). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31(1), 43–59. <https://doi.org/10.7202/1047052ar>
- Betier M.G (1951). La carte géologique de l'Algérie, Ech. : 1/500 000, 2ème édition
- Bi Tié Abert G, Issiaka S, Brou K, Vamoryba F, Gnamien Béatrice K (2006). Impact de la variabilité climatiques sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo -La revue en sciences de l'environnement ; 7 N°1 : 1-12.*
- Biondic R, Meaški, H, Biondic B, Loborec J (2021). Karst Aquifer Vulnerability Assessment (KAVA) Method—A Novel GIS-Based Method for Deep Karst Aquifers. *Sustainability* **2021**, 13, 3325. <https://doi.org/10.3390/su13063325>
- Bouderbala A (2017). Assessment of water quality index for the groundwater in the Upper Cheliff plain, Algeria. *Geological Society of India J* 90, pages 347–356 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0723-7>
- Boufekane A. et Saighi O. (2013). Assessment of groundwater pollution by nitrates using intrinsic vulnerability methods: A case study of the Nil valley groundwater (Jijel, North-East Algeria). *Advanced Journal of Environmental Science and Technology* Vol. 1 (1), pp. 001-012. <https://doi.org/10.5897/AJEST2013.1428>
- Bouguerra H (2018). Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien). Thèse de Doctorat en hydraulique. Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen
- Chaffai H., Laouar R., Djabri L., Hani A., 2006. Etude de la vulnérabilité a la pollution des eaux de la nappe alluviale de Skikda : Application de la méthode DRASTIC, *Bulletin du Service Géologique National*, Vol. 17(1) ,63-74.
- Carter J.R (1988). Digital representations of topographic surfaces. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54, 1577-1580.
- CRIVERT (2003). La cartographie regionale de la vulnerabilite des eaux souterraines : un outil pertinent d'aide a la prise de decision en matiere d'aménagement du territoire. Synthèse réalisée pour la Commission environnementale de stratégie Saint-Laurent par le groupe ecologique CRIVER, 1-28. www.rocler.qc.ca/ziphs/index.htm.
- Crochet P et Marsaud B (1997). Approches conceptuelles de l'aquifère karstique. Problèmes méthodologiques et d'exploitation. *Hydrogéol.*, 3, 3-18.
- Dahmani A (2010). Impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans le bassin versant de Oued Fekan wilaya de Mascara. Thèse de doctorat, spécialité hydraulique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- Debieche, T. H (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et minéraux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse- Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat, U. F. R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, France (199 p).
- Dekkaki H.C., El Kayssi Y, Hilali M, Kacimi I et Sahbi H(2016). Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines a la pollution moyennant la méthode P.R.K. : application a la nappe phréatique du Rich (Sud du Maroc). *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 14, 917-926.
- De Montety V, Radakovitch O, Vallet-Coulomb C, Blavoux B, Hermitte D, Valles V (2008). Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer. Case of the Rhone delta (Southern France). *Appl Geochem* J23.2337–2349. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.03.011>

Références bibliographiques

- Dibi B., Kouassi Kouakou L., Kouamé Kouassi I., Konan Kouakou S., Soumahoro M., Konan-waidhet Arthur B., Gnakri D., (2013). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS: Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.2 (4), 464-476.
- DPSB (2016). Rapport annuel de la Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires de la Wilaya de Mascara. Rapport interne DPSB, Mascara, Algérie.
- Drias T., Toubal A.C., (2015). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (Bassin versant de l'Oued Ksob) extrême Est Algérien, *Larhyss Journal*, ISSN, Vol.1112-3680(22), 35-48.
- El Baba M, Kayastha P, Huysmans M, De Smedt F (2020). Evaluation of the Groundwater Quality Using the Water Quality Index and Geostatistical Analysis in the Dier al-Balah Governorate, Gaza Strip, Palestine. *Water* 2020, 12(1), 262. <https://doi.org/10.3390/w12010262>
- Elisante E, Muzuka ANN (2016). Assessment of sources and transformation of nitrate in groundwater on the slopes of Mount Meru, Tanzania. *Environmental Earth Sciences* 75, 277. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5015-1>
- El Kayssi Y, Hilali M, Kouz T, Kacimi I (2020). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC : cas de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 32(4), 317–334. <https://doi.org/10.7202/1069568ar>
- Ewodo MG, Ombolo A, Bon AF, Ntep F, Bineli E (2016). Apport des méthodes paramétriques DRASTIC, GOD et SI à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque dans les aquifères du bassin versant de l'Abiergué (région de Yaoundé). *Science de la vie, de la terre et agronomie. REV. CAMES - VOL.04 NUM.02. 2016 * ISSN 2424-7235.*
- Fadili A, Najib S, Mehdi K, Riss J, Makan A, Boutayed K, Guessir H (2016). Hydrochemical features and mineralization processes in coastal groundwater of Oualidia- Morocco. *Afr Earth Sci J* 116, 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.014>
- Fatih B (2009). Cartographie par les différentes méthodes de vulnérabilité à la pollution d'une nappe cotière cas de la plaine alluviale de l'Oued Djendjen (Jijel, Nord-Est Algérien). Thèse de Magister en Hydrogéologie environnemental et modélisation, Université Badji Mokhtar – Annaba.
- Foster S (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. & Van Waegeningh, H.(eds) *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution*. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, 69–86.
- Foster SSD (2002). Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: a critical overview, in: Robins, N.S. (Ed.), *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability* Geological Society, London, Special Publications, 130: 7–22.
- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, pp.604
- Garcia MG, De Hidalgo M, Blesa MA (2001). Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina. *Hydrol. J.* 9, 597–610.
- Ghazali D et Zaid A (2013). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (région de Meknes – Maroc). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, pp. 25-36.
- Gibbs R J (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170, 1088–1090.
- Gnakri D., (2013). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères des formations altérites à partir des méthodes DRASTIC et SYNTACS: Cas de la ville de M'bahiakro, Centre de la Côte d'Ivoire, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.2 (4), 464-476.
- Gogu R and Dassargues A (2000) Current Trends and Future Challenges in Aquifer Vulnerability Assessment Using Overlay and Index Methods. *Environmental Geology*, 39, 549-559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>

Références bibliographiques

- Gogu R et Dassargues A (1998). A short review on groundwater vulnerability assessment. Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. Workshop, 18-20 mai, Université de Neuchâtel, Suisse, pp. 1-19.
- Guillaume M., Marie L., 2015. Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec), Géohydro2011.7p
- Hadj Ammar F, Chkir N, Zouari K, Hamelin B, Deschamps P, Agoun A (2014). Hydro-geochemical processes in the Complexe Terminal aquifer of southern Tunisia: an integrated investigation based on geochemical and multivariate statistical methods. *Afr Earth Sci. J* 100, 81–95.
- Hamed A, Baali F, Hadji R, Zerrouki H, Besser H, Mokadem N, Legrioui R, Hamed Y (2017). Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundry basin). *Euro-Mediterr J Environ Integr* 3, 7. <https://doi.org/10.1007/s41207-017-0045-6>
- Hamza MH, Added A, Ben Mammou A, Abdeljaoued S, Rodríguez R (2004) Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle par les pesticides, de la nappe côtière alluvionnaire de la plaine de Metline-Ras Jebel-Raf Raf, Nord-Est tunisien, selon la méthode DRASTIC appliquée par les systèmes d'information géographique, *La Houille Blanche*, 90:5, 86-94, <https://doi.org/10.1051/lhb:200405011>
- Hamza M H, Added A, Francès A, Rodriguez R, Ajmi M, Abdeljaoued S (2008). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltime-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 21(1), 75–86. <https://doi.org/10.7202/017932ar>
- Hamza MH, Maâlej A, Ajmi M, Added A (2010) Validity of the vulnerability methods DRASTIC and SI applied by GIS technique to the study of diffuse agricultural pollution in two phreatic aquifers of a semi-arid region (Northeast of Tunisia). *Aquamundi* 1009:057–064. <https://doi.org/10.4409/Am-006-10-0009>
- Houatmia F, Khomsi S, Malayah A, Andolssi M & Bedir M (2015). Neogene aquifer: geochemistry and structuring in the Sidi Saad basin, central Tunisia. *Arab J Geosci* (2015) 8:4221–4238 <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1433-8>
- Jalali M (2010). Application of multivariate analysis to study water chemistry of groundwater in a semi-arid aquifer, Malayer, western Iran, *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.10777>
- JORA (2011). *Journal officiel de la république algérienne (Official Journal of the Algerian Republic)*, n 34, 19 juin 2011 (in French)
- Jourda J. P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430p.
- Kachi S (2007). Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott face aux polluants. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie. 163p.
- Kamel S, Dassi L & Zouari K (2006). Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 51(4) août 2006 : 713-730.
- Karant KR (1987). *Groundwater assessment, development and management*. Tata McGraw Hill, New Delhi, p 720
- Keesari T, Ramakumar KL, Chidambaram S, Pethperumal S, Thilagavathi R (2016). Understanding the hydrochemical behaviour of groundwater and its suitability for drinking and agricultural purposes in Pondicherry area, South India—a step towards sustainable development. *Groundw Sustain Dev J* 2-3, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.08.001>
- Kefifa A (2014). Contribution à l'étude et à la cartographie de l'impact des pressions anthropozoogènes et climatiques sur les ressources naturelles des monts de Saïda (Algérie). Thèse doctorat en Sciences d'Agronomie et des Forêts. Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen.

Références bibliographiques

- Kenniche S, Bekkoussa B, M'nassri S, Teffahi M, Taupin J-D, Patris N, Zaagane M, Majdoub R (2022). Hydrochemical characterization, physicochemical and bacteriological quality of groundwater in Sidi Kada Mountains, northwest of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10298-w>
- Kettab A, Ait Mouhoub D, Mitiche F, Ouarda T, Bobée B (2004). Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales d'Algérie par la simulation dans un contexte de changement climatique. Dans 57^{ème} congrès annuel de l'association canadienne des ressources hydriques (ACRH), 16-18 juin 2004, Canada, Montréal : Eau et changement climatique : comprendre pour mieux s'adapter; 2004.
- Khadri S (2009). Qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie aval : Impacts des néofacteurs de pollution. Thèse de Magister, université de Annaba, Algérie.
- Khemmoudj K., Bendadouche H., Merabet S (2014). Assessment of the vulnerability of an aquifer by DRASTIC and SYNTACS methods: Aquifer of Bazer – Geult Zerga area (northeast Algeria), *E3 Journal of Environmental Research and Management*, Vol. 5(9), 0169-0179.
- Kim SH, Choi BY, Lee G, Yun ST, Kim SO (2017). Compositional data analysis and geochemical modeling of CO₂-water-rock interactions in three provinces of Korea. *Environ Geochem Health* 41, 357–380 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10653-017-0057-9>
- Kumar M, Singh UK, Chauhan R P, Jha K, Ramanathan AL & Subramanian V (2008). Assessment of the impact of landfill on groundwater quality: A case study of the Pirana site in western India. *Environ Monit Assess* (2008) 141:309–321.
- Latifi (2018). Etude de la vulnérabilité des nappes aquifères de la région de Guelma et évaluation du rôle des STEP dans la protection des eaux. Thèse de doctorat, option hydrogéologie, Université de Bedji mokhtar – Annaba- Algérie.
- Latifi S, Chaab S, (2017). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 34: 48 -62 (2017).
- Legrioui R, Baali F, Hamad A, Abdeslam I, Redha M (2017). Water quality at a karstic aquifer in the region of Tebessa, northeast-Algeria. *Energy Procedia* 119: 356-366. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.119>
- Loáiciga H A, Maidment DR, Valdes JB (2000). Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA. *J Hydrology* 227, 173-194. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00179-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00179-1)
- Locas A, Barthe C, Margolin AB, Payment P (2008). Groundwater microbiological quality in Canadian drinking water municipal wells. *Canadian Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.1139/w08-028>
- Liu J , Peng Y , Li C, Gao Z, Chen S (2021). An investigation into the hydrochemistry, quality and risk to human health of groundwater in the central region of Shandong Province, North China. *Cleaner Production J* 282, 2021, 125416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125416>
- Mapoma HWT, Xie X, Liu Y, Zhu Y, Kawaye FP, Kayira TM (2017). Hydrochemistry and quality of groundwater in alluvial aquifer of Karonga, Malawi. *Environ Earth Sci* 76, 335 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6653-2>
- Margat J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie, Doc.BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orleans, France.
- Mechai, N., (1970). Etude agropédologique de la plaine de Ghars. Rapport du Service des Etudes Scientifiques (SES), Alger, Algérie.
- Meddi, M. & Humbert, J., (2000). Variabilité pluviométrique dans l'Ouest algérien durant les cinq dernières décennies. In Actes du 13^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC) Nice 6-8 septembre 2000 ; 13 : 266-274.

Références bibliographiques

- M'nassri S, Dridi L, Lucas Y, Schafer G, Hachicha M, Majdoub R (2018). Identifying the origin of groundwater salinisation in the Sidi El Hani basin (central-eastern Tunisia). *J Afr Earth Sci* 147 (2018) 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.07.004>
- Mohamed R. M. (2001) : Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et changement planétaires / sécheresse*, vol. 12, n°2, pp. 95-101
- Morat P (1969). Note sur l'application Madagascar du quotient pluviométrique d'Emberger Cahier ORSTOM, série. Biologie., N° 10 - décembre 1969, p16.
- Motevalli A, Moradi HR, Javadi S (2018). A comprehensive evaluation of groundwater vulnerability to saltwater up-coning and sea water intrusion in a coastal aquifer (case study: Ghaemshahr-juybar aquifer). *J Hydrol* 753-773. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.047>
- Mtoni Y, Mjemah IC, Bakundukize C, Camp MV, Martens K, Walraevens K (2012). Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es-Salaam, Tanzania. *Environ Earth Sci* 70 (30), 1091–1111. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2197-7>
- Murat V, Paradis D, Savard MM, Nastev M, Bourque E, Hamel A, Lefebvre R, Martel R (2003) : Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD ; commission géol du Canada, Recherches en cours 2003-D3, 14 p.
- Najib S, Fadili A, Mehdi K, Riss J, i Makan A, Guessir H (2016). Salinization process and coastal groundwater quality in Chaouia, Morocco. *Journal of African Earth Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.12.010>
- Narany ST, Ramli MF, Aris AZ, Sulaiman WNA, Fakharian K (2014). Spatiotemporal variation of groundwater quality using integrated multivariate statistical and geostatistical approaches in Amol-Babol Plain-Iran. *Environ Monit Assess* 186:5797–5815. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3820-8>
- Nouar T (2007). Impact de la pollution sur les ressources en eau superficielles et souterraines de la région de Guelma. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.179p.
- Nouayti N , Khattach D, Hilali M (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (4) (2015) 1068-108.
- Nourbakhsh Z, Moharamnejad N, Mehrdadi N, Hassani AH, Yousefi H (2015). Proposing an Index to Evaluate the Groundwater Quality Using “Multi-Criteria Decision Making” Approach and Analyzing the Spatial Distribution of it in Tajan Plain Northern Iran. *Iran J Health Sci* 2015; 3(3): 37-47. <https://doi.org/10.7508/ijhs.2015.03.005>
- Ogrinc N, Tamse S, Zavadlav S, Vrzel J, Jin L (2019). Evaluation of geochemical processes and nitrate pollution sources at the Ljubljansko polje aquifer (Slovenia): A stable isotope perspective. *Sci Total Environ* J 646: 1588-1600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.245>
- Ouédraogo M M , Degré A, Debouche C (2014). Synthèse bibliographique : le modèle numérique de terrain de haute résolution, ses erreurs et leur propagation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2014 18(3), 407-421.
- Ouhmidou M , Chahlaoui A, Kharroubi A et Chahboune M (2015). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage Hassan Addakhil d'Errachidia (Maroc). *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (6) (2015) 1663-1671 ISSN: 2028-2508 CODEN: JMESCEN
- PACES-SLSJ Les projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Saguenay-Lac-St-Jean (PACES-SLSJ). <https://rqs.ca/vulnerabilite/>
- Parkhurst DL and Appelo CAJ (1999). User's guide to PHREEQC (version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical-calculations. USGS Water-Resour. Invest Rep 99-4259, 312 pages

Références bibliographiques

- Paul R, Brindha K, Gowrisankar G, Tan ML, Singh MK (2019). Identification of hydro-geochemical processes controlling groundwater quality in Tripura, Northeast India using evaluation indices, GIS, and multivariate statistical methods. *Environ Earth Sci* 78, 470 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8479-6>
- Payment P and Locas A (2011). Pathogens in water: value and limits of correlation with microbial indicators. *Ground Water*. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00710.x>
- Plummer LN, Jones BF, Truesdell AH (1976). WATEQ-a fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. *U.S. Geol. Surv. Wat. Res. Invest.*, 76-13, 61p.
- Pouye, A., Faye, S.C., Diédhiou, M. et al. (2022). An evaluation of groundwater vulnerability assessment methods in a rapidly urbanizing city: evidence from Dakar, Senegal. *Environ Earth Sci* **81**, 410 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10531-5>
- Richards L A (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Salinity laboratory staff. *USDA Handbook*. pp 60–160.
- Rodier J (1996). *L'analyse de l'eau: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. Ed Dunod Paris. 1384 pages.
- Rodier J, Bernard L, Nicole M et Coll (2009). *L'analyse de l'eau, 9e édition*. DUNOD (éditeur), Paris, France. (2009) 1579.
- Rose S (2002). Comparative major ion geochemistry of Piedmont streams in the Atlanta, Georgia region: possible effects of urbanization. *Env Geol* 42, pages 102–113 (2002). <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0545-8>
- Rouabhia A (2006). *Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod Nord-Est algérien*. Thèse de Doctorat en hydrogéologie .Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.174p.
- Ruiz-Pico A, Cuenca AP, Serrano-Agila R, Criollo DM, Leiva-Piedra J, Salazar-Campos J. (2019) Hydrochemical characterization of groundwater in the Loja Basin (Ecuador). *Applied Geochemistry J*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.02.008>
- Saeedi M, Abessi O, Sharifi F, Meraji H (2010) Development of groundwater quality index. *Environ Monit Assess* 2010; 163, 327-335. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0837-5>
- Salemi E, Mastrocicco M, Colombani N, Aschonitis VG (2012). Comparison of Three Different Methods for Groundwater Intrinsic vulnerability Mapping in the Ferrara Province, Italy. *BALWOIS 2012- Ohrid, Republic of Macedonia*, 28 May-2 June 2012.
- Schnebelen N, Platel JP, Lenindre Y, Baudry D (2001). *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'oligocène en région bordelaise. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution*. Bureau de recherches géologiques et minières, RP-51178-FR, France, 75 p
- Schoeller H (1962). *Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources* Masson et Cie. Editions, (642p).
- Sedrati N (2011). *Origines et caractéristiques physico-chimique des eaux de la wilaya de Bisakra-sud-est Algérien*. Thèse de doctorat, option hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar- Annaba, Algérie.
- Seghir K (2008). *Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien)*. Thèse de Doctorat, en Géologie appliquée, option Hydrogéologie, université de Annaba – Algérie.
- Semari K, Benayada L, Chergui M, Alam B (2012). *Etat des ressources hydriques de la wilaya de Mascara (Algérie)*. TSM numéro 11 - 2012 - 107e année

Références bibliographiques

- Sharma A, Bora CR, Shukla V (2013). Evaluation of Seasonal Changes in Physico-chemical and Bacteriological Characteristics of Water from the Narmada River (India) Using Multivariate Analysis. *Nat Resour Res* 22, pages 283–296 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11053-013-9204-x>
- Sinan M. et Razack (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environ. Geol.*, 57, 349-363.
- Singh KA, Raj B, Tiwari AK, Mahato MK (2013). Evaluation of hydrogeochemical processes and groundwater quality in the Jhansi district of Bundelkhand region, India. *Environ Earth Sci* 70, pages 1225–1247 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2209-7>
- Sourisseau B (1972). Etude hydrogéologique de la plaine de Ghriss. Rapport Agence Nationale des Ressources Hydraulique, Alger, Algérie (120 p).
- Srinivasamoorthy K, Chidambaram S, Prasanna MV, Vasanthavihar M, Peter J, Anandhan P (2008). Identification of major sources controlling groundwater chemistry from a hard rock terrain—a case study from Mettur taluk. Salem district. Tamil Nadu. India. *J Earth Syst Sci* 117- 49.. <https://doi.org/10.1007/s12040-008-0012-3>
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L. & Dill, A.M.M.C (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeol J* 14, 79–99 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>
- Taazzouzte, M., Ghafiri, A., Lemacha, H., & El Moutaki, S. (2020). Study of Intrinsic Vulnerability to Pollution by the GOD-Foster Method: Application to Temara Groundwater (Morocco). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 129-145. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.88010>
- Varol S, Davraz A (2014). Evaluation of the groundwater quality with WQI (water quality index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur/Turkey). *Environ Earth Sci* 73, 1725–1744. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3531-z>
- Vrba J and Zaporozec A (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability — IAH International Contributions to Hydrogeology, 16. FRG, Heise Publication, Hannover, 131 p.
- Wilcox LV (1953). Classification and use of irrigation waters. U.S. Geological Department Agriculture. Circular 969: 19 pages
- Yasin M, Ketema T, Bacha K (2015). Physico-chemical and bacteriological quality of drinking water of different sources, Jimma zone, Southwest Ethiopia. *BMC Res Notes* 8, 541 (2015). <https://doi.org/10.1186/s13104-015-1376-5>
- Younssi H.E (2009). Epuisement de la nappe aquifère de la région de F'kirina (W. d'Oum El Bouaghi), et ces répercussions sur la gestion des ressources en eau. Thèse de magister en Hydrogéologie environnemental et modélisation. Université Badji Mokhtar – Annaba.
- Zaidi MA (2016). Étude de la salinité des eaux et des sols de la plaine de Ghriss. Thèse de Magister en Hydrogéologie et Environnement, Université de Mascara.
- Zaki SR, Redwan M, Masoud AM, Abdel Moneim AA (2018). Chemical characteristics and assessment of groundwater quality in Halayieb area, southeastern part of the Eastern Desert, Egypt. *Geosci J* 23, 149–164 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12303-018-0020-5>
- Zeghaba Nadjette (2011). Etude du chimisme des eaux souterraines et de surface de la basse vallée de l'Oued Saf-Saf W.Skikda (N.E.Algérien). Thèse de Magister, Université Badji - Mokhtar –ANNABA
- Zhang R, Hamerlinck J. D., Gloss S. P. et Munn L (1996). Determination of non point-source pollution using GIS and numerical models. *J Environ Qual* 25:411–418.
- Zhang X, Qian H, Chen J, Qiao L (2014). Assessment of Groundwater Chemistry and Status in a Heavily Used Semi-Arid Region with Multivariate Statistical Analysis. *Water* 2014, 6(8), 2212-2232. <https://doi.org/10.3390/w6082212>

Annexe I

Tables NPP (d'après la norme ISO 7218 :1996(F))

Tableau 1 - Table NPP pour 3 x 1 g (ml), 3 x 0,1 g (ml) et 3 x 0,01 g (ml).

Nombre de résultats positifs			NPP	Catégorie lorsque le nombre d'essais de mesures est de 1 pour le lot considéré	Limites de confiance			
					>95%	>95%	>99%	>99%
0	0	0	<0,30		0,00	0,94	0,00	1,40
0	0	0	0,30	3	0,01	0,95	0,00	1,40
0	1	0	0,30	2	0,01	1,00	0,00	1,60
0	1	1	0,61	0	0,12	1,70	0,05	2,50
0	2	0	0,62	3	0,12	1,70	0,05	2,50
0	3	0	0,94	0	0,35	3,50	0,18	4,60
1	0	0	0,36	1	0,02	1,70	0,01	2,50
1	0	1	0,72	2	0,12	1,70	0,05	2,50
1	0	2	1,1	0	0,4	3,5	0,2	4,6
1	1	0	0,74	1	0,13	2,00	0,06	2,70
1	1	1	1,1	3	0,4	3,5	0,2	4,6
1	2	0	1,1	2	0,4	3,6	0,2	4,6
1	2	1	1,5	3	0,5	3,8	0,2	5,2
1	3	0	1,6	3	0,5	3,8	0,2	5,2
2	0	0	0,92	1	0,15	3,50	0,07	4,60
2	0	1	1,4	2	0,4	3,5	0,2	4,6
2	0	2	2	0	0,5	3,8	0,2	5,2
2	1	0	1,5	1	0,4	3,8	0,2	5,2
2	1	1	2,0	2	0,5	3,8	0,2	5,2
2	1	2	2,7	0	0,9	9,4	0,5	14,2
2	2	0	2,1	1	0,5	4,0	0,2	5,6
2	2	1	2,8	3	0,9	9,4	0,5	14,2
2	2	2	3,5	0	0,9	9,4	0,5	14,2
2	3	0	2,9	3	0,9	9,4	0,5	14,2
2	3	1	3,6	0	0,9	9,4	0,5	14,2
3	0	0	2,3	1	0,5	9,4	0,3	14,2
3	0	1	3,8	1	0,9	10,4	0,5	15,7
3	0	2	6,4	3	1,6	18,1	1,0	25,0
3	1	0	4,3	1	0,9	18,1	0,5	25,0
3	1	1	7,5	1	1,7	19,9	1,1	27,0
3	1	2	12	3	3	36	2	44
3	1	3	16	0	3	38	2	52
3	2	0	9,3	1	1,8	36,0	1,2	43,0
3	2	1	15	1	3	38	2	52
3	2	2	21	2	3	40	2	56
3	2	3	29	3	9	99	5	152
3	3	0	24	1	44	99	3	152
3	3	1	46	1	9	198	5	283
3	3	2	110	1	20	400	10	570
3	3	3	>110					
autres valeurs			non cité dans la table ISO 7218 : 1996 (F)					

Tableau « B » Concours définitifs

(En milliers de DA)

SECTEURS	MONTANTS OUVERTS	
	C.P.	A.P.
Soutien aux services productifs	6.500	6.500
Infrastructures économiques et administratives	367.000	367.000
TOTAL	373.500	373.500

Décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre des ressources en eau,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2) ;

Vu la loi n° 85-05 du 16 février 1985, modifiée et complétée, relative à la protection et à la promotion de la santé ;

Vu la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005, modifiée et complétée, relative à l'eau ;

Vu la loi n° 09-03 du 29 Safar 1430 correspondant au 25 février 2009 relative à la protection du consommateur et à la répression des fraudes ;

Vu le décret présidentiel n° 10-149 du 14 Joumada Ethania 1431 correspondant au 28 mai 2010 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 04-196 du 27 Joumada El Oula 1425 correspondant au 15 juillet 2004 relatif à l'exploitation et à la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de source ;

Vu décret exécutif n° 08-148 du 15 Joumada El Oula 1429 correspondant au 21 mai 2008 fixant les modalités d'octroi de l'autorisation d'utilisation des ressources en eau ;

Après approbation du Président de la République ;

Décète :

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 112 de la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005, modifiée et complétée, susvisée, le présent décret a pour objet de fixer les paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine ainsi que les modalités de contrôle de conformité.

Art. 2. — Les paramètres de qualité fixés par le présent décret sont applicables à l'eau de consommation humaine définie à l'article 111 de la loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005, susvisée, à l'exception des eaux minérales naturelles, des eaux de source, des eaux dites "eaux de table" et des eaux thermales.

Art. 3. — Au sens du présent décret, il est entendu par :

— **valeurs limites** : valeurs maximales fixées pour certains paramètres chimiques, radionucléides et microbiologiques et dont le dépassement constitue un danger potentiel pour la santé des personnes ;

— **valeurs indicatives** : valeurs de référence fixées pour certains paramètres organoleptiques et physico-chimiques à des fins de contrôle du fonctionnement des installations de production, de traitement et de distribution d'eau et d'évaluation des risques pour la santé des personnes.

Art. 4. — Les valeurs limites et les valeurs indicatives des paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine sont annexées au présent décret.

Art. 5. — La vérification de la conformité de l'eau de consommation humaine aux paramètres de qualité est effectuée au moyen d'analyses d'échantillons prélevés au niveau des points suivants :

— au compteur particulier pour les eaux fournies par un réseau public de distribution ;

— au point d'utilisation pour les eaux prélevées dans le domaine public hydraulique naturel en vue de la fabrication de boissons gazeuses et de glace ou de la préparation, du conditionnement et de la conservation de denrées alimentaires ;

— conformément à la réglementation en vigueur pour les eaux fournies à partir de citernes mobiles.

Art. 6. — La vérification de la conformité de l'eau de consommation humaine incombe, suivant le cas :

— à l'organisme exploitant tout ou partie du service public d'alimentation en eau potable ;

— au titulaire de l'autorisation ou de la concession d'utilisation des ressources en eau ;

— au titulaire de l'autorisation d'approvisionnement en eau destinée à la consommation humaine par citernes mobiles ;

— à toutes les institutions de contrôle habilitées par la législation et la réglementation en vigueur.

Art. 7. — Lorsqu'il est constaté que l'eau de consommation humaine a cessé d'être conforme aux valeurs limites et aux valeurs indicatives fixées par le présent décret, l'organisme exploitant ou le titulaire d'autorisation ou de concession, concernés au sens de l'article 6 ci-dessus, sont tenus de suspendre la distribution de l'eau.

Aucun rétablissement de la distribution de l'eau ne peut être effectué sans qu'une enquête ne détermine les causes de non-conformité et sans la prise de mesures correctives nécessaires en vue de rétablir la qualité de l'eau.

Art. 8. — L'organisme exploitant du service public d'alimentation en eau potable est tenu d'informer les usagers, par tous moyens appropriés, de toute suspension de la distribution et/ou des mesures correctives décidées au titre de l'article 7 ci-dessus.

Art. 9. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011.

Ahmed OUYAHIA.

ANNEXE

PARAMETRES DE QUALITE DE L'EAU DE CONSOMMATION HUMAINE

Tableau 1 : PARAMETRES AVEC VALEURS LIMITEES

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITEES
Paramètres chimiques	Aluminium	mg/l	0,2
	Ammonium	mg/l	0,5
	Baryum	mg/l	0,7
	Bore	mg/l	1
	Fer total	mg/l	0,3
	Fluorures	mg/l	1,5
	Manganèse	µg/l	50
	Nitrates	mg/l	50
	Nitrites	mg/l	0,2
	Oxydabilité	mg/l O ₂	5
	Phosphore	mg/l	5
	Acrylamide	µg/l	0,5
	Antimoine	µg/l	20
	Argent	µg/l	100
	Arsenic	µg/l	10
	Cadmium	µg/l	3
	Chrome total	µg/l	50
	Cuivre	mg/l	2
	Cyanure	µg/l	70
	Mercure	µg/l	6
Nickel	µg/l	70	
Plomb	µg/l	10	
Sélénium	µg/l	10	
Zinc	mg/l	5	

ANNEXE (suite)

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) totaux	µg/l	0,2
	fluoranthène, benzo (3,4) fluoranthène, benzo (11,12) fluoranthène, benzo (3,4) pyrène, benzo (1,12) pérylène, indéno (1 ,2,3-cd) pyrène.		
	benzo (3,4) pyrène	µg/l	0,01
	Hydrocarbures dissous ou émulsionnés extraits au CCl ₄	µg/l	10
	Phénols	µg/l	0,5
	Benzène	µg/l	10
	Toluène	µg/l	700
	Ethylbenzène	µg/l	300
	Xylènes	µg/l	500
	Styrène	µg/l	100
	Agents de surface réagissant au bleu de méthylène	mg/l	0,2
	Epychlorehydrine	µg/l	0,4
	Microcystine LR	µg/l	0,1
	Pesticides par substance individualisée - Insecticides organochlorés persistants, organophosphorés et carbamates, les herbicides, les fongicides, les P.C.B. et PC.T	µg/l	0,1
	à l'exception de aldrine et dieldrine		0,03
	Pesticides (Totaux)	µg/l	0,5
	Bromates	µg/l	10
Chlore	mg/l	5	
Chlorite	mg/l	0,07	
Trihalométhanes (THM) (Total)			
Chloroforme, Bromoforme, Dibromochlorométhane, Bromodichlorométhane	µg/l	100	

ANNEXE (suite)

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques (suite)	Chlorure de vinyle	µg/l	0,3
	1,2 - Dichloroéthane	µg/l	30
	1,2 - Dichlorobenzène	µg/l	1000
	1,4 - Dichlorobenzène	µg/l	300
	Trichloroéthylène	µg/l	20
	Tetrachloroéthylène	µg/l	40
Radionucléides	Particules alpha	Picocurie/l	15
	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Bequerel/l	100
	Uranium	µg/l	15
	Dose totale indicative (DTI)	(mSv/an)	0,1
Paramètres microbiologiques	Escherichia Coli	n/100ml	0
	Entérocoques	n/100ml	0
	Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	n/20ml	0

Tableau 2 : PARAMETRES AVEC VALEURS INDICATIVES

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres organoleptiques	Couleur	mg/l Platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 12°C	Taux dilution	4
	Saveur à 25°C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l en CaCO ₃	500
	Calcium	mg/l en CaCO ₃	200
	Chlorures	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20°C	µS/cm	2800
	Dureté	mg/l en CaCO ₃	200
	Potassium	mg/l	12
	Résidu sec	mg/l	1500
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
Température	°C	25	