



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER Académique

Domaine : Sciences de la nature et de la vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des Ecosystèmes

Présenté par

- Mlle. OUMELEZ Nadjett
- Mlle. ZOUAOUI LAICH Chaima

Thème

**Approche hydrogéochimique des eaux
souterraines de l'aquifère de Mellagou,
(*nord-est algérien*)**

Devant le jury composé de

Président : Mr. BADIS Zakaria, MAA Université de Khenchela

Encadrant : Mme. BERKANI Cherifa, MCB Université de Khenchela

Examineur : Mme. MEZHOUD Amel, MAA Université de Khenchela

Année universitaire : 2022-2023

Remerciement

*Avant d'aborder le vif du sujet, nous tenons à remercier
vivement :*

*Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et
la patience qu'il nos donné durant toutes ces années d'étude
Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas
pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Berkani
Cherifa.*

*Je tiens également à exprimer une reconnaissance aux membres
de jury MS BADIS Zakaria de m'avoir honoré de présider le
madame MEZHOU D Amel*

*D'avoir bien accepté d'examiner le contenu du présent travail
Nous tenons à remercier également tous ceux qui nous ont aidé
de prés et de loís pour l'élaboration de ce mémoire.*

❖ *NADJETE*
❖ *CHAIMA*

Dédicace



Je dédie ce travail

A mes chers parents, particulièrement à mon père, qui m'adoté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui

A mes sœurs et mes frère Et je remercie ma belle-sœur, ma petite nièce CELIA

Ainsi à toute ma famille et mes amies Chaïma, Ikram, Yasmine, et mon binôme Chaïma qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Et à l'ensemble des étudiants de la promotion

M03

NADJETE 

Dédicace



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

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

A mes frères, Achref et Abd El Djalile, et Ma sœur Riheb.

A tous la famille zouaoui laïche, que Dieu prolonge leur vie et leur santé.

A mon cher fiancé, sief el islam pour les encouragements, je tiens à exprimer mon amour et ma gratitudeMerci beaucoup.

Un grand merci A mon professeur encadrant : Berkani Cherifa pour ses efforts dans l'accomplissement de cet humble travail.

A la famille de département des sciences naturelles et de la vie.

A mes chers collègues.

En fin, je remercie mon binôme, Nadjett, qui est contribué à la réalisation de ce travail

CHAIMA



Résumé

L'utilisation des eaux souterraines dans la région de Bouhmama à des fins de consommation et d'irrigation a augmenté progressivement au cours de la dernière décennie. La qualité de l'eau de l'aquifère a été considérablement altérée par l'activité anthropique, comme l'utilisation extensive d'engrais chimiques. Cette recherche vise à améliorer notre compréhension de la fonction hydrogéochimique de l'aquifère de Mellagou dans la région de Bouhmama au nord-est de l'Algérie. Elle contribue à l'identification des phénomènes affectant la minéralisation et les mécanismes de salinisation des eaux souterraines. Un total de 15 échantillons d'eau souterraine a été collecté pendant les saisons des pluies en 2023 répartis dans la zone d'étude. Afin de réaliser les résultats obtenus cette étude a utilisé des diagrammes hydrochimiques (diagrammes de Piper, Schoeller, Stiff, Stabler, et Wilcox), des modèles thermodynamiques (indices de saturation), et une méthode statistique (ACP). Trois faciès chimiques avec une prédominance du faciès bicarbonate calcique reflètent l'influence des intercalations au sein des formations sédimentaires bicarbonatées. La minéralisation des eaux souterraines est principalement régie par la dissolution et la précipitation des minéraux (gypse et halite, calcite et dolomite), l'échange de bases et les activités anthropiques. Les résultats acquis par ACP montrent que les variables contrôlant la minéralisation de l'eau sont Cl^- , Na^+ , et K^+ .

Mots clés : Minéralisation, eaux souterraines, salinité des eaux, Mellagou.

Abstract

The use of groundwater in Bouhmama area for drinking and irrigation purposes has increased progressively over the past decade. The water quality of the aquifer has been significantly altered by anthropogenic activity, such as the extensive use of chemical fertilizers. This research intends to enhance our understanding of the hydrogeochemical function of the Mellagou aquifer in the Bouhmama area in northeastern Algeria. It contributes to the identification of the phenomena affecting the mineralization and the mechanisms of salinization of groundwater. 15 groundwater samples were collected during the rainy seasons in 2022 distributed in the study area. In order to performed the results obtained this study used hydrochemical diagram (Piper, Schoeller, Stiff, Stabler, and Wilcox diagrams), thermodynamic models (saturation indexes), and statistical method (PCA). Three chemical facies with a predominance of the calcic bicarbonate facies reflect the influence of intercalations within the bicarbonate sedimentary formations. Groundwater mineralization is mainly governed by the dissolution and the precipitation of minerals (gypsum and halite, calcite and dolomite), Base Exchange, and anthropogenic activities. The results acquired by PCA show that the variables controlling water mineralization are Cl^- , Na^+ , and K^+ .

***key words:* Mineralization, groundwater, water salinity, Mellagou.**

ملخص

ازداد استخدام المياه الجوفية في منطقة بوحمامة لأغراض الشرب والري بشكل تدريجي خلال العقد الماضي. لقد تغيرت نوعية المياه في الخزان الجوفي بشكل كبير بسبب النشاط البشري ، مثل الاستخدام المكثف للأسمدة الكيماوية. يهدف هذا البحث إلى تحسين فهمنا للوظيفة الهيدروجيوكيميائية لطبقة المياه الجوفية ملاقو في منطقة بوحمامة في شمال شرق الجزائر. يساهم في تحديد الظواهر التي تؤثر على آليات تمعدن وتملح المياه الجوفية. تم جمع 15 عينة مياه جوفية خلال مواسم الأمطار عام 2023 موزعة على منطقة الدراسة. من أجل تحقيق النتائج التي تم الحصول عليها ، استخدمت هذه الدراسة المخططات الهيدروكيميائية (مخططات بايبر وشولر وستيف وستابلر وويلكوكس) ، والنماذج الديناميكية الحرارية (مؤشرات التشبع) ، وطريقة إحصائية (PCA). تعكس ثلاث سحنات كيميائية مع غلبة سحنات بيكربونات الكالسيوم تأثير الإقحام داخل التكوينات الرسوبية للبيكربونات. يخضع تمعدن المياه الجوفية بشكل أساسي إلى انحلال وترسيب المعادن (الجبس والهاليت والكالسيت والدولوميت) والتبادل الأساسي والأنشطة البشرية. تظهر النتائج التي حصلت عليها PCA أن المتغيرات التي تتحكم في تمعدن الماء هي $-Cl$ و $+Na$ و $+K$.

الكلمات المفتاحية: التمدن، المياه الجوفية، ملوحة المياه، سهل ملاقو

Table des matières

REMERCIEMENT

RESUMES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

I. Partie bibliographique

I.1 Introduction	1
I.2 Présentation générale de la zone d'étude.....	1
I.2.1 Situation géographique	1
I.2.2 Les coordonnées géographiques	1
I.2.3 La population.....	2
I.2.4. Situation hydrologique	3
I.2.5 La couverture végétale.....	4
I.2.6 L'agriculture	6
I.2.7 Situation pédologique	6
I.2.8 Situation de géologie régionale	7
I.2.9 Etude climatologique	8
1.2.9.1. Etages climatiques.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1 Echantillonnage et méthodes analytiques	11
II.2. Le mode opératoire.....	12
II. 2. 1. Méthode de titration.....	12
II .3. Spectrophotomètre UV	13
II.4. Résultats et discussions	13

II. 4. 1. Les paramètres physiques.....	14
II.4.2.Paramètres chimiques.....	14
II.4.2 .1.Diagramme de Piper et Stiff (faciès chimique)	14
II.4.2.2.. Diagramme de Schoeller	16
II.4.2.3 Le diagramme de Stabler	16
II.4.2.4. Le diagramme de Wilcox	17
III.1.Origine de la minéralisation des eaux de la nappe de Mellagou.....	18
. III.1.1.Relation binaire	18
IV.1.Modélisation géochimique.....	21
V. Analyse statistique	22

Liste des figures

Figure 1. Présentation géographique de la zone d'étude	2
Figure 2 Réseau hydrographique de bassin versant d'Oued Mellagou(référence	4
Figure 3 Le couvert forestier naturel de bassin versant d'Oued Mellagou(référence	5
Figure 4.la répartition des unités de sols à travers la zone d'étude	7
Figure 5. Carte géologique de bassin versant d'oued Mellagou (Laffite, 1939 ; in Houbib, 2013)	8
Figure 6 Carte d'inventaire de la zone d'étude, Février 2023	11
Figure 7. Représentation graphique de Piper des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	15
Figure 8 Représentation graphique de Stiff des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	15
Figure 9 . Représentation graphique de Scholler des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	16
Figure 10. Représentation graphique de Stabler des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	17
Figure 11. Variation du pourcentage de sodium en fonction de la conductivité électrique des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	18
Figur12. Relations binaires des ions majeurs des eaux souterraines de la vallée de Mellagou.	
Figure 13. Répartition de la conductivité électrique des eaux souterraines de la plaine de Mellagou	22
Figure 14.Plan factoriel de l'analyse en composantes principales (ACP) : F1- F2.....	25

Liste des Tableaux

Tableau 1: Répartition de la population par variance. (DPSI 2016) 2.....	2
Tableau 2: Répartition des effectifs par secteur au 31 décembre 2008. (3) supprimer le numéro et écrire directement la référence entre parenthèse.....	2
Tableau 3: paramètres topologique du bassin de Mellagou(Aissat 2019)	4
Tableau 4 Caractéristiques de la station pluviométrique retenue dans l'analyse des données climatiques : (kalkoul, 2016)	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5: les principaux éléments mesurés des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	13
Tableau 6: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la vallée de Mellagou	23
Tableau 7 : Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux.....	23

Liste des Abréviations

ACL : Agglomérations Chef-lieu

ACP : l'analyse en composantes principales

BV : bassin versant

Ca²⁺ : le calcium

CE : conductivité électrique

Cl⁻ : le chlore

DPSI : direction De Planification Statistique

Ha : Hectare.

HCO₃⁻ : bicarbonate

IS : Indices de saturation des minéraux

K⁺ : le potassium

Mg²⁺ : magnésium

NO₃⁻ : les nitrates

Na⁺ : le sodium

PH : le potentiel d'hydrogène

So₄⁻² : le sulfate

T : Température

TDS : la charge totale dissoute

NE-SW : NorthEast – Southwest

Introduction générale

Les problèmes causés par le changement climatique sont susceptibles d'être extrêmes dans les régions au climat semi-aride. Cela est dû au fait que des niveaux élevés d'évapotranspiration se produisent dans ces régions. La sécheresse affecte le cycle de l'eau, réduisant la quantité d'eau disponible à partir de sources naturelles (**Fletcher et al., 2013 ; Semadeni-Davies et al., 2008 ; Chang & Bonnette, 2016 ; Nistor et al. 2019**).

Dans les bassins versants endoréiques, les eaux souterraines sont la ressource la plus importante qui peut être utilisée pour la boisson et l'irrigation. En général, la qualité des eaux souterraines est contrôlée par les précipitations, la qualité de la recharge, l'accessibilité des eaux de surface, les processus hydrogéochimiques qui se produisent entre l'eau et les aquifères, les activités humaines et l'irrigation non planifiée (**Singh & Kumar, 2010 ; Venkateswaran & Vediappan, 2013 ; Nagaraju et al., 2015**).

Les eaux souterraines contiennent des sels dissous, qui sont principalement régulés par l'alimentation en eau, la lithologie et le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère. Un excès d'ions dissous dans l'eau peut affecter la qualité de l'eau. Les études hydrogéochimiques sont particulièrement utiles pour évaluer, protéger et gérer les ressources en eau en termes d'identification et d'évaluation de la qualité de l'eau (**Nagaraju et al., 2015 ; Balaji et al., 2018 ; Adimalla et al., 2020**).

La dégradation de la qualité physico-chimique des ressources en eau dans les aquifères des zones semi-arides fait l'objet de défis futurs. La variabilité et le changement climatique affectent la recharge et la décharge des aquifères et, par conséquent, leurs réserves globales en eau souterraine (**Lăcătușu, et al., 2019 ; Jeff Garçon et al., 2020**).

La salinité est considérée comme l'une des principales causes de dégradation de la qualité des eaux souterraines dans le monde, (**Kloppmann et al., 2011**).

Les besoins en eau de la région de Bouhmama sont assurés par les eaux souterraines de l'aquifère plio-quadernaire. L'eau de cet aquifère est accessible par des forages. Cet aquifère a été excessivement exploité ces dernières années pour soutenir le développement de l'agriculture irriguée, et les besoins de la population de la région. Ceci définit un état d'épuisement des réserves comme des puits traditionnels (**Berkani et al., 2023**).

Cette augmentation a provoqué une pression sur les ressources en eau souterraine, également liée au climat, l'alimentation de la nappe phréatique par les eaux de surface

conduit à une modification de la composition chimique d'origine. Cette condition, associée à la sécheresse, a provoqué le tarissement de nombreuses sources et induit une dégradation de la qualité chimique, illustrée par l'augmentation de la salinité des eaux **(Berkani et al., 2023 ; Khemmoudj et al., 2016 ; Barbieri et al., 2019 ; Fathi et al., 2017 ; Bencer, 2005 ; Zubair et al., 2022)**.

Tracer et déterminer l'origine de la variation de la chimie de l'eau est souvent lié à des causes naturelles (changement climatique, érosion et altération des formations traversées) et aux activités anthropiques (urbaines, industrielles et agricoles) **(Csete et al., 2021 ; Kumar et al., 2019)**.

Certains processus hydrogéochimiques se produisent au cours de cette évolution, qu'il convient d'identifier. **(Berkani et al., 2023)**,

Cette étude hydrogéochimique vise à identifier les processus responsables de l'évolution de la chimie des eaux souterraines dans l'aquifère de la vallée de Mellagou, et les mécanismes d'acquisition de la charge saline.

Partie bibliographique

I.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente d'une manière générale la région d'étude. Il s'agit en l'occurrence de la situation géographique, démographique, caractéristique naturels. Et aussi et les principales caractéristiques climatologiques.

I.2 Présentation générale de la zone d'étude

I.2.1 Situation géographique

Le sous bassin versant d'oued Mellagou est situé dans le massif des Aurès (partie orientale de l'Atlas saharien Nord Est du territoire Algérien), il fait partie du grand bassin hydrologique de Chott Melghir. Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le sousbassin versant d'Oued Mellagou appartient à l'ensemble des Hauts plateaux constantinoise –Chott Melghir. **(Houbibi, 2013)**

Ce sous bassin versant est situé à :

30 km au Sud – Ouest du chef-lieu de la Willaya de Khenchela.

15 km au Sud – Ouest de Kais.

Environ de 50 km de Sud – Est de la Willaya de Batna.

Il est limité :

Au Sud par la commune de Babar.

Au Nord par la commune de Touffana.

A l'Est par la commune de Tamza.

A l'Ouest par la commune de Lemsara

I.2.2 Les coordonnées géographiques

La délimitation du bassin versant submergé sur la carte topographique ci-dessus donne les coordonnées géographiques suivantes :

* La longitude : 6°61mn et 6°93mn.

* La latitude : 35°10mn et 35°42mn.

Notre sous bassin versant fait partie du grand bassin versant de Oued Arab. Il s'adapte Le centre du massif de l'Aurès, la région Nord – Ouest dominée par le massif des Aurès Ben Imloul – Chelia qui culmine le plus haut sommet de l'Algérie de Nord « Ras Kelthoum ».

Avec une altitude de 2326 m, et le massif de Ouled Yagoub – Ben Oudjana au Nord – Est des sous bassin versant qui culmine à 2143 m au Djebel Bazez. **(Bouali et Berkane, 2015)**

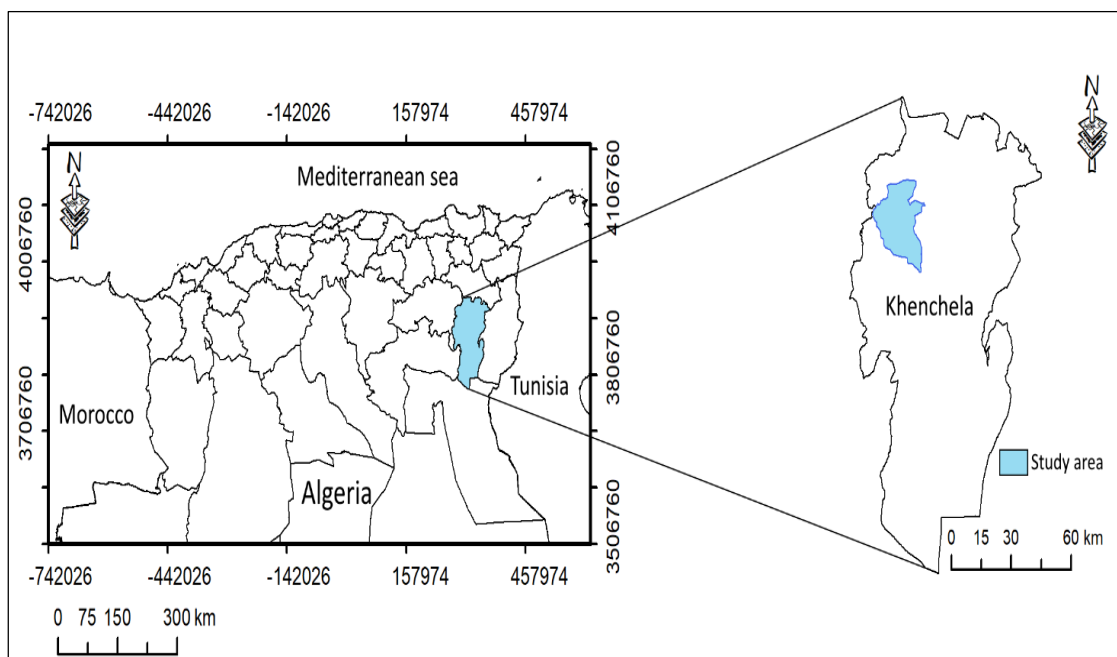


Figure1.Présentation géographique de la zone d'étude

I.2.3 La population

Densité de population et répartition spatiale

En 2010, selon l'annuaire statistique DPSI de Khenchela commune de Bouhmama était estimée à 11 220 habitants. Relève de municipalités de 409 km², la densité moyenne sera de l'ordre de 27,43 habitants au km², inférieure à la densité moyenne de Wilaya, qui est d'environ 42 habitants par km² 2010 (DPSI 2010). (Djelloul M & Saidi M., 2017).

Tableau 1: Répartition de la population par variance. (DPSI 2016) (Babana Ch., Sebaa H, 2010)

Population totale	ACL		Zones éparses	
	Nombre	%	Nombre	%
12 580	8971	71,3	3586	51

ACL : Agglomérations Chef-lieu, AS : Agglomérations sec

Tableau 2: Répartition des effectifs par secteur au 31 décembre 2008. (Djelloul et Saidi, 2017)

Secteur	Agriculture	BTP	Industrie	Autres	Total
Nombre	39,635	21,856	7,548	38,803	107,840
%	36,7	20,3	7	36	100

Composition de la population par âge

L'analyse de la structure par âge de la population permet de mettre en évidence Composants pour connaître et comprendre la démographie Interactions entre les différents groupes d'âge au fil du temps. En comparaison, le groupe d'âge des moins de 6 ans (âge préscolaire) représente une proportion importante.

Population totale reflétant un taux de natalité élevé. Ce groupe ne représente qu'environ 13% de la population totale.

Le groupe des 16-25 ans représente la population d'âge scolaire, qui représente environ un quart de la population.

Population totale. Groupe 16-59 : C'est le plus grand groupe. Ce groupe montre la population J'y travaille. Il reflète le potentiel d'un actif à participer à la production de biens et de services.

Le groupe d'âge 60+ est le groupe le moins représentatif et non représentatif

Un peu plus de 7%.**(Services techniques, Bouhmama, 2016).**

I.2.4. Situation hydrologique

Le bassin versant de l'Oued Mellagou, qui appartient au 06 ème grand bassin versant hydrologique de Chott Melrhir, de type endoréique, couvre 560 765 kilomètres carrés sur le coté droit du cours inférieur et de 508 kilomètres carrés depuis le cours supérieur. Le flux est approximativement nord-est à sud-ouest.

Le bassin versant étendu recueille les eaux de ruissellement qui atteignent les flancs des pentes. **(Aissa, 2019).**

La plupart des oueds étudiés dans la région ne sont pas permanents et sont tous des affluents d'un grand oued appelé «Oued Mellagou», formé par la rencontre des 02 bras et dont la source se situe au niveau de Djebel Chelia et son le point culminant est 2350 m, parcourant la dite plaine alluviale sur une quarantaine kilomètres pour se jeter dans l'Oued Al Abiod avant que ce dernier ne rejoigne l'Oued El Arabe. Sachant que celui-ci termine son parcours dans le chott Melrhir.

Affluent de la rivière l'Oued El Arabe, le Mellagou est né de la conjonction de l'Oued Amar venant du Djebel Aurès, l'Oued Timarrooden et l'Oued Tafrennt. Ce dernier descend des pentes Nord du Chélia en ouvrant vers l'Ouest et le Nord de bonnes percées pour diverses voies de communication.

(Bouali et Berkane,2015)

Les principales caractéristique topologique du bassin versant, issues de l'analyse réseau hydrographique du bassin versent et établies à partir des cartes d'Etat-major au 1/50 000 pour le site, est regroupée dans le tableau (**Aissat, 2019**)

Tableau 3: paramètres topologiques du bassin de Mellagou (Aissat ,2019)

Désignation	BV
Densité de drainage (km/km ²)	0,310
Fréquence de thalweg d'ordre1 (km ² -)	0,342
Coefficient de torrentialité	0,906
Rapport de longueur	1,99
Rapport de confluence	4,28

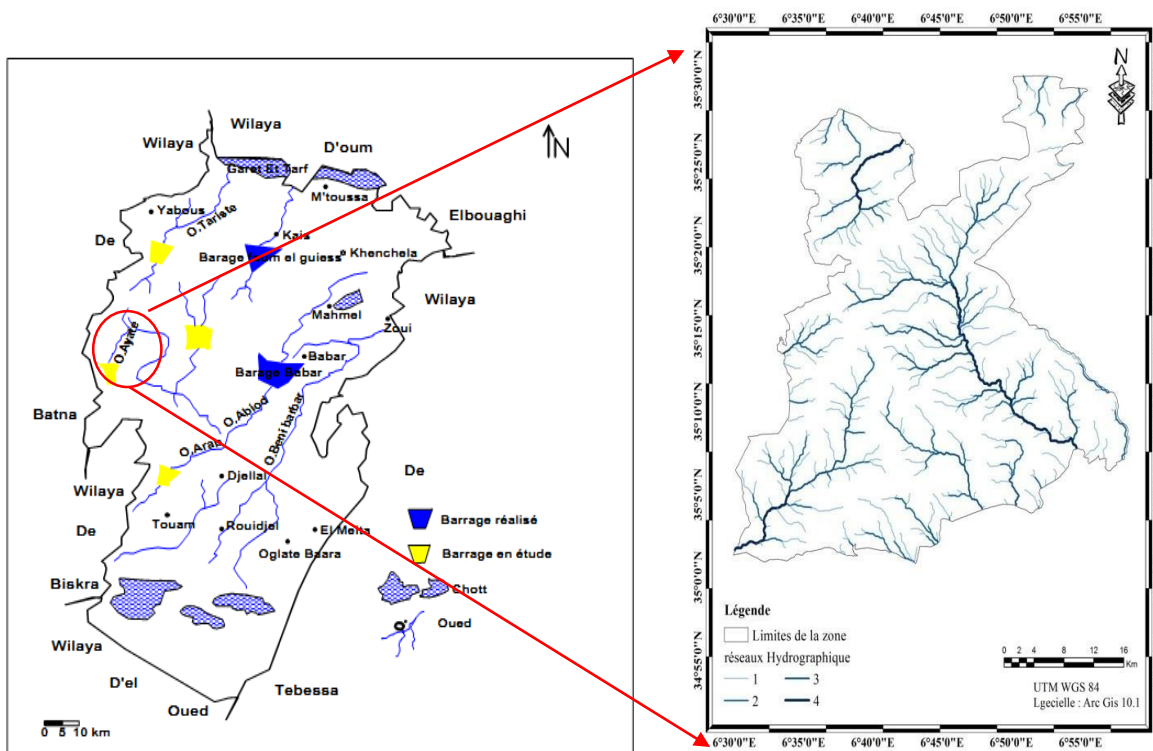


Figure 2. Réseau hydrographique de bassin versant d'Oued Mellagou (Sias et Nezzar ,2017)

I.2.5 La couverture végétale

Le patrimoine forestier de la commune de Bouhmama se caractérise par la diversité biologique de son couvert végétal (espaces forestières, plantes médicinales aromatiques).

Étant les plus méridionaux de toute l'Algérie, les massifs forestiers de la Wilaya de Khenchela constituent une barrière au désert.

Les espèces telles que le cèdre de Bouhmama, le pin des Beni-Melloul et le frêne de montagne des Aurès constituent des phénotypes qu'il faut protéger et développer, (Boualiet Berkane, 2015)

Cette richesse forestière est concentrée dans la plaine de Mellagou ; car elle représente 61.37% de la surface totale du bassin superficiel forestière de 26194.16 Ha

Le bassin versant d'Oued Mellagou englobant un cortège floristique diversifié composé de variétés précieuses telles que : le cèdre, le pin d'Alep, le chêne vert.

Les terres forestières occupent la majorité de superficie totale de bassin versant. Ces forêts sont administrées par trois circonscriptions forestières :

Celle de Kais qui gère la partie Est de sous BV formées les forêts dominées de Ben-Oudjana avec une superficie totale de 12105 Ha elle gère également dans la commune de Chélia, une superficie de 2134 Ha et dans Bouhmama une superficie de 977 Ha. **(Subdivision Agriculture Bouhmama, 2018)**

La partie Ouest de sous B V est géré par la circonscription de Bouhmama elle couvre le massif de Chélia et les forêts de Beni-Imloul avec une superficie de 15119 Ha,

Une partie des forêts d'Ouled Yagoub est gérée par la circonscription d'El Hamma, elle occupe une superficie de 9983.08 Ha. **(Conservation des forêts, 2018)**

Il est à noter aussi l'existence des espèces herbacées pérennes telle que le Romarin, la Globulaire, l'Alfa, le Genet, le Diss, le Faux Alfa, l'Armoise blanche et rouge ainsi que les espèces annuelle. **(Babana et Sebaa, 2018)**

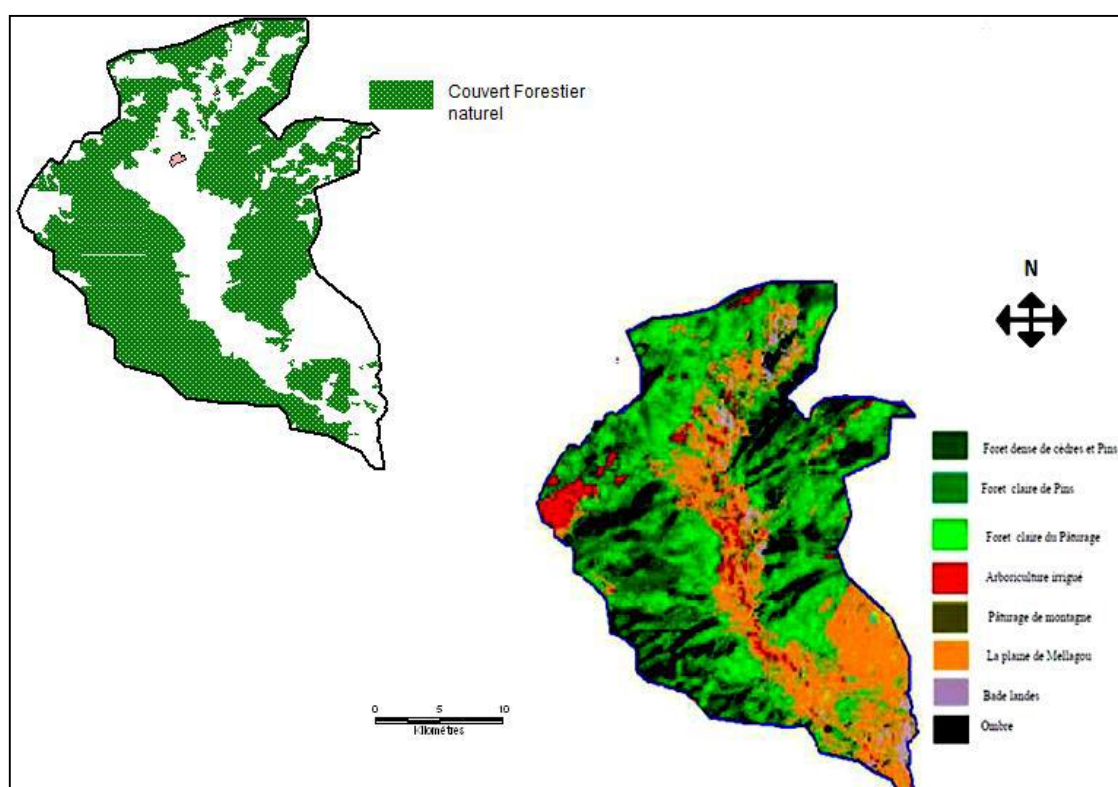


Figure 3.Le couvert forestier naturel de bassin versant d'Oued Mellagou. **(Babana et Sebaa, 2018)**

I.2.6 L'agriculture

Cette agriculture semi-intensive en sec est, essentiellement, localisée dans la vallée d'Oued Mellagou et sur les piémonts et bas piémonts des reliefs la bordant. Les surfaces réservées à la céréaliculture et aux légumes sont insignifiantes, elles sont respectivement de 14 et 40ha (**Subdivision agriculture Bouhmama, 2010**).

Tandis que les terres occupées par les forêts caractérisées par une affectation mixte, de protection et de production représentent, une ration très importante, car il atteint plus de 64 % de la surface totale communale avec 26194 ha. Quant aux pacages et parcours, ils occupent près de 5993 ha soit 14,64 % de la superficie totale de la commune. Plus ou moins conservées, les zones alfatières occupent près de 3211 ha (**Subdivision agriculture Bouhmama, 2010**).

Au niveau communal, la couverture végétale est bien développée et étendue sur l'ensemble du territoire où le patrimoine forestier, la nappe alfatière et les parcours occupent plus de 35398 ha et s'accaparent de près de 86,51 % de la commune et se présentent dans un état de conservation assez bien sauf dans certaines parties touchées par l'érosion, les incendies, le surpâturage ou bien les pratiques agricoles locales inadaptées (**Bouali et Berkane, 2015**).

I.2.7 Situation pédologique

La région d'étude est caractérisée par un sol brun calcaire : ce type de sol domine

Généralement la plaine de Mellagou est caractérisée par une texture argileuse - limoneuse - sableuse, le taux d'argile augmente avec la profondeur.

Le PH varie entre 7.4 à 7.5 (légèrement alcalin). La capacité au champ pour une profondeur de 0 à 1 m est de 350 mm ou 250 mm, facilement utilisable pour la plante.

La conductivité hydraulique et la quantité d'infiltration sont élevées dans les premiers 90 cm.

Au-delà de la 1 m de profondeur ces valeurs commencent à diminuer. (**Siad et Djelloul, 2017**)

Le sol a tendance, donc, à très peu d'érosion s'il y a irrigation. Les horizons plus profonds que 90 cm sont des corps de renflement lorsque de grande quantité d'eau de drainage sont nécessaire suite à la mauvaise quantité d'eau d'irrigation.

Le sol est très riche en calcaire avec un maximum à la surface. Lors de dessèchement avec le climat local donnent des pores importants (Ouadi et Khelifi, 1992)

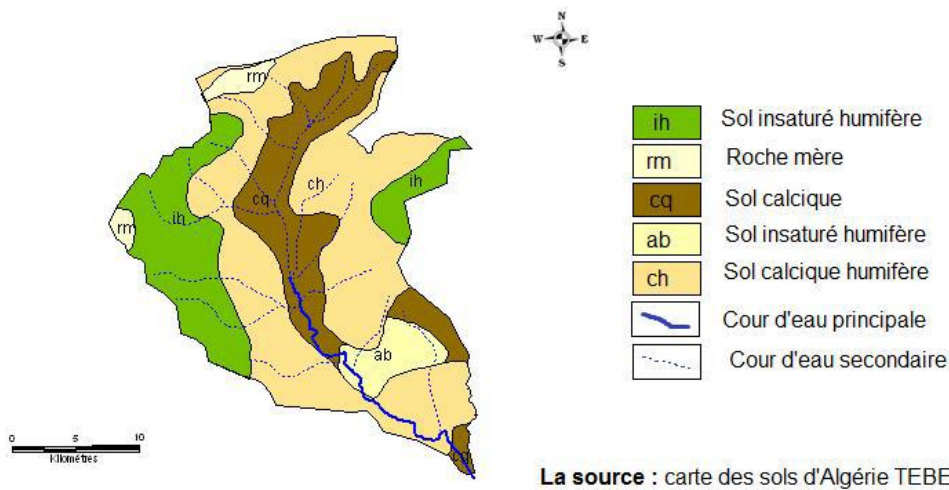


Figure 4. la répartition des unités de sols à travers la zone d'étude (Houbib , 2013)

I.2.8 Situation de géologie régionale

La géologie de la région est caractérisée par des séries sédimentaires, principalement du jurassique et du créacé. Généralement, il s'agit d'alternance de marnes, calcaires marneux et calcaires.

La zone d'étude est fortement dominée par le faciès marneux. Toutefois, les bancs calcaire sont notables et forment d'excellent horizons-repère, permettent la lecture directe des différentes structures géologiques.

Sur le plan régional, les grandes structures géologiques sont alignées dans la direction NE-SW. Les montagnes, allongées suivant la même direction, correspondant aux zones de charnière des grands plis anticlinaux. Mais aussi à des synclinaux (inversion de relief).

Les plis ont généralement des longueurs d'onde de quelques kilomètres, ce qui cohérent avec l'épaisseur des sédiments au-dessus du niveau de décollement régional qui est localisé dans les horizons évaporitiques (sel, gypse) du trias.

Le gypse triasique, qui n'affleure qui très rarement se présente sous forme sous la forme de masses intrusives, discordantes par rapport à l'encaissant d'âge créacé. De même les évaporites par des structures géologiques irrégulières, qui contrarient localement la discontinuité des linéaires NE-SW4. (Aissat, 2019)

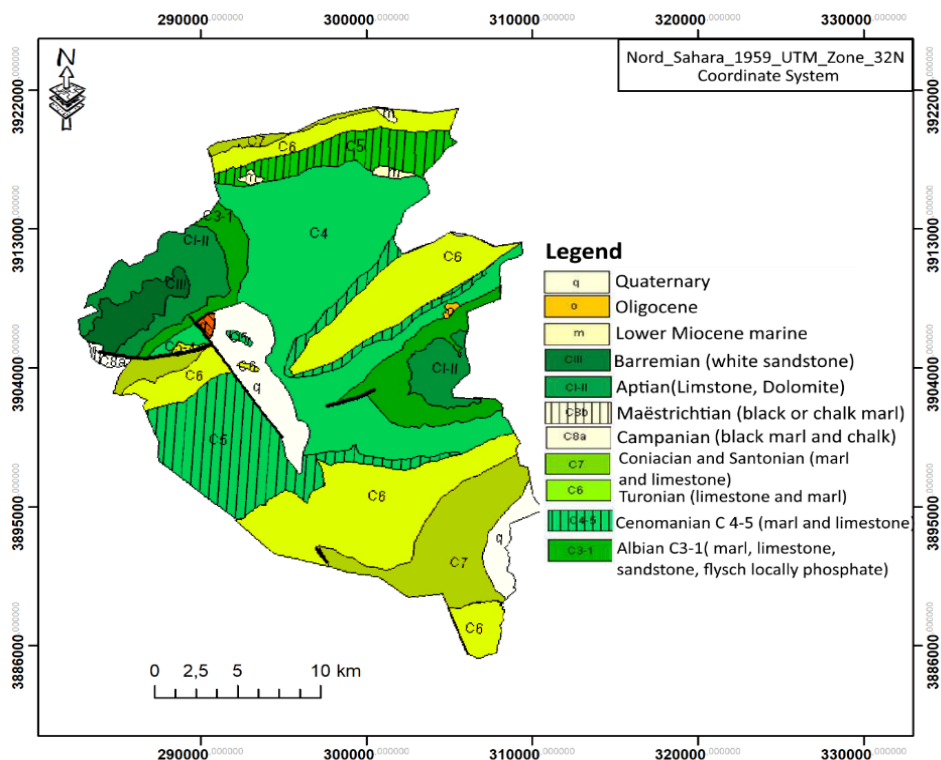


Figure 5 . Carte géologique de bassin versant d’oued Mellagou (Laffite, 1939 ; in Houbib, 2013)

I.2.9 Etude climatologique

La Wilaya de kenchera est caractérisée par trois zones climatiques.

- La région montagneuse centrale a des hivers très rigoureux et des étés doux.
- Les prairies du sud du désert du Sahara ont des hivers doux et des étés chauds et secs.
- Les hautes terres du nord ont des hivers très froids et des étés secs. Cette diversité climatique a créé les pentes naturelles variées de Wilaya.

importante destination touristique. Pour. température:

- Moyenne de toutes les valeurs minimales : - 2 °C.
- Maximum moyen : +24 °C.
- Minimum absolu observé : - 4,8 °C.
- Maximum absolu observé : +42°C.

Le maximum absolu observé en été est très élevé,

L'évaporation est importante pendant cette période. B. Précipitations :

Montagnes du Nord-Ouest (DJ. Cheria et DJ. Aidel) reçoit 700-1200

La pluviométrie annuelle est de mm, et dans le sud (région du Sahara) la pluviométrie annuelle est inférieure à 200 mm.

(Ouédo el Meïta). Le reste du territoire Wilaya se situe entre 200 et 600 Isohyet

mm (précipitations annuelles). Nous savons que mars est le mois le plus humide (le mois le plus humide).

Juillet est le mois le plus sec (le moins de précipitations). En général, les précipitations printanières sont en moyenne de 60,33 mm.

Ceux d'automne, moyenne 43,67 mm. (**Bouali et Berkane,2015**).



Partie pratique
Matériel et méthodes

Pour réaliser notre étude, nous avons choisi 15 points d'eau (puits et forages) bien répartis sur la vallée de Mellagou (figure.6)

Deux grands aquifères sont mis en évidence :

Un aquifère peu profond présent dans les formations alluviales du Quaternaire, sous des argiles et des marnes parfois gypseuses, recouvertes d'argiles et de marnes parfois gypseuses.

Un aquifère profond du Crétacé, formé principalement par des calcaires fracturés qui affleurent sur

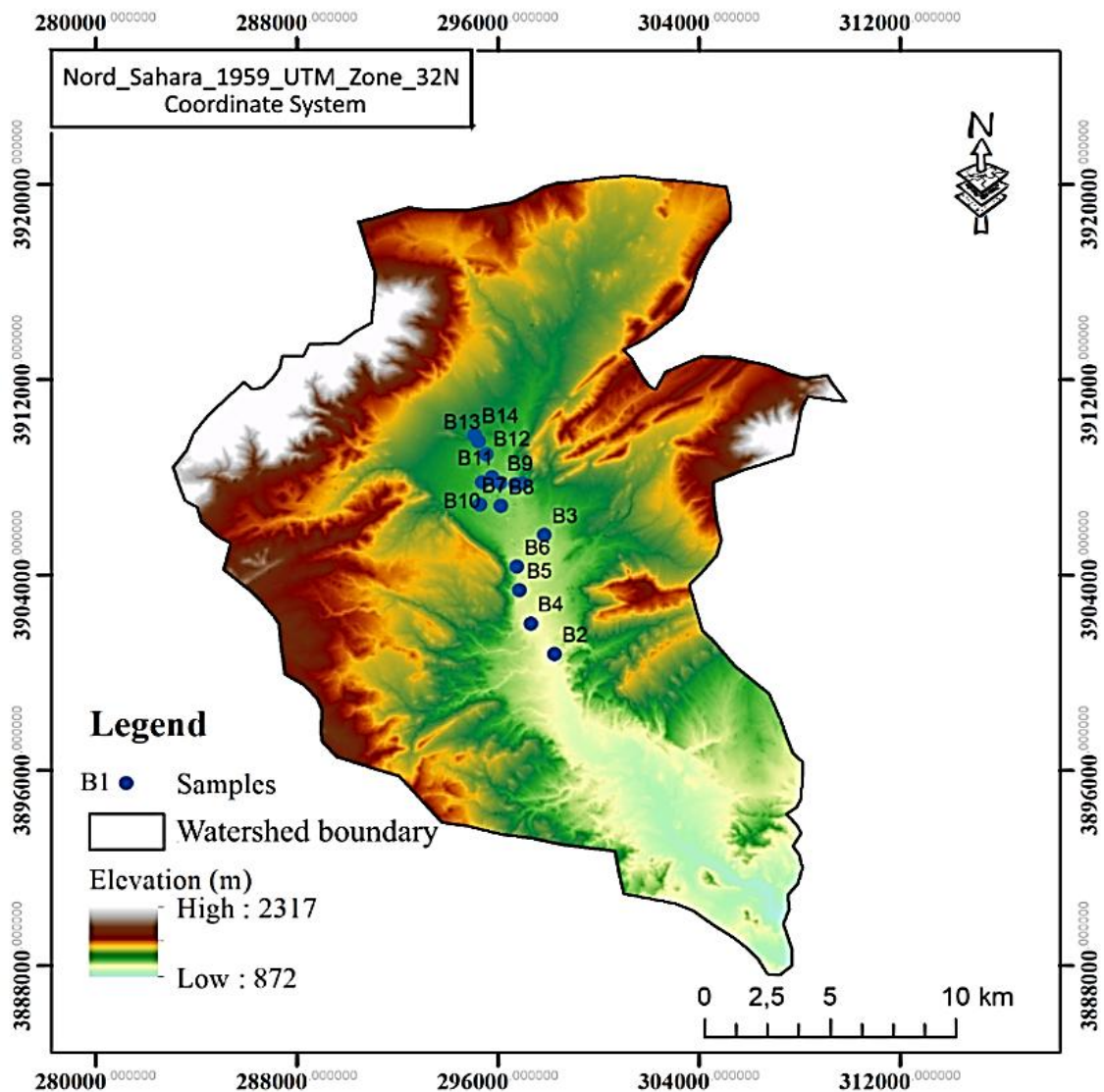


Figure 6. Carte d'inventaire de la zone d'étude, **Février 2023**

I.1 Echantillonnage et méthodes analytiques

Le suivi saisonnier des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'aquifère de Mellagou a été réalisé pendant la période humide de l'année 2023. Les prélèvements d'eau ont concerné 15 forages, bien répartis dans l'aquifère.

Les paramètres physiques : température (T°C), pH, conductivité électrique (CE), et TDS, ont été mesurés in situ à l'aide d'un multiparamètre de marque YSI (Pro DSS).

L'analyse chimique des ions majeurs de l'eau a été réalisée au laboratoire de l'Algérienne des Eaux.

Les ions HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, et Cl⁻ ont été mesurés par la méthode de titrage, tandis que les autres ions NO₃⁻, SO₄²⁻, K⁺ et Na⁺ ont été mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre UV.

La réalisation des cartes a été faite avec le logiciel ARC GIS 10.8 (ESRI).

La modélisation hydrochimique a été réalisée avec le logiciel DIAGRAMME, version 6.77.

Le calcul des indices de saturation SI a été effectué avec le logiciel PHREEQC 3.7.

Les statistiques descriptives ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT 2015.

II.2.Le mode opératoire

II. 2. 1. Méthode de titration

Une titration consiste à déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution par une réaction de neutralisation de cette espèce : une solution de concentration connue, appelée titrant, est utilisée pour neutraliser une espèce chimique, appelée analyte, contenue dans la solution à titrer. Le point de neutralisation, ou équivalence, est connu via la mesure continue d'un paramètre directement lié à cette réaction de neutralisation (ex : changement de couleur, pH, potentiométrie). (Rodier, 2005). Il s'agit du moment où le titrant et l'analyte ont réagi dans des proportions stoechiométriques : la quantité de titrant utilisée renseigne alors sur la quantité d'analyte présent dans l'échantillon.(**Rodier,1952**).

La méthode de titrage la plus utilisée est le titrage volumétrique. Elle consiste à ajouter graduellement une solution de réactif titrant (avec une concentration volumique connue) afin de « neutraliser » l'espèce à déterminer (à titrer) dans la solution inconnue (appelée analyte).

Il existe d'autres types de titrage :

Le titrage gravimétrique : ce titrage diffère du titrage volumétrique en ce que la quantité de solution ajoutée pour compléter la réaction est mesurée en masse plutôt qu'en volume ;

le titrage coulométrique : le réactif titrant est généré par voie électrolytique plutôt que d'être ajouté comme solution standard;

La titration immunométrique : ce titrage fait varier, à volume constant, la concentration d'analyte à titrer (+ou- dilué préalablement) tandis que l'agent titrant (anticorps marqué) est en concentration constante.

II .3. Spectrophotomètre UV

Spectrophotomètre UV/Vis double faisceau compatible avec de nombreuses applications, notamment pour les laboratoires pharmaceutiques, biochimiques, cliniques et de recherche générale, le développement de nouveaux matériaux et le contrôle qualité.

Photométrie standard : absorption, transmission et concentration

Analyse quantitative et cinétique, balayage sur plusieurs longueurs d'onde et balayage du spectre

Analyse de l'ADN/ARN et des protéines

Commande interne par clavier et par ordinateur (en option)

Logiciel UV-Vis Analyst pour un traitement des données plus efficace et une collecte plus importante de données

II.4. Résultats et discussions

Le tableau suivant montre les principaux éléments mesurés des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

Tableau 4: les principaux éléments mesurés des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

Paramètre	Min	Max	Moyenn e
pH	6.12	7.5	7.03
T(°C)	16.7	22.5	19.3
EC (μ S/cm)	740	3210	852.6
Ca ⁺ (meq/l)	7.95	16.08	11.82
Na ⁺ (meq/l)	3.14	30.87	9.68
Mg ⁺ (meq/l)	4.83	10.64	6.15
K ⁺ (meq/l)	0.04	0.29	0.14
Cl ⁻ (meq/l)	2.29	31.60	10.4
HCO ₃ (me q/l)	3.38	10.25	6.60

SO ₄ ⁻ (meq/l)	7.11	15.94	10.45
---	------	-------	-------

II. 4. 1. Les paramètres physiques

- Les valeurs des températures mesurées sont voisines de celle de l'air. Les mesures sont effectuées durant trois jours. Les valeurs de températures ne représentent aucun risque de pollution (pollution thermique).
- Les valeurs du pH mesurées sont proches de la neutralité.
- Les valeurs de la conductivité électrique indiquent une minéralisation faible à moyenne.

Les eaux faiblement minéralisées correspondent à l'aquifère quaternaire superficiel.

Les eaux moyennement minéralisées correspondent à l'aquifère Crétacé profond.

II.4.2.Paramètres chimiques

II.4.2 .1.Diagramme de Piper et Stiff (faciès chimique)

L'analyse du diagramme de Piper nous a permis de mettre en évidence les différents faciès chimiques de l'ensemble de l'échantillon. **(Piper, 1944).**

L'analyse des paramètres chimiques montre que les eaux de l'aquifère plio-quaternaire sont caractérisées par l'abondance des ions (HCO₃⁻, Ca²⁺, Na⁺, Cl⁻).

Le traçage des ions majeurs des eaux souterraines sur le diagramme de Piper pour la période humide de l'année 2022, (Figure n.7) a permis d'identifier trois grands types de faciès chimiques :

-Les eaux chlorurées sodiques : D'après **(Debièche, 2002)** : L'existence de ces deux éléments Na et Cl est liée à la dissolution des formations évaporitiques riches en halite.

-Les eaux sulfatées calciques et les eaux bicarbonatées calciques sont représentées par la majorité des points d'eau, (Figure n.7)

Le diagramme de Stiff nous permet d'obtenir une géométrie polygonale (Figure n.7) caractéristique d'une famille d'eau donnée. Les données d'analyse des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical initial. Les cations sont représentés à gauche (Na⁺ + K⁺, Ca²⁺, et Mg²⁺), et les anions à droite (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) **(Stiff, 1951).**

L'interprétation du diagramme de Stiff obtenu à partir des échantillons d'eau a permis de diviser les eaux souterraines selon leur minéralisation en 2 groupes présentant :

- Minéralisation moyenne : forages profonds en grès bicarbonaté.
- Minéralisation faible : puits et forages superficiels.

Cette différenciation de la minéralisation a été étudiée par **Ligban et al. 2009**. Elle pourrait refléter un temps de résidence plus long pour l'eau des forages profonds par rapport à l'eau des forages plus superficiels.

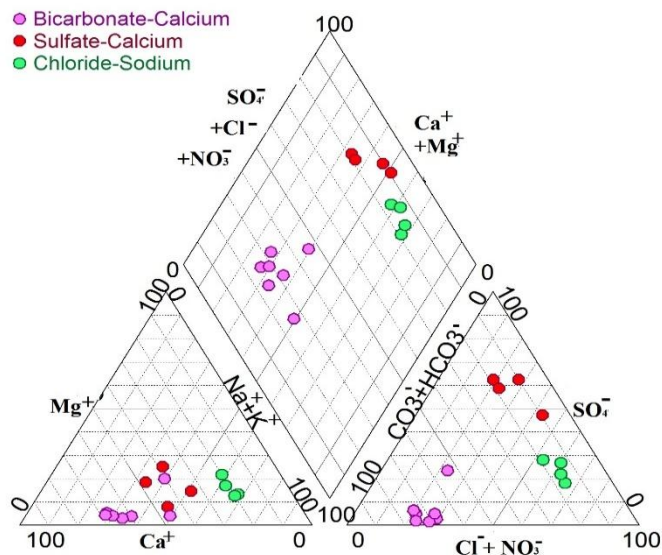


Figure 7. Représentation graphique de Piper des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

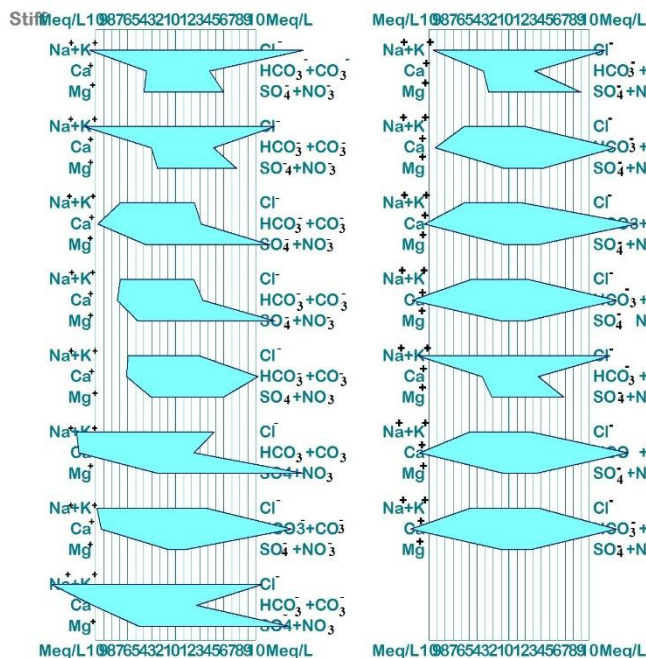


Figure 8. Représentation graphique de Stiff des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

II.4.2.2.. Diagramme de Schoeller

Dans la représentation de Schoeller (Figure n.8) on remarque que les lignes droites se croisent, ce qui traduit que les eaux sont d'origines différentes ; même s'il y a des eaux qui ont le même faciès chimique (Schoeller, 1977).

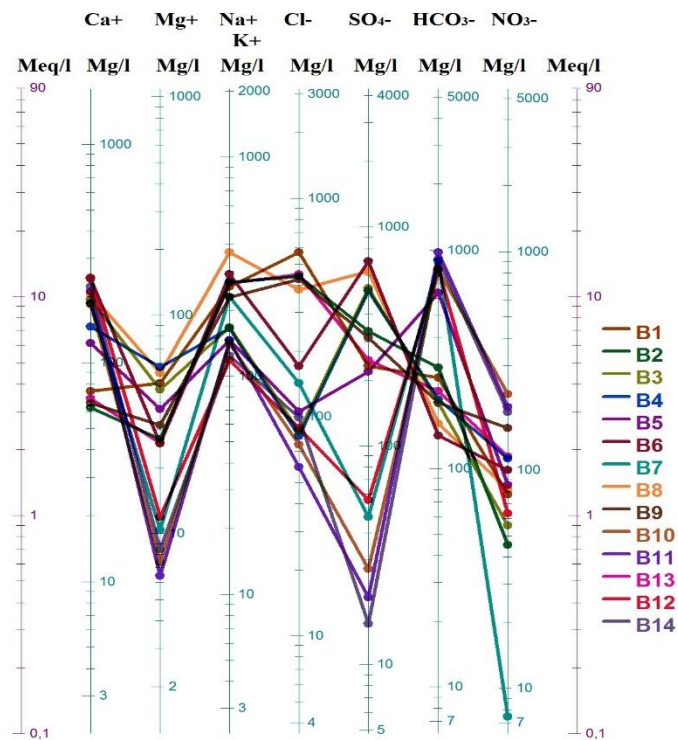


Figure 9. Représentation graphique de Scholler des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

II.4.2.3 Le diagramme de Stabler

A la lumière de la figure n.9 Le diagramme de Stabler est établi à partir des ions HCO_3^- .

On remarque que les teneurs en bicarbonates, calcium, et chlorure, sont élevées mais celles en sulfates, magnésium, sodium, sont les plus faibles.

On constate que le taux d'alcalinité est également élevé.

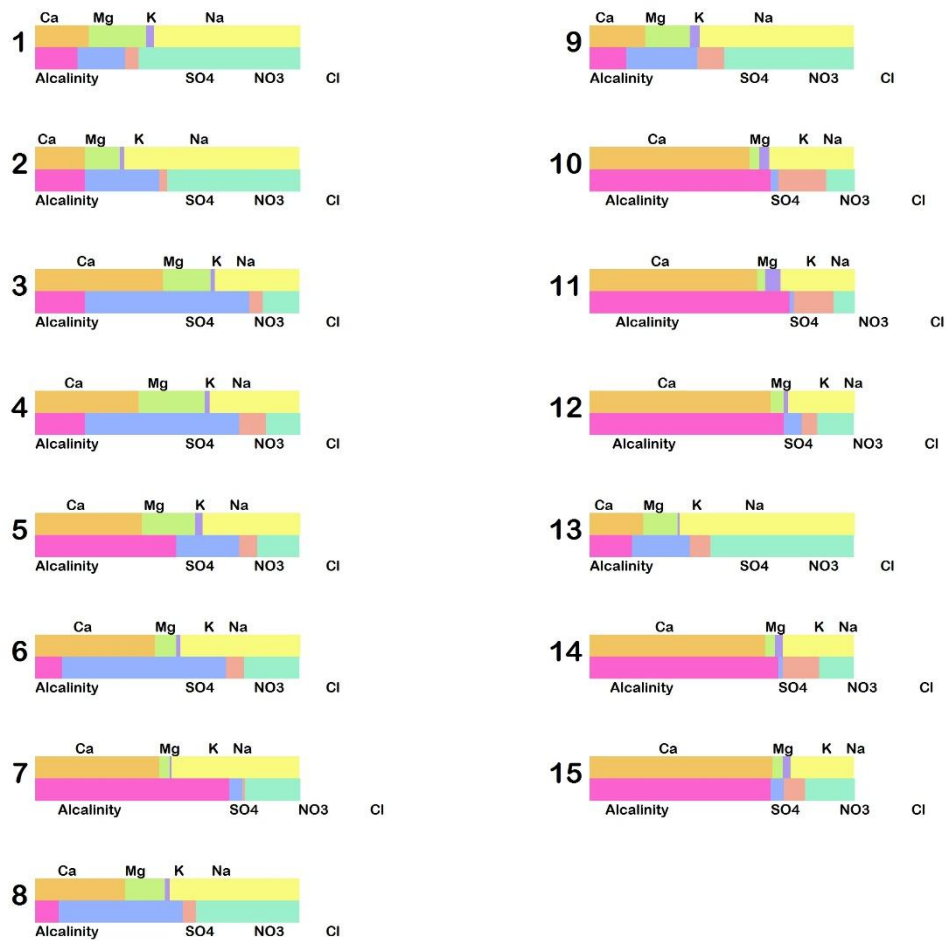


Figure 10. Représentation graphique de Stabler des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

II.4.2.4. Le diagramme de Wilcox

Wilcox en 1948 a établi ce diagramme utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise la conductivité électrique (EC) ou la charge totale dissoute (TDS).

Selon **Wilcox (1948)**, les eaux sont classées à partir de leur proportion de sodium en fonction de la conductivité électrique.

On constate que les eaux souterraines de l'aquifère ont une teneur en sodium qui varie entre 27 et 70%. On constate donc que ces eaux ainsi que les sols du bassin versant de la zone d'étude présentent un risque de salinisation.

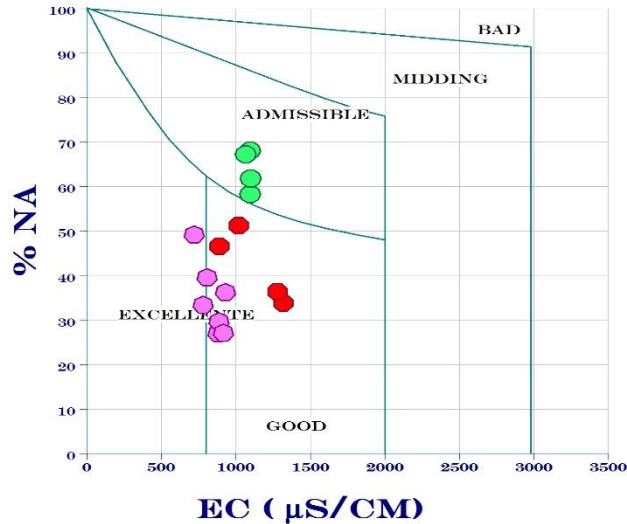


Figure 11. Variation du pourcentage de sodium en fonction de la conductivité électrique des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

III.1. Origine de la minéralisation des eaux de la nappe de Mellagou

III.1.1. Relation binaire

Nous avons représenté les éléments majeurs en fonction du chlorure pour comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, (Figure 12). Le chlorure est un élément conservé, n'anticipe pas les interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité de l'eau et est un traceur du mélange (**Fidelibus & Tulipano, 1996**).

Le graphe Na^+ vs Cl^- montre que la majorité des points sont en dessous de la ligne de mélange. Puisque la teneur en Na^+ devrait équilibrer la teneur en Cl^- . Le déficit en Na^+ s'explique par le phénomène d'échange de bases ioniques entre l'eau et l'aquifère et résultant en une adsorption de Na^+ et une libération de Ca^{2+} . (Figure 12a). Ces eaux sont contrôlées principalement par les réactions d'échange cationique entre l'eau et les argiles rouges pontiennes entraînant la fixation du sodium et la libération du calcium (**Houha, 2007 ; Gouaidia et al., 2012 ; Djenba et al., 2015**).

Les diagrammes Ca^{2+} vs. Cl^- (Figure 12c) et Mg^{2+} vs. Cl^- (Figure b) montrent que les points sont souvent en dessous de la ligne de mélange. Cet enrichissement en Cl^- observé est rapproché des activités anthropiques. (Agriculture et déchets ménagers), (**Drouiche et al., 2022**).

Le rapport SO_4^{2-} vs Cl^- (Figure 12d) montre que le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ est en faveur des sulfates. On peut suggérer que cette augmentation du rapport est due au lessivage des couches évaporées du substratum géologique, sans oublier la pollution par le retour des eaux d'irrigation chargées en engrais (**Drouiche et al., 2022 ; Panpan et al., 2019**).

Le rapport HCO_3^- vs Cl^- (Figure 12e) montre une distribution hétérogène des bicarbonates due à la variation du pH et aux échanges gazeux avec l'atmosphère. L'excès de bicarbonate est mis en évidence par la dissolution des formations bicarbonatées (**Zahi et al., 2021 ; Bouziane & Labadi, 2009**).

La corrélation Cl^- vs Na^+ montre un premier groupe, avec des points en dessous de la ligne, influencé par la dissolution de l'halite et un second groupe présente un déficit en sodium (Figure 12 f). Le déficit en Na^+ est plus ou moins équilibré par un enrichissement en Ca^{2+} . Cette tendance suggère des réactions d'échange de bases par la matrice argileuse de l'aquifère superficiel, qui peut agir comme un échangeur de cations (**Capaccioni et al., 2005 ; Stigter et al., 2006**).

Le rapport HCO_3^- vs Cl^- (Figure 12e) montre une distribution hétérogène des bicarbonates due à la variation du pH et aux échanges gazeux avec l'atmosphère. L'excès de bicarbonate est mis en évidence par la dissolution des formations bicarbonatées (**Zahi, 2014 ; Bouziane & Labadi, 2009**).

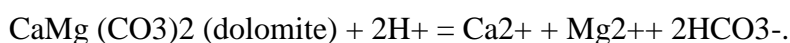
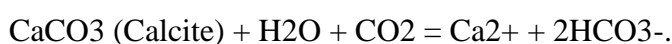
La corrélation Cl^- vs Na^+ montre un premier groupe, avec des points en dessous de la ligne, influencé par la dissolution de l'halite et un second groupe présente un déficit en sodium (Figure 12f). Le déficit en Na^+ est plus ou moins équilibré par un enrichissement en Ca^{2+} . Cette tendance suggère des réactions d'échange de bases par la matrice argileuse de l'aquifère superficiel, qui peut agir comme un échangeur de cations (**Capaccioni et al., 2005 ; Stigter et al., 2006**).

Le rapport Ca^{2+} vs HCO_3^- (Figure 5g) montre que la majorité des points d'eau se situent en dessous de la ligne et que le rapport Ca/HCO_3 est en faveur des bicarbonates. On peut suggérer que cette augmentation du ratio est due au lessivage des formations carbonatées (**Berkani et al., 2016**).

Le diagramme (Ca^{2+} vs SO_4^{2-}), (Figure 12h) ; montre deux groupes de points, un premier groupe où les points s'alignent autour de la ligne de pente influencée par la dissolution du gypse et/ou de l'anhydrite. Un deuxième groupe formé par des points d'eau plus minéralisés qui montrent un excès de Ca^{2+} qui pourrait être dû à un processus de dissolution des formations calcaires et des réactions d'échange de base (**Djenba et al., 2015 ; Zahi et al., 2021**).

L'examen de (la figure 12i) montre que la majorité des points au-dessus de la ligne d'équilibre s'explique d'une part par la présence d'autres évaporites d'origine alcaline le gypse qui s'est dissous dans l'eau. D'autre part, l'échange de base est dû à un excès de Ca^{2+} et de Mg^{2+} provenant des formations carbonatées. Ceci explique que l'eau soit en équilibre principalement avec la dolomie et l'aragonite (**Drouiche et al., 2022 ; Gouaidia et al., 2012**).

Garrels & Mackenzie (1971) ont étudié la dissolution de se produit dans des conditions naturelles selon les réactions suivantes :



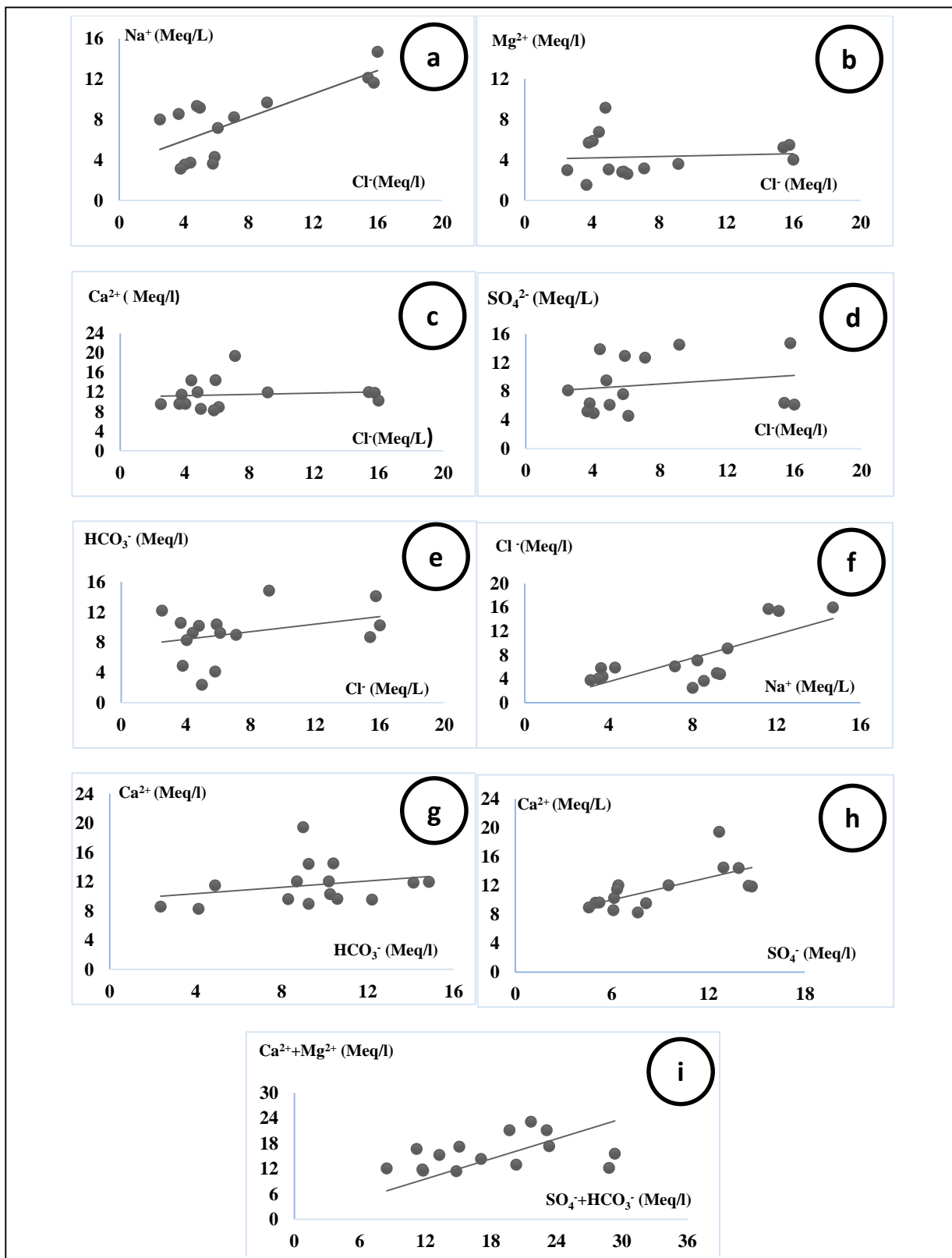


Figure 12. Relations binaires des ions majeurs des eaux souterraines de la vallée de Mellagou, 2023

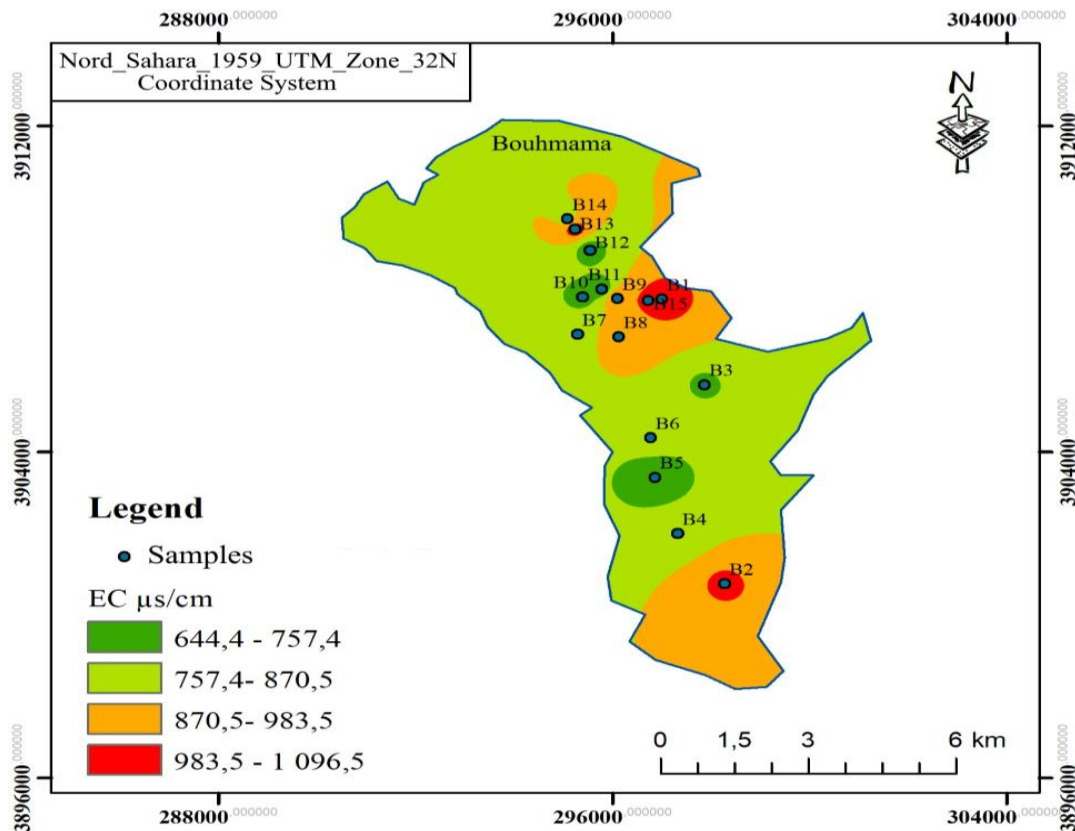


Figure 13. Répartition de la conductivité électrique des eaux souterraines de la plaine de Mellagou

IV.1. Modélisation géochimique

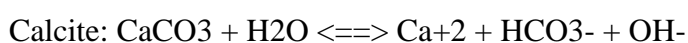
Un modèle simple du logiciel de géochimie PHREEQC est utilisé pour déterminer les indices de saturation des minéraux à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines du plateau de Mellagou.

Les résultats sont présentés dans la figure 13

Une valeur d'IS supérieure à zéro indique que l'eau souterraine est sursaturée en sels minéraux et est donc incapable de dissoudre de nombreux minéraux.

Une telle valeur d'indice reflète la décharge d'eau souterraine d'un aquifère contenant une quantité suffisante de matière minérale avec un temps de résidence suffisant pour atteindre l'équilibre. Néanmoins, la sursaturation peut également être produite par d'autres facteurs qui incluent la dissolution, l'effet des ions communs, l'évaporation, l'augmentation rapide de la température et la concentration de CO₂ dissous.

Selon (Ahoussi et al., 2012) : la présence d'ions carbonate de calcium et d'hydrogène dans l'eau proviendrait de l'altération des carbonates (CaCO₃) selon la formule suivante :



Dolomite: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2 (\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$

Gypse : $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$

Halite : $\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$

Cette réaction explique la dominance du faciès bicarbonate de calcium dans les eaux du bassin. Cela dénote l'existence d'une différenciation chimique entre les aquifères échantillonnés.

Pour tous les échantillons, il y a une sous-saturation en gypse. La dissolution du gypse est confirmée par la relation inversement proportionnelle à l'état sous-saturé. L'hypothèse d'une hydrolyse du gypse pourrait être suggérée à cet effet dans l'aquifère quaternaire.

Les indices de saturation en calcite des eaux (Figure n.13) concernant les minéraux concernés montrent un état de sursaturation pour la plupart des échantillons, ce qui confirme la dissolution des minéraux carbonatés, avec la précipitation de la calcite.

Les indices de saturation en dolomite de la plupart des échantillons sont positifs, ce qui confirme également l'hypothèse de la dissolution de ces minéraux dans l'eau, avec la précipitation de la dolomite.

Les indices de saturation de l'Halite présentent un état de sous-saturation, ce qui confirme l'hypothèse de la dissolution des évaporites (Adimalla et al., 2020 ; Sedrati et al., 2017 ; Zahi, 2014).

D'autre part, le lessivage des sels par les événements pluvieux et le retour des eaux d'irrigation favorisent l'accumulation des sels dans les sols et contribuent à l'acquisition de la minéralisation et à l'augmentation de la charge saline des eaux de cet aquifère.

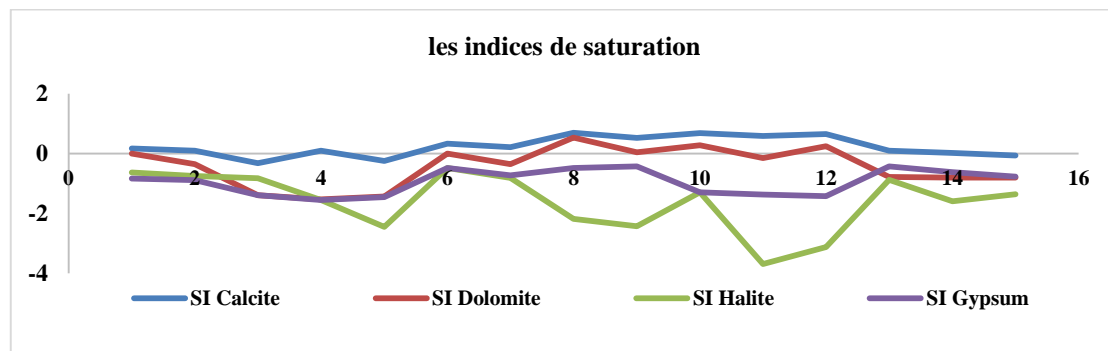


Figure 14 : Les indices de saturation des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

V. Analyse statistique

Les paramètres physico-chimiques des eaux de forages ont été soumis à une analyse en composantes principales (ACP) afin de déterminer les différents processus impliqués dans la minéralisation des

eaux souterraines dans la zone d'étude. Cette analyse définit les principaux facteurs dont la corrélation avec les variables permet d'expliquer les phénomènes en jeu.

Le tableau 1 montre que la conductivité électrique (CE) est significativement corrélée avec les TDS (0,97), avec les chlorures (0,84), avec le Sodium (0,62) et le Potassium (0,59). Le TDS est fortement corrélé avec les chlorures (0,83), le sodium (0,59) et le potassium (0,57). Les sulfates sont fortement corrélés au calcium (0,66). Les chlorures sont fortement corrélés au sodium (0,75) et au potassium (0,82). Les bicarbonates sont fortement corrélés aux sulfates (0,53).

Le tableau 6 montre que l'analyse des résultats de l'ACP a également permis de calculer les valeurs propres et les variances exprimées pour chaque facteur et leur cumul (tableau n.6).

Tableau 5: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la vallée de Mellagou

	T°C	Ph	e25°C	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
T°C	1											
Ph	0,049	1										
e25°C	0,266	-0,377	1									
TDS	0,258	-0,481	0,972	1								
Ca ²⁺	0,042	-0,149	-0,012	0,032	1							
Mg ²⁺	-0,326	0,089	0,044	0,006	0,179	1						
Na ⁺	0,264	-0,089	0,627	0,592	-0,032	-0,027	1					
K ⁺	0,043	-0,082	0,599	0,568	0,012	0,032	0,824	1				
HCO ₃ ⁻	-0,297	-0,347	0,352	0,476	0,252	0,055	0,408	0,479	1			
Cl ⁻	0,447	-0,270	0,840	0,838	0,100	0,080	0,756	0,778	0,339	1		
SO ₄ ²⁻	0,056	-0,365	0,126	0,251	0,668	0,193	0,007	0,000	0,535	0,185	1	
NO ₃ ⁻	-0,304	-0,079	0,109	0,135	-0,140	0,205	0,065	-0,111	0,017	-0,079	-0,068	1

Les chiffres en gras indiquent les corrélations significatives

Le pourcentage des variances exprimées est de 38% pour le facteur 1 ; 19,45% pour le facteur F2. La représentation à l'aide de ces deux facteurs rend compte de manière satisfaisante de la structure des nuages de points.

Tableau 6 : Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux

	F1	F2	F3
Valeur propre	4,560	2,334	1,632

Variabilité (%)	38,003	19,453	13,600
% cumulé	38,003	57,456	71,056

Dans l'espace des variables, l'axe F1 (57,46%) apparaît comme un facteur de minéralisation sur lequel la plupart des éléments (EC, TDS, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻ et NO₃⁻) sont positivement corrélés. Il explique 38% de la variance totale. Notez la corrélation significative entre EC, TDS, Na⁺ et Cl⁻ (Figure n.7).

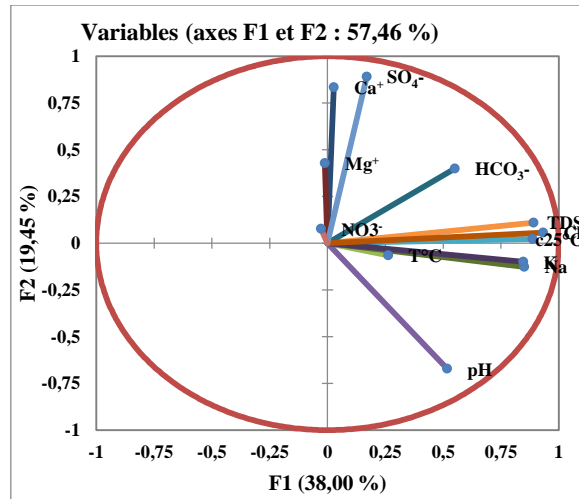


Figure15.Plan factoriel de l'analyse en composantes principales (ACP) : F1- F2.

L'axe factoriel F2, exprime 19,45% de la variance, et montre l'opposition de deux pôles, un pôle chlorure de sodium, sulfate-calcium et magnésium et un pôle bicarbonate-calcium. Ceci permet de distinguer les eaux de l'aquifère superficiel plio-quadernaire à infiltration rapide, riches en HCO₃⁻ et Ca²⁺, et les eaux de l'aquifère profond crétacé riches en Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻ et Mg²⁺, à charge minérale plus élevée, qui sont restées longtemps dans le circuit souterrain et à transit lent. Ceci s'explique par l'aridité du climat, dans cette zone semi-aride, l'augmentation de l'évapotranspiration peut conduire à la salinisation des eaux souterraines. La présence de nitrates est liée à l'hétérogénéité lithologique et aux apports agricoles. (Berkani et al., 2023 ; Drouiche, 2022 ; Li & Zhang, 2008).+

L'ACP montre que le principal facteur influençant la composition des ions majeurs dans le bassin versant est l'augmentation de la minéralité sous l'influence du climat, ce qui est habituel en Afrique du Nord. Le deuxième processus est la contamination par l'azote, ce qui met en évidence l'impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines dans cette région. (Berkani et al., 2023)

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a contribué à la connaissance du fonctionnement hydrogéochimique de l'aquifère de Mellagou en utilisant des traceurs géochimiques et l'analyse en composantes principales.

Cette vallée d'aspect agricole, se trouve dans des conditions semi-arides, où la seule source d'eau est les eaux souterraines. Les eaux de l'aquifère du Plio-Quaternaire de la vallée de Mellagou ont un faciès bicarbonate calcique. Cette eau se concentre en éléments salins gypseux le long de son parcours et se transforme en faciès chlorure de sodium à sulfate de calcium.

Plusieurs processus devraient contrôler la géochimie de cet aquifère. Il s'agit de la dissolution, de la précipitation des sels minéraux, de l'échange cationique, de l'influence du climat qui augmente la minéralité de l'eau, mais aussi de la pollution agricole. Les indices de saturation nous ont permis de savoir que tous les éléments évaporitiques sont sous-saturés.

D'après les valeurs de l'IS de la calcite et de l'IS de la dolomite, la majorité des points échantillonnés sont sursaturés, donc précipitent. L'eau infiltrée au niveau des calcaires du Crétacé de l'aquifère profond est enrichie en calcium et en bicarbonates, le long de son parcours souterrain et en présence de dolomite, et de gypse, halite, il en résulte une eau enrichie principalement en sulfates, sodium et chlorure. Ceci indique clairement un facteur géologique dominant dans l'enrichissement de ces éléments.

L'ACP a confirmé l'hypothèse de l'origine de la minéralisation et de l'acquisition de la charge saline. Ces mécanismes d'évolution hydrochimique sont largement similaires à ceux délimités pour des systèmes aquifères régionaux similaires en Algérie et dans le monde. Ces résultats constitueront une base pour la surveillance et la protection des ressources en eau de ce bassin versant.

Références bibliographiques

1. **Adimalla, N., Dhakate, R., Kasarla, A., & Taloor, A. K.,** 2020. Appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in Central Telangana, India, *Groundwater for Sustainable Development*,100334. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100334>.
2. **Ahoussi, K.E., Loko, S., Adja, M.G, Lasm, T., & Jourda, J.P.,** 2012. Hydrogeochemical study of the fractured aquifers of the Paleoproterozoic basement in the North-East of Ivory Coast: Case of the Bondoukou region, *Afr. Sci*, (08) 51-68. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i1.33>
3. **Aissat, A.,**2019. Etude hydrologique du sous bassin versant de l'OUED MELLAGOU wilaya de KHANCHELA,PP 8-23
4. **Azaza, F.H., Ketata, M., Bouhlila, R., Gueddari, M., & Riberio, L.,** 2011. Hydrogeochemical characteristics and assessment of drinking water quality in Zeuss-Koutine aquifer, southeastern Tunisia, *Environ Monit Assess*, 174:283–298.
5. **Balaji, E., Veeraswamy, G., & Prasad, M.,** 2018. Assessing groundwater hydrochemistry of Atmakur, SPSR Nellore District, Andhra Pradesh, India, *Fresenius Environmental Bulletin*, (27): 7897–7905.
6. **Barbieri, M., Ricolfi, L., Vitale, S., Vincente-Muteto, P., Nigro, A., & Sappa, G.,** 2019. Assessment of groundwater quality in the buffer zone of Limpopo National Park. Gaza Province, Southern Mozambique, *Environ Sci Pollut Res*, 26(1):62–77. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3474-0>.
7. **Bencer, S.,** 2005. Status of water resources in the region of Ain Djacer and estimation of the chemical quality of groundwater (Batna), Magister's thesis Dep. Hydrau. Univ. Batna,PP 143-170.
8. **Berkani, Ch., & Houha, B.,** 2016.Hydro-geochemical Characterization of Water Springs of the Auresregion. (North-eastern Algeria), *J. Mater. Environ. Sci*, (6): 1856-1865.
9. **Berkani, Ch., Boulabeiz, M., Dali, N, Sedrati, A, & Houha, B.,** 2023. Hydrogeochemical modeling of groundwater of the quaternary aquifer in Mellagou valley -Bouhmama- (northeastern Algeria), *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* February 2023, Vol. 18, No. 1, p. 115 – 126; DOI:10.26471/cjees/2023/018/245
10. **Bouali, H., & Berkane, W.,** 2015. Contribution à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine de Mellagou,(Bouhmama N-W Khenchela),PP 6-8-15-19
11. **Bouziane, M.T., & Labadi, A.,** 2009. The Deep Waters of the Biskra Region (Algeria), *European Journal of Scientific Research*, (25)4: 526-537.
12. **Babana, Ch., & Sebaa, Ha.,**2018. Evaluation de qualité des eaux .cas de la plaine Mellagou (Bouhmama,khenchela en Algérien),PP4.
13. **Boukhechem, Ra.,**: agroéconomiste consultant Alger , septembre ,PP10,2010
14. **Capaccioni, B., Didero, M., Paletta, C., & Idero, L.,** 2005. Saline intrusion and refreshing

in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to hydrochemical characteristics of groundwaters, *J. Hydrol.*, (1-16):307

15. **Chang, H., & Bonnette, M.R.**, 2016. Climate change and water-related ecosystem services: impacts of drought in California, USA, *Journal of Climate change and ecosystem services*, 2(12): 1-19, DOI: <https://doi.org/10.1002/ehs2.1254>.
16. **Csete, A.K., Kolcsár, R.A., & Gulyás, Á.**, 2021. Rainwater harvesting potential and vegetation irrigation assessment derived from building data- based hydrological modeling through the case study of Szeged, Hungary, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, August 2021, Vol. 16, No. 2, pp. 469 – 482, DOI:10.26471/cjees/2021/016/192
17. **Debièche, T.H.**, 2002. Evolution of water quality (salinity, nitrogen and heavy metals) under Application to the low plain of the Seybouse, North-East Algeria. D. thesis, University of Franche, pp90-110.
18. **Djenba, S., Boudoukha, A., & Bencer, S.**, 2015. Hydrochemical approach of the superficial aquifer of Ain Djacer. East of Algeria, *Larhyss Journal*, (24): 281-299.
19. **Djelloul, M., & Saidi, M.**, 2017. caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines et son aptitude à l'irrigation , cas de plaine de Mellagou (Bouhmmama,khenchela), PP4-12
20. **Drouiche, A., Fouazi, Z., Debeiche, T.H., Lekoui, A., &Mahdid, S.**, 2022. Assesment of surface water qualité: cas of Jijel region, North-east Algeria, *Arab J Geosci*, (252): 15-23.<https://doi.org/10.1007/s12517-022-09458-9>.
21. **Djelloul, M., & Saidi, M.**, 2017. caractérisation hydro-chimique des eaux souterraines et son aptitude à l'irrigation , cas de plaine de Mellagou (Bouhmmama,khenchela)PP4.
22. **Fathi, M., Elmabrok, L., Osama, A.M., & Abu-Libda, A.**, 2017. Evaluation of groundwater quality and suitability for irrigation purposes in Alagilat area. Libya, *International Journal of Engineering Science Invention*, 6(5):44–50.
23. **Fidelibus, M.D., & Tulipano, L.**, 1996. Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy) », *Proceedings 14th Salt Water Intrusion Meeting. Rapporteur och meddelanden nr 87*. pp: 230-241.
24. **Fletcher, C., Taylor, B., Rambaldi, A., Harman, B., Heyenga, S., Ganegodage, R., Lipkin., & McAllister, R.**, 2013. Costs and coasts: An empirical assessment of physical and institutional climate adaptation pathways, *The National Climate Change Adaptation Research Facility*, Gold Coast, 53 pp.
25. **Gaagai, A., Boudoukha, A., Boumezbeur, A., & Benaabidate, L.**, 2017. Hydrochemical characterization of surface water in the Babar watershed (Algeria) using environmetric

- techniques and time series analysis, *International Journal of River Basin Management*, (3):361–372. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1299157>
- 26. Gaagai, A.; Aouissi, H.A.; Krauklis, A.E.; Burlakovs, J.; Athamena, A.; Zekker, I.; Boudoukha, A.; Benaabidate, L., & Chenchoune, H.,** 2022. Modeling and Risk Analysis of Dam-Break Flooding in a Semi-Arid Montane Watershed: A Case Study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria, *Water* 2022, 14, 767. <https://doi.org/10.3390/w14050767>.
- 27. Garrels, R. M., & Mackenzie, F.,** 1971. Evolution of sedimentary rocks. W. W. Norton & Co., New York. *Journal of Limnology and Oceanography*, 17(1): 1-168
- 28. Ghougali, F.** Biodiversité et conservation des peuplements invertébrés des milieux aquatiques continentaux de la région des Aurès (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid).PP
- 29. Gomo, M., van Tonder, J.G., & Steyl, G.,** 2013. Investigation of the hydrogeochemical processes in an alluvial channel aquifer located in a typical Karoo Basin of Southern Africa, *Environmental Earth Sciences*,(70):227–238, DOI:[10.1007/s12665-012-2118-9](https://doi.org/10.1007/s12665-012-2118-9).
- 30. Gouaidia, L., Guefaïfa, O., Boudoukha, A., Laid, M., & Martin, M.,** 2012. Evaluation of the groundwater salinity used in irrigation and risks of soil degradation: example of the Meskiana plain (North-East Algeria). *Physio-Geo*, 6(1): 141–160. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2632>
- 31. Houbib, H.,** 2013. Multi-criteria analysis of environmental components using geomatic techniques for an integrated development of the Oued Mellagou valley - Bouhmama W. Khenchela. Master. thesis. Univ Hadj Lkhdar, Batna. Pp. 1-23.
- 32. Houha, B.,** 2007. Study of hydrogeochemical and isotopic functioning of Khenchela waters. PhD. thesis, University of Avignon, France. Pp.110-140.
- 33. Houha, B., Kherici, N., S, Kachi., &Valles, V.,** 2016. Hydrochemical differentiation of salinisation process of the water in Endoreic Semi-Arid Basin: Case of Rémila Basin, Alegria, *American Journal of Applied Sciences*, (7) : 891–895.
- 34. Jeff Garçon, M.,** 2020. Spatial extension and modeling of salinization of groundwater resources in the Cul-de-Sac plain, Haiti. PhD thesis, Univ of Liege. pp.70.
- 35. Khemmoudj, K., Bendadouche, H., & Merabet, S.,** 2016. Water resources in a semi-arid region and sustainable development, the case of the Djemila region in North-East Algeria, *Larhyss Journal* (26):249-258.
- 36. Kloppmann, W., Bourhane, A., Schomburgk, S., & Asfirane, F.,** 2011. Salinization of water bodies in France: from observation to diagnosis, Coastal aquifer resources and management, (49):117-129.

37. **Kumar, P., Meena, N.K., Mahajan, A.K., 2019.** Major ion chemistry, catchment weathering and water quality of Renuka Lake, north-west Himalaya, India, *Environmental Earth Sciences*, 78(10):319, <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8315-z>
38. **Lăcătușu, R., Păltineanu, C., Vranceanu, A. &, Lăcătușu, A.R., 2019.** Influence of domestic activity on the quality of groundwater and surface water in the rural built-up area of the southern Romanian Danube Plain – a case study in the Glavacioc catchment, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, Volum 14(2): 323-334. DOI:10.26471/cjees/2019/014/083.
39. **Lafitte, R., 1939.** Structure and relief of the Aures (Algeria). *Bulletin of the Association of French Geographers*. No. 119: pp.34–40.
40. **Lessard, L., 1952.** Geology and water problems in Algeria. T. 1: Elements of Technogeology of the Algerian Dams and some annex works – The Fom- El-Gueiss Dam]. Vol. 1. XIXe international geological conference: pp. 240–260.
41. **Li, S., & Zhang, Q., 2008.** Geochemistry of the upper an River basin, China: 1. Spatial distribution of major ion compositions and their controlling factors, *Appl Geochem*, (23): 3535–3544. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.016>.
42. **Ligban, R., Gone, L.D., Kamagate, B., Saley, M.B., & Biemi, J., 2009.** Hydrogeochemical processes and origin of natural springs in the square degree of Daloa (Central West of Ivory Coast), *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 3(1): 38-47.
43. **Nagaraju, A., Balaji, E., Thejaswi, A., & Sun, L., 2015.** Quality evaluation of groundwater in Mulakalacheruvu area, Chittoor district, Andhra Pradesh, South India based on hydrogeochemistry, *Fresenius Environmental Bulletin*, (24): 4496–4503.
44. **Nistor, M.M., & Man, T.C., 2019.** Water availability variation under climate change in Turkey during 21ST century, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, February 2019, Vol. 14, No.1, p. 19 - 28; DOI:10.26471/cjees/2019/014/054,
45. **Siad, L., & Nezzar, D., 2017.** Etude du processus hydrogéochimique de eaux de plaine de Mellagou-Bouhmama –khenchela PP9.
46. **Panpan, X., Wenwen, F., Hui, Q., & Qiyang, Z., 2019.** Hydrogeochemical characterization and irrigation quality assessment of shallow groundwater in the central-Western Guanzhong basin, China, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, (1492), DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16091492>.
47. **Piper, A.M., 1944.** A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. *Am Geophys Union Transom*, 25: pp.914–923.
48. **Schoeller, H., 1977.** Geochemistry of groundwater. *Groundwater studies an international*

guide for research and practice (Vol. 15, pp. 1–18). Paris: UNESCO.

49. **Sedrati, A., Houha, B., Romanescu, G., & Stoleriu, C.,** 2017. Hydro-Geochemical and Statistical Characterization of Groundwater in The South of Khenchela, El Meita Area (Northeastern Algeria), *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13(2), 333-342. DOI:10.26471/cjees/2018/013/029
50. **Semadeni-Davies, A., Hernibring, C., Svensson, G., & Gustafsson, L.,** 2008. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater, *Journal of Hydrology*, 350: 114-125
51. **Singh, R. D., & Kumar, C. P.,** 2010. Impact of climate change on groundwater resources, In *Proceedings of 2nd National Ground Water Congress 22nd March 2010*.
52. **Stiff, H.A.,** 1951. Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Pattern, *Journal of Petroleum Technology*, 3, 15-17. <https://doi.org/10.2118/951376-G>.
53. **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, *Hydrogeology Journal*, 14(1–2), 79–99. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0396-3>.
54. **Tiri, G. D., Ojoko, E. A., & Aruwayo, A.,** 2014. Growth enhancement support scheme (gess) and the challenges of food security in Nigeria: a review, *Journal of Agricultural and Biological Science*, 9(7): 226-232.
55. **Venkateswaran, S., & VEDIAPPAN, S.,** 2013. Assessment of groundwater quality for irrigation use and evaluate the feasibility zones through geospatial technology in lower Bhavani Sub Basin, Cauvery River, Tamil Nadu, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 180–187.
56. **Wilcox, L.V.,** 1955. Classification and use of irrigation waters. US Dept of Agricul Cir 969, Washington DC.
57. **Zahi, F.,** 2014. Contribution to hydrochemical study of the Fetzara lake sub-watershed (North-East Algeria). Geochemical approach and functioning of soils and waters. PhD thesis, Univ Badji Mokhtar, Annaba, 192p.
58. **Zahi, F., Medjani, F., Djidel, M., & Drouiche, A.,** 2021. Groundwater quality and its suitability for different uses in lower Djendjen Watershed, Northest Algeria, *Asian Journal of Research in Chemistry* 14(3):179–185. <https://doi.org/10.52711/0974-4150.2021.00033>.
59. **Zubair, S., Faridi, T., A., Rana, M., S., Raza, S., A., & Arshad, M.,** 2022. Physicochemical analysis of drinking water for the detection of arsenic from manga mandi Punjab, Pakistan, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* August 2022, Vol. 17, No. 2, pp.

