

Popular Democratic Republic of Algeria
Ministry Of High Education and Scientific Research
Abbes Laghrour University, Khenchela
Faculty of Natural and Life Sciences
Department Of Ecology and Environment



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم البيئة والمحيط

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et environnement

Spécialité : Écologie fondamentale et appliquée

THÈME

*Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux souterraines
du Bassin versant d'oued L'Arab -Khenchela- (NE Algérie)*

Présenté par:

- Boukhalfa Abd Elaziz
- Djemaa Badis
- Moussaoui Abd Elhak

Devant le jury :

Présidente : Mme. Dib Dounia

Encadrant : Mr. Boulabeiz Mahrez

Examinatrice : Mme. Berkani Cherifa

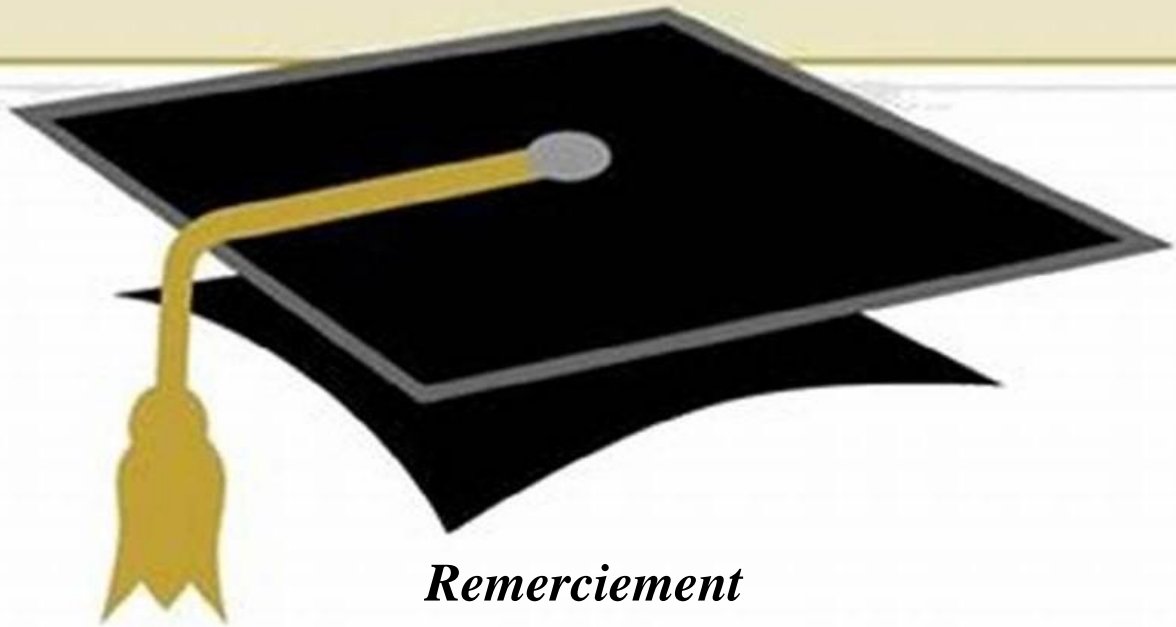
MCA Université de Khenchela

MCA Université de Khenchela

MCB Université de Khenchela

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

*Tout d'abord, nous voudrions remercier **ALAH TAALA** pour sa grâce qu'il nous a accordée pendant notre étude et l'achèvement de ce message. Et que les bénédictions de Dieu soient sur celui après qui il n'y a pas de prophète, **Mohamed**, que les prières et la paix de Dieu soient sur lui, sa famille et ses compagnons.*

*Nous tenons à remercier sincèrement notre encadrant Monsieur **Boulabeiz Mahrez**, pour sa confiance, ses observations, ses conseils, sa disponibilité et sa gentillesse qui n'ont ménagé aucun effort pour faire de cette recherche un succès.*

*Nous remercions tout particulièrement les membres du jury **Mme. Dib Dounia et Mme. Berkani Cherifa** d'avoir accepté d'étudier ce modeste ouvrage. Encore un grand merci à l'Université Abbes Laghrour Khenchela, en particulier à tous les enseignants du Département de Ecologie et Environnement.*

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette mémoire.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail A mes très chers parents Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être
Que dieu vous garder pour nous, longue vie Inchaallah.

À mon frère Chihab et ma sœur aînée et la petite fille gâtée Ilef, et toute la famille Moussaoui et Laabidi.

A mes chère(s) ami(e)s Ridha, Stoufa, Mohamed, Ismail, Badis, Aziz et Chourouk, Imene, Anfal, Leila. A tous mes camarades de résidence universitaire et le promo de 2023 EFA, BAC 2016/2017.

A tous ceux qui m'aiment. A toutes les personnes que j'aime.

HAKOU



Dédicaces

Je présente humblement ce travail comme un cadeau à mes chers parents. Ce voyage n'aurait pas pris fin sans vos grands sacrifices. Je ne saurais exprimer à quel point je vous suis reconnaissant. Que Dieu vous protège.

À mes chers frères Rafiq, Rahim, Dounya, votre présence dans ma vie signifie beaucoup pour moi. À mes amis, Vous avez partagé les défis de ce travail avec moi et je vous en suis reconnaissant.

À tous ceux qui m'ont enseigné et contribué à ma formation, je tiens à exprimer ma sincère appréciation et mon respect. Votre savoir et vos conseils m'ont guidé tout au long de ce chemin, et je suis reconnaissant de vous avoir eu comme mentors.

Enfin, je me dédie ce travail pour me rappeler que le travail acharné et la persévérance nous conduisent à l'accomplissement de nos objectifs. Je reste déterminé à poursuivre ma croissance et à réaliser de grandes choses dans le futur.

Merci à tous pour votre soutien et votre amour constants.

Avec gratitude,

Abd El Aziz



Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes très chères parents qui m'ont toujours soutenue et prodigué tout leur appuies conseil, et amour mon père et ma mère.

A mes chers frères Nouredin, Djamel, Housseem, Nacereddin et mes chères sœurs Dalila , Nadia , Salma. A toute la famille djemaâ et ghalloudj.

A tous mes amis et sourtout Hasan, Rochdi, farouk, Hakou, Ismail, Aziz, Stoufa et Chaima, Anfal, Chourouk, Leila. N'oubliez pas mon cher professeur Mme. Ben bouzid Sabah.

A mon encadreur.

A tous mes camarades étudiants qui m'ont accompagné durant toute ma vie universitaire.

A tous ceux que j'aime, a tous ceux m'aiment

Je dédie ce modeste travail

Badis Djemaâ

تركز هذه الدراسة على تمعدن المياه الجوفية في مستجمعات مياه وادي العرب الواقعة بولاية خنشلة شمال شرق الجزائر. يتميز هذا الحوض بمناخ شبه جاف وتضاريس غير منتظمة. تم قياس درجة الحرارة ودرجة الحموضة والتوصيل الكهربائي والأكسجين المذاب ومعلقات المواد الصلبة الذائبة في الموقع. تسلط النتائج الضوء على الاختلافات المكانية في تمعدن المياه الجوفية في منطقة الدراسة. تظهر المناطق الشرقية والوسطى مستويات أعلى من التوصيل الكهربائي والمواد الصلبة الذائبة، مما يشير إلى زيادة تركيز المعادن الذائبة. في المقابل، تظهر المناطق الجنوبية والغربية مستويات أقل نسبيًا من التمعدن. تُعزى هذه الاختلافات في التمعدن إلى التكوينات الجيولوجية المحلية التي اجتازتها المياه الجوفية والتي يمكن أن تطلق معادن قابلة للذوبان في الماء. تساهم هذه النتائج في فهم أفضل للخصائص الكيميائية للمياه الجوفية ويمكن أن توجه القرارات لإدارة وحفظ هذا المورد الحيوي في سياق شبه الجاف.

الكلمات المفتاحية

مستجمعات المياه، التمعدن، المياه الجوفية، المعايير الفيزيائية والكيميائية، القياسات الميدانية.

Résumé

Cette étude porte sur la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin versant d'Oued l'Arab, situé dans la wilaya de Khenchela, au nord-est de l'Algérie. Ce bassin se caractérise par un climat semi-aride et une topographie irrégulière. Les paramètres de température, pH, conductivité électrique, oxygène dissous et TDS ont été mesurés in situ. Les résultats mettent en évidence des variations spatiales de la minéralisation des eaux souterraines dans la région d'étude. Les régions Est et centrale présentent des niveaux plus élevés de conductivité électrique et de TDS, indiquant une plus grande concentration de minéraux dissous. En revanche, les régions sud et ouest affichent des niveaux de minéralisation relativement plus faibles. Ces variations de la minéralisation sont attribuées aux formations géologiques locales traversées par les eaux souterraines, qui peuvent libérer des minéraux solubles dans l'eau. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des propriétés chimiques de l'eau souterraine et peuvent orienter les décisions de gestion et de préservation de cette ressource cruciale dans un contexte semi-aride.

Mots-clés

Bassin versant, minéralisation, eaux souterraines, paramètres physico-chimiques, mesures in situ.

Abstract

This study focuses on the mineralization of groundwater in the watershed of Oued l'Arab, located in the wilaya of Khenchela, in the northeast of Algeria. This basin is characterized by a semi-arid climate and irregular topography. Temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen and TDS parameters were measured in situ. The results highlight spatial variations in groundwater mineralization in the study area. The eastern and central regions exhibit higher levels of electrical conductivity and TDS, indicating a greater concentration of dissolved minerals. In contrast, the southern and western regions show relatively lower levels of mineralization. These variations in mineralization are attributed to local geological formations traversed by groundwater, which can release water-soluble minerals. These results contribute to a better understanding of the chemical properties of groundwater and can guide decisions for the management and preservation of this crucial resource in a semi-arid context.

Key words

Watershed, mineralization, groundwater, physico-chemical parameters, field measurements.

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre 01 : Présentation de la zone d'étude

1.1	La Situation Géographique	3
1.2	Les reliefs	3
1.2.1	Les pentes	3
1.2.2	Les montagnes	4
1.2.3	Les Piedmonts :	5
1.3	Le couvert végétal	5
1.4	Climat	6
1.5	Pédologie	7

Chapitre 02 : Cadre géologique

2.1	Géologie.....	9
2.2	Lithologie.....	11

Chapitre 03 : Étude morphométrique

3.1	Caractéristiques morphométriques	13
3.2	Répartition de l'altitude et courbe hypsométrique	13
3.3	Le réseau hydrographique	16

Chapitre 04 : Étude de la minéralisation des eaux souterraines

4.1	Matériels et méthode	20
4.2	Résultats et discussions	23
4.2.1	Résultats obtenues	23
4.2.1.1	La Température	24
4.2.1.2	Le potentiel hydrogène (pH)	26
4.2.1.3	La conductivité électrique (CE)	27

4.2.1.4	Oxygène dissous	29
4.2.1.5	TDS (Total Dissolved Solids).....	32
4.3	Discussion des résultats	34
Conclusion général		36
Références bibliographiques		38

Liste des figures

Figure 1: Position géographique et MNT de bassin versant oued el Arab.....	3
Figure 2: Carte des classes des pentes.....	4
Figure 3: Carte représentant les reliefs.....	5
Figure 4: Carte d'NDVI de bassin versant oued el Arab.	6
Figure 5: Présentation des données climatiques des kenchela (1991-2021).	7
Figure 6: Carte des sol de BV oued el arab.....	8
Figure 7: Carte géologique de BV Oued el Arab.	11
Figure 8: Carte Lithologique de BV Oued el Arab.	12
Figure 9: Carte des réseaux hydrographiques selon la classification de STRAHLER.	18
Figure 10: Multi-paramètre utilisé.	21
Figure 11: Les analyses sur terrain.....	21
Figure 12: Carte des points de prélèvement.	22
Figure 13: Diagramme de température.	24
Figure 14: Carte des classes des températures.	25
Figure 15: Diagramme de pH.....	26
Figure 16: Carte des classes des pH.	27
Figure 17: Diagramme de CE.	28
Figure 18: Carte des classes des CE.	29
Figure 19: Diagramme d'oxygène dissous.	30
Figure 20: Carte des classes d'oxygène dissous.	31
Figure 21: Diagramme de TDS.	32
Figure 22: Carte des classes des TDS.	33

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de l'altitude en fonction de la surface.	14
Tableau 2: Classification de l'ORSTOM.....	16
Tableau 3: Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant.	19
Tableau 4: Résultats obtenues.....	23
Tableau 5: Tableau de température.....	24
Tableau 6: Tableau de pH.	26
Tableau 7: Tableau de CE.....	27
Tableau 8: Tableau d'oxygène dissous.....	30
Tableau 9: Tableau de TDS.	32

Liste des abréviations

- **°C:** degré Celsius.
- **μs/cm:** Microsiemens par centimètre.
- **BV:** Bassins Versants.
- **CE:** Conductivité électrique.
- **mg/l:** Milligramme par litre.
- **MNT:** Modèle numérique de terrain.
- **NDVI:** Normalized Difference Vegetation Index.
- **pH:** potentiel d'hydrogène.
- **SIG:** Système d'information géographique.
- **T:** Température.
- **TDS:** Total des solides dissous.

Introduction générale

Introduction générale

Les eaux souterraines sont une ressource vitale pour la survie et le développement des populations dans de nombreuses régions du monde spécialement dans les régions semi arides. Dans de nombreuses régions semi-arides et arides du monde, la qualité de l'eau est un facteur limitant plus important, et non la quantité d'eau. La qualité d'eau est vitale non seulement en raison de son impact sur la disponibilité de l'eau douce et la santé humaine, mais aussi en raison de sa valeur intrinsèque (**McCutcheon et al, 1993**). Le changement climatique, la croissance démographique et le développement économique menacent manifestement des ressources vitales telles que l'eau, la nourriture et la sécurité énergétique dans pratiquement la plupart des régions du monde (**Wilhite, 2000**) . L'augmentation de la population et le développement économique ont été des défis majeurs, en particulier parce que les prévisions prévoient que la demande en eau augmentera de 50 % d'ici 2030, aggravant encore les pénuries d'eau (**Yang et al, 2016**).

Les intrants agricoles excessifs, la surexploitation des eaux souterraines et les sources de pollution agricole provenant de différentes origines constituent des problèmes de plus en plus répandus qui posent des défis majeurs pour le développement agricole durable. La recherche scientifique a montré que ces facteurs, tels que mentionnés par **Brauman et al. (2013), Shahdany et al. (2018) et Raju et Kumar (2004)**, peuvent avoir des conséquences significatives sur la qualité de l'eau et la durabilité des ressources agricoles.

La connaissance et la compréhension des processus de minéralisation de ces eaux revêtent une importance primordiale pour assurer leur utilisation durable. Dans ce contexte, le bassin versant d'Oued L'Arab, situé dans la région de Khenchela, au nord-est de l'Algérie, constitue un site d'étude privilégié. Le bassin versant d'Oued L'Arab se situe dans une région semi-aride est caractérisé par une topographie complexe (**Chermime, 2013**), avec des formations géologiques variées et des conditions hydrologiques diverses. Ces facteurs peuvent influencer la minéralisation des eaux souterraines, en particulier la teneur en sels dissous, les propriétés physico-chimiques et la qualité globale de l'eau.

La présente recherche vise à contribuer à l'étude de la minéralisation des eaux souterraines du bassin versant d'Oued L'Arab, en mettant l'accent sur l'identification des sources de minéraux dissous, les mécanismes de transport et les facteurs environnementaux qui influencent cette minéralisation (**Sigg et al, 2014**). L'objectif principal est d'améliorer la compréhension des processus géochimiques qui régissent la minéralisation de l'eau dans cette

région, en vue de soutenir une gestion durable des ressources en eau souterraine. Pour atteindre cet objectif, des échantillons d'eau souterraine seront collectés à partir de puits et de sources dans différentes zones du bassin versant.

Des mesures physico chimiques in situ seront réalisées pour avoir une idée sur les concentrations en sels dissous, les minéraux présents et d'autres paramètres pertinents. Les résultats de cette recherche contribueront à une meilleure compréhension de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin versant d'Oued L'Arab et permettront de mettre un état des lieux sur la minéralisations des eaux souterraines. Ces informations seront essentielles pour la gestion durable des ressources en eau souterraine, la protection de la santé publique et la mise en place de stratégies de prévention et d'atténuation des problèmes de qualité de l'eau (**Seiler, 2008**).

Pour atteindre ces objectifs, nous avons élaboré un plan de travail pour ce mémoire, qui sera divisé en quatre chapitres distincts :

- Le premier chapitre expose une petite présentation de la zone d'étude.
- Le deuxième chapitre, est une étude géologique du BV Oued el Arab.
- Le troisième chapitre est une étude morphométrique de BV.
- Le quatrième chapitre représente le matériel, la méthode, les résultats et la discussion.

Chapitre 01 : **Présentation de la zone d'étude**

Chapitre 01 : Présentation de la zone d'étude

1.1 La Situation Géographique

Le bassin versant d'Oued El-Arab est l'un des bassins de la wilaya de Khenchela, situé entre les latitudes 35°10'59.05" Nord et les longitudes 06°49'36.86" Est. Il englobe les communes de Chelia, Nsigha, Tamza, El Mahmal, Bouhmama, Msara, Khirane, El Oueldja et Babar. La superficie du bassin versant est de 2098.05 km², avec un périmètre de 264.16 km. Il fait partie du grand bassin versant Chott Melghir.

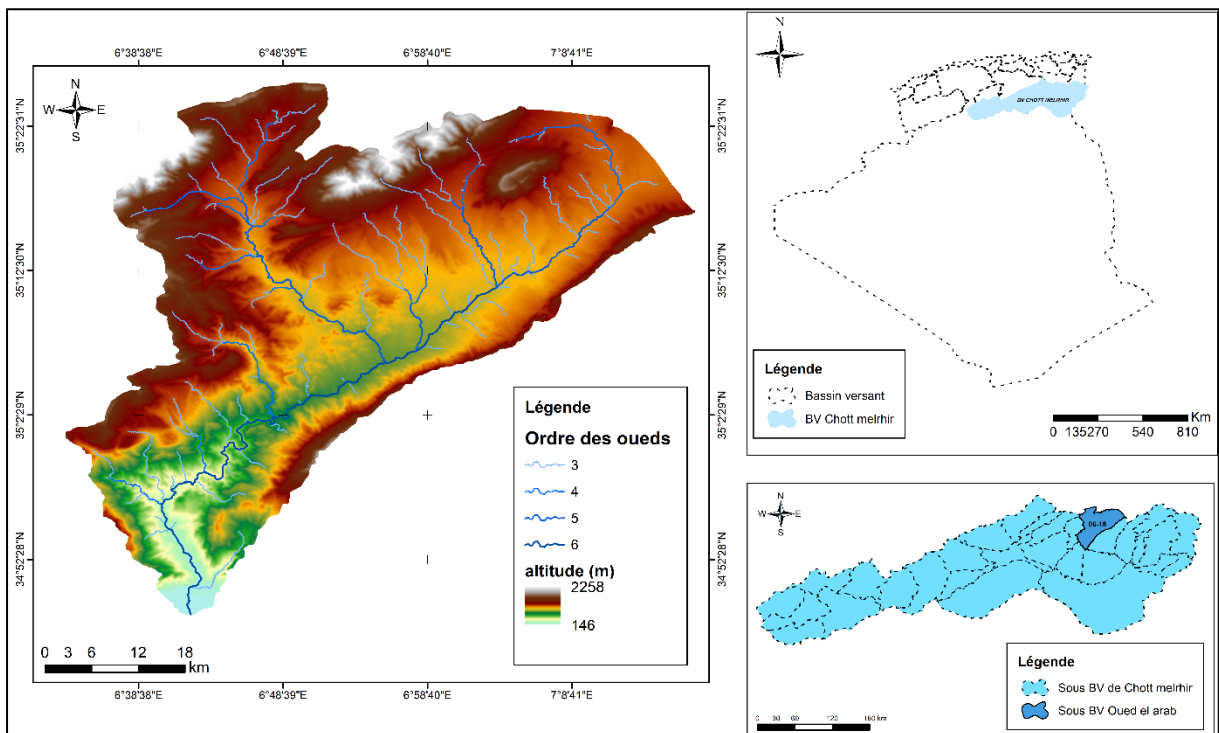


Figure 1: Position géographique et MNT de bassin versant oued el Arab.

1.2 Les reliefs

Le milieu physique d'un bassin versant se réfère à l'environnement naturel et géographique dans lequel il est situé. D'après la Carte topographique de khenchela et des études le BV consiste à

1.2.1 Les pentes

Les pentes (en %) générée à partir du modèle numérique du terrain de la zone d'étude. 04 classes de pente sont présentes :

- Class 01: [0 - 2,75%], classe des pentes très faible représente 18% de la superficie totale.
- Class 02: [2,75 - 6,27%], classe des pentes faibles représente 33% de la superficie totale.
- Class 03: [6,27 - 11,33%], classe des pentes moyens représente 34% de la superficie totale.
- Class 04 : [$> 11,33\%$], classe des pentes forts représente 15% de la superficie totale.

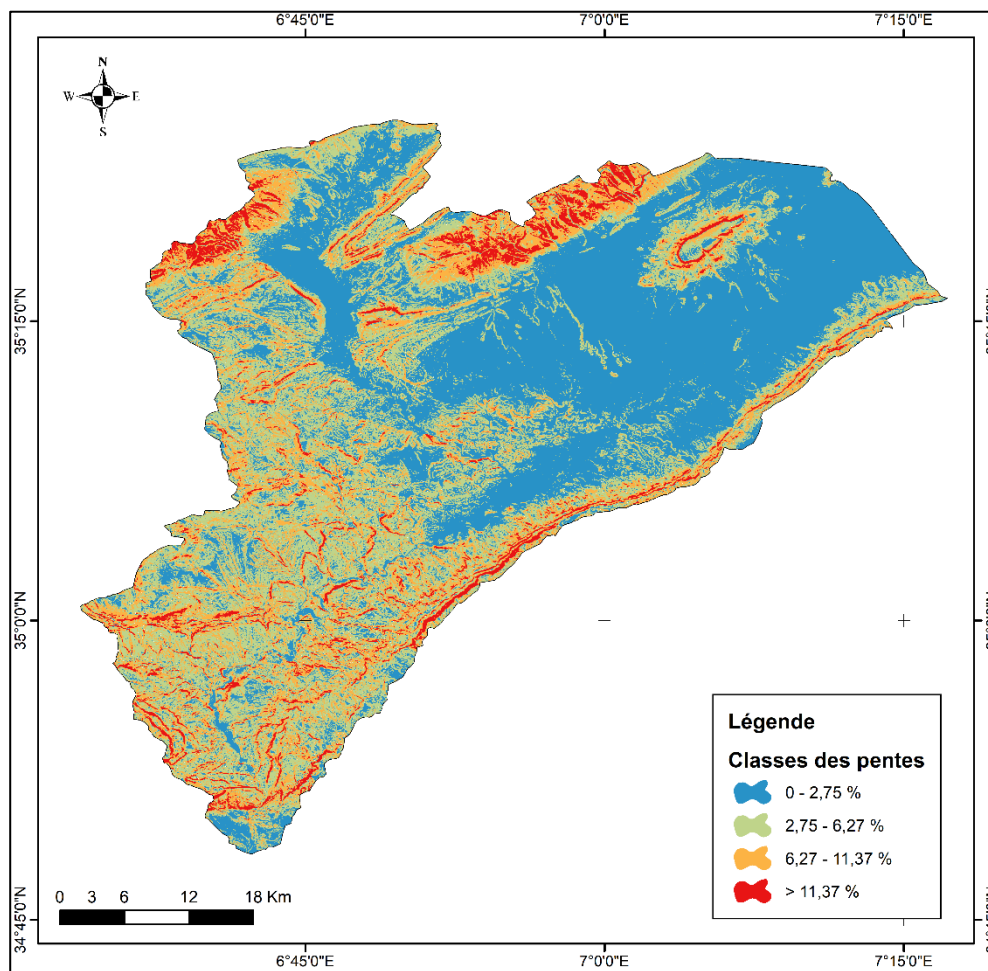


Figure 2: Carte des classes des pentes.

1.2.2 Les montagnes

Le BV oued el Arab est entouré par des montagnes imposantes telles que DJ-Aidel (2092m), Dj-Chelia (2115m), Dj-Bezez (2141m) ainsi que le massif des Aurès à l'Ouest du BV. À l'est, on trouve les massifs de Nememcha, Dj-Bouzendag (1390m), Dj-Sguiguine (1453m), Dj-Tedliste (1507m), Djebel Djahfa (1707m), et bien d'autres (**Gaagai, 2009**).

1.2.3 Les Piedmonts

Ils constituent la zone de transition entre les montagnes et les zones basses se trouvant au sud entre les altitudes 900 -1100m, Ils sont caractérisés par des pentes faibles 2,75 - 6,27% (Aouachria, 2008).

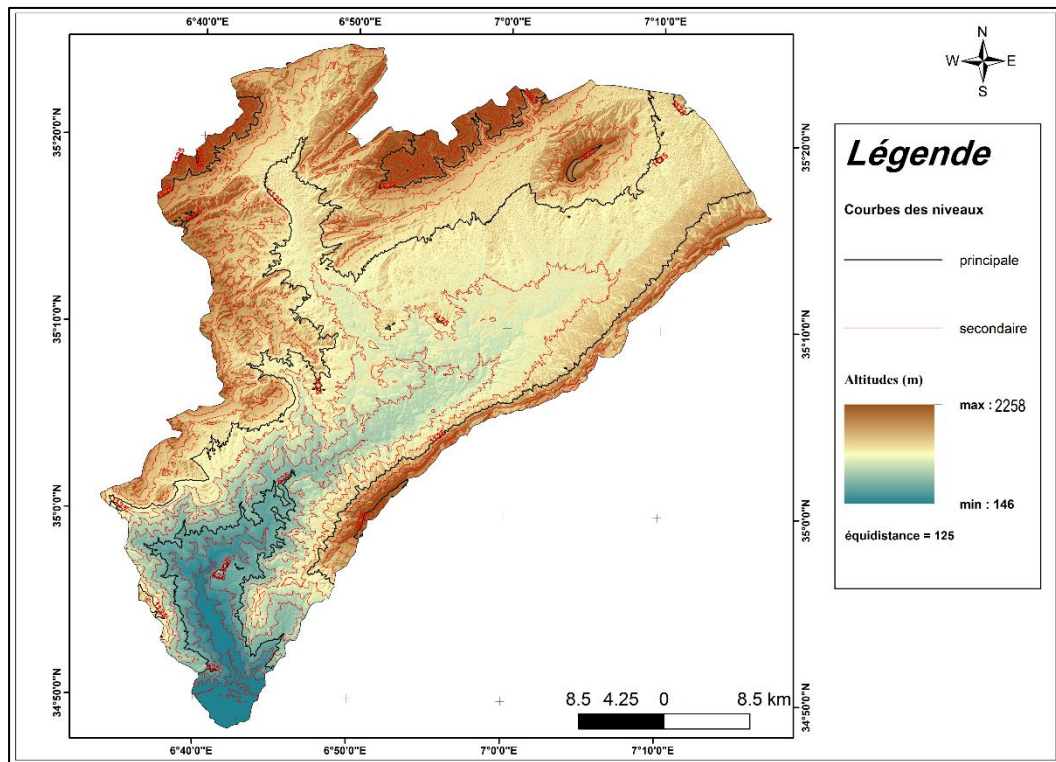


Figure 3: Carte représentant les reliefs

1.3 Le couvert végétal

La zone d'étude est intégrée à l'écosystème septentrional du nord de l'Algérie. La végétation est étroitement liée au sol, au climat (Benmessoud, 2008). Le bassin versant de Oued El Arab présente une faible couverture végétale, ce qui rend le bassin plus vulnérable à l'érosion. Les montagnes qui sont recouvertes de forêts de pins, de chênes verts et de cèdres ont un couvert végétal bien conservé. Les zones basses, quant à elles, sont principalement couvertes de steppes d'Halfa ou bien utilisées pour la culture des céréales (Amiour & Boulaloua, 2018).

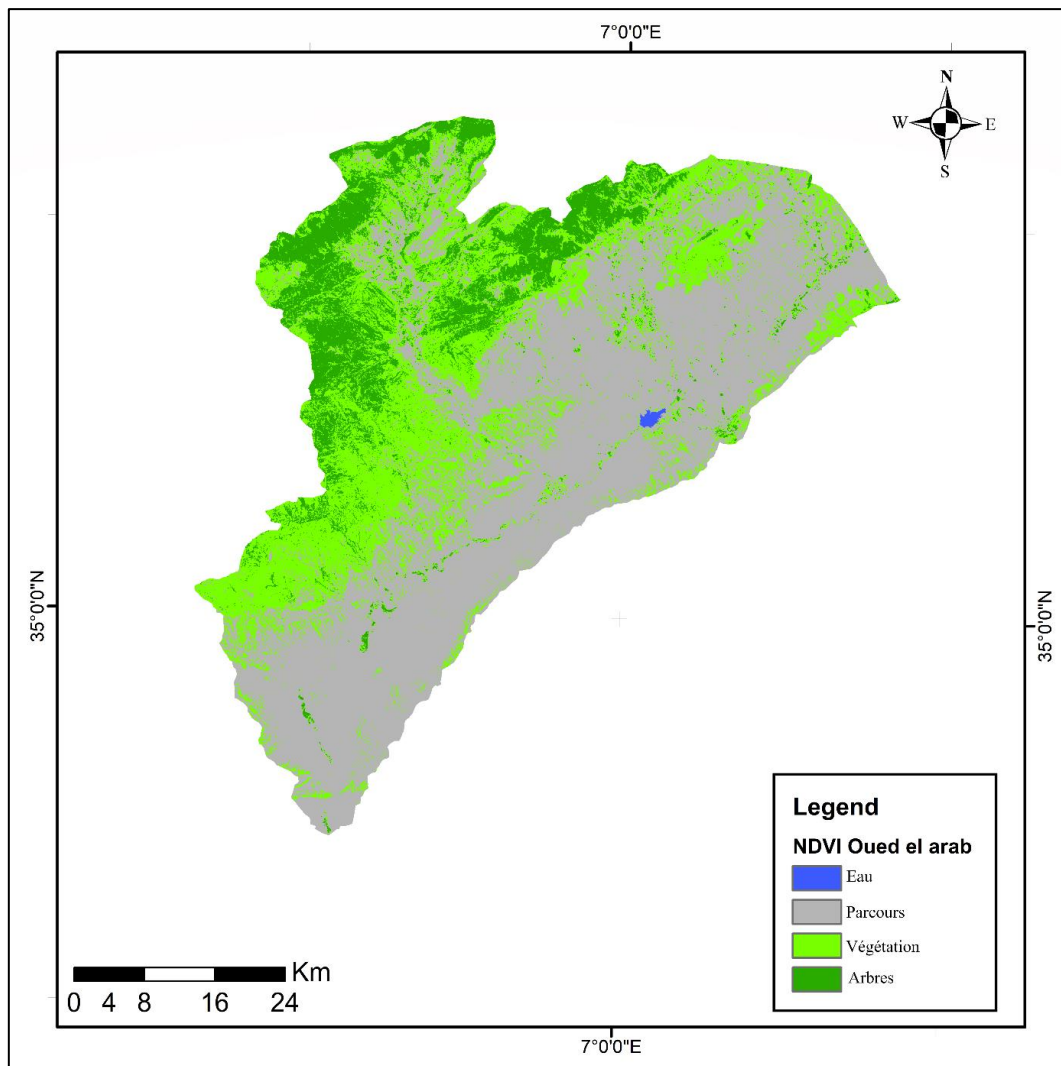


Figure 4: Carte d'NDVI de bassin versant oued el Arab.

1.4 Climat

En raison de sa situation géographique et de la diversité de son relief, la région présente des caractéristiques climatiques variées. Au nord, les terres hautes connaissent un climat semi-aride, tandis que la région montagneuse du centre est de nature continentale. Au Sud, la région est caractérisée par un climat désertique aride (**Chenaker, 2022**).

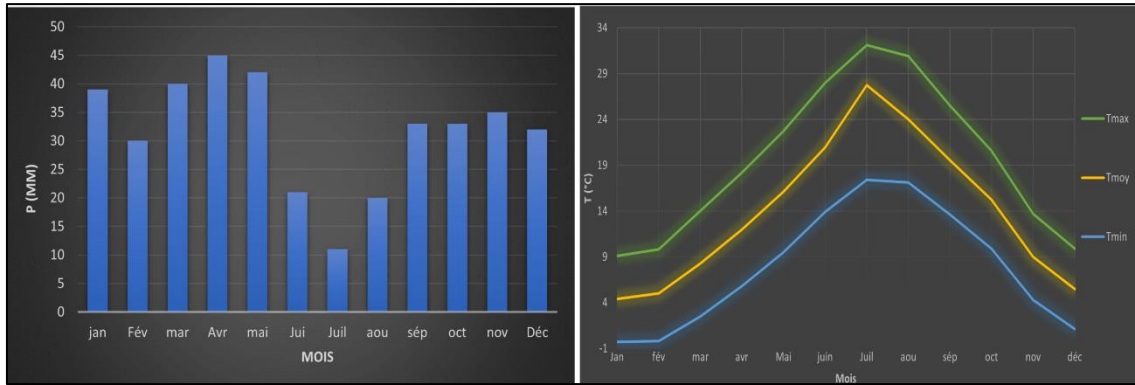


Figure 5: Présentation des données climatiques de khenchela (1991-2021).

1.5 Pédologie

Compte tenu de la variété des caractéristiques morphologiques et climatiques du territoire de l'État, il en résulte une large gamme de sols.

- La zone des piémonts est formée quant à elle, de sols calciques également très riches.
- Au niveau de la zone centrale montagneuse, on rencontre sur les Monts des Aurès des sols insaturés humifères (sols formés sur des roches non calcaires et perméables), des sols calcaires humifères (formés sur les roches mère calcifères).
- Le plateau du Mahmel et la vallée de l'Oued El Arab sont formés de sols calciques; la roche mère affleure uniquement sur les hauteurs.
- Les monts des Nememchas sont formée des sols calciques, la roche mère affleure sur presque toute la sous -zone.
- La zone Sud de la wilaya, on rencontre des sols éoliens d'ablation et des sols basiques. **(Meddour, 2013).**

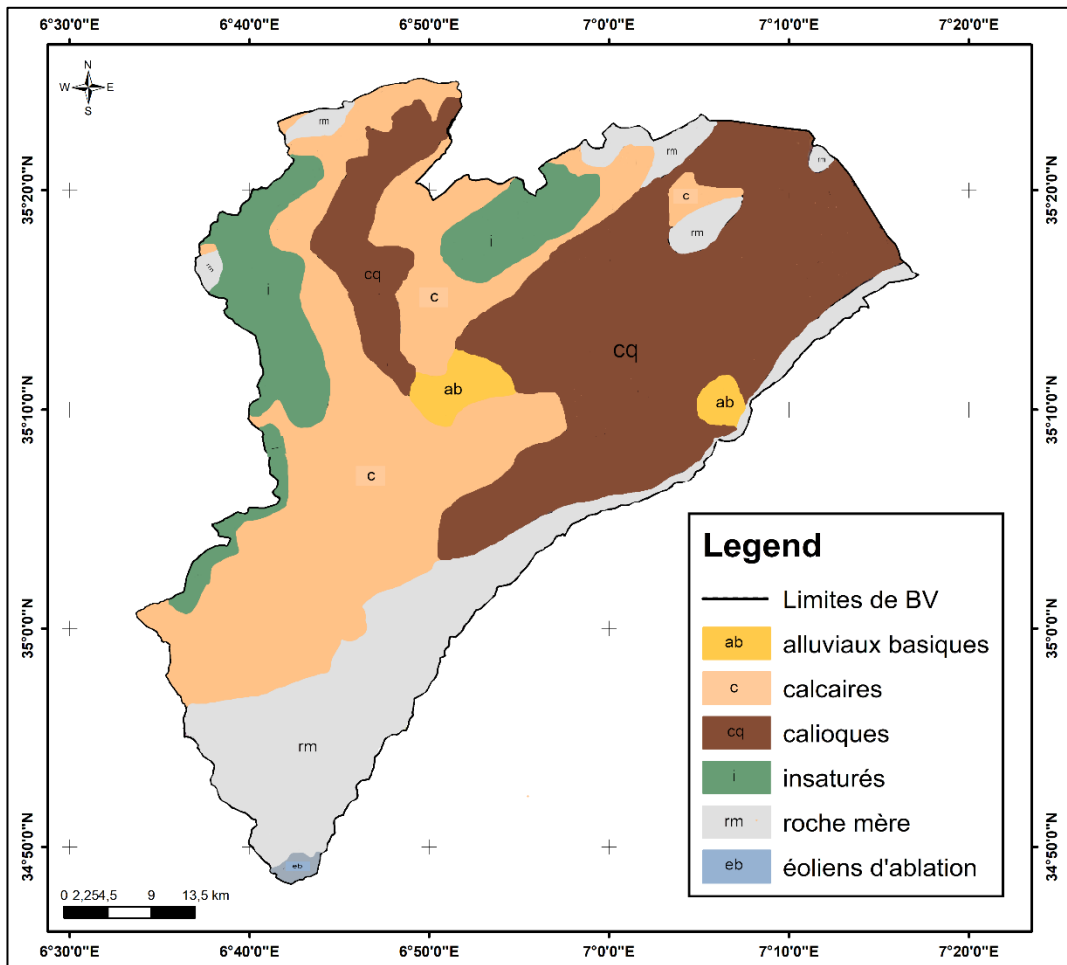


Figure 6: Carte des sol de BV oued el arab.

Chapitre 02 : **Cadre géologique**

Chapitre 02 : Cadre géologique

La géologie est une partie très importante dans toute étude hydrologie, car jouent un rôle primordial sur la qualité des eaux suite à la dissolution des minéraux qui se trouvent dans la roche et sur la quantité d'eau qui ruissèle ou s'infiltré selon la perméabilité du terrain.

2.1 Géologie

L'étude géologique de la région du kenchela a été inspiré des travaux et études antérieurs réalisés sur le massif des Aurès (comme : Robert L en 1939, Blayac J en 1899, Bureau D en 1975), sur les hautes plaines steppiques et sur les zones Humides. D'après l'inventaire stratigraphique dressé par plusieurs géologues les terrains les plus anciens sont attribués au Trias et les plus récents au Quaternaire. La région de Kenchela se caractérise par la présence de trois zones différentes qui peuvent être distinguées comme suit :

- Au Nord : une zone plate, Steppique qui correspond à la bordure méridionale de la grande dépression de Garat El Taref.
- Les parties occidentales et centrales constituent la terminaison périclinale.
- Nord-Est de La chaîne des Aurès, région caractérisée par les diapirs triasiques.
- La zone méridionale au Sud constitue les monts des Nememcha ; et plus au Sud, c'est La zone plate qui correspond à la bordure septentrionale du pays des chotts.
- **Trias** : Cet étage est caractérisé par la présence de marne accompagnée de gypse et de sel gemme, et se situe sur les flancs des anticlinaux. Des divers éléments sont reconnaissables (dolomies noires, grès, gypses marneux et gypses fibreux) et emballés dans des argilites vertes.
- **Jurassique** : Il s'agit des marnes, des calcaires marneux et des dolomies, constituant la succession de cet étage.
- **L'aptien** : Caractérisé par la large présence des facies dolomie et calcaire dolomitique.
- **L'albien** : Présent dans tous les anticlinaux de l'Aurès, les marnes constituent la base, les calcaires sont développés au sommet.
- **Cénomaniens supérieurs** : Ce sont des calcaires marneux gris-bleus à cassures noirâtres en bancs métrique.
- **Turonien** : Occupé à l'affleurement les plus grandes surfaces de l'Aurès pendage faible. Il est présenté par les calcaires à rudistes et des marno-calcaires. L'épaisseur de l'étage varie de 100 à 300 mètres dans faciès à rudistes e atteint 800 m et plus dans faciès calcaires marneux.

- **Coniacien** : Formé de marne grise et de marno-calcaire.
- **Santonien** : C'est un faciès marneux: marnes gris-bleu et calcaires marneux.
- **Campanien** : Formé de marnes et de calcaires crayeux.
- **Miocène** : Le miocène marin surmonte dans l'Aurès des assises d'origine continentale comprenant:
 - A la base des argiles rouges
 - Au-dessus des grès ou sable bruns ou rouge
 - Au sommet des poudingues rouge
- **Langhien-serravalien** : Formé des marnes, biomicrites; bio micros-parités et grès blanc. Tortonien gréseux blanc grossier Formé de l'argile silteuses à grès blancs grossiers en bômes pluri métriques, à abondantes dragées de quartz.
- **Quaternaires** : Les formations récentes sont aussi largement répandues à la périphérie de l'Aurès; ils sont rares dans le centre massif des Aurès, ils sont représentés uniquement par des éboulis et des terrasses; tandis qu'ils forment en périphérie de large et épaisses nappes alluviales.
- **Alluvions récentes au actuelles** : Ces formations sont limitées aux zones basses, à l'oued Issouel qui aboutit au Barrage de Foum el Gueiss, et à l'oued Ras Serdoun. Ce sont des sables, des graviers et des limons gris de gros galets émoussés calcaires ou gréseux. **(Boubelli, 2009)**

D'après la Carte géologique de Khenchela, le bassin versant se caractérise lithologiquement par la présence des formations suivantes :

- Crétacé supérieur.
- Crétacé inférieur.
- Éocène inférieur.
- Quaternaire continentale.
- Cénomaniens.
- Trurontien.
- Trias marin.

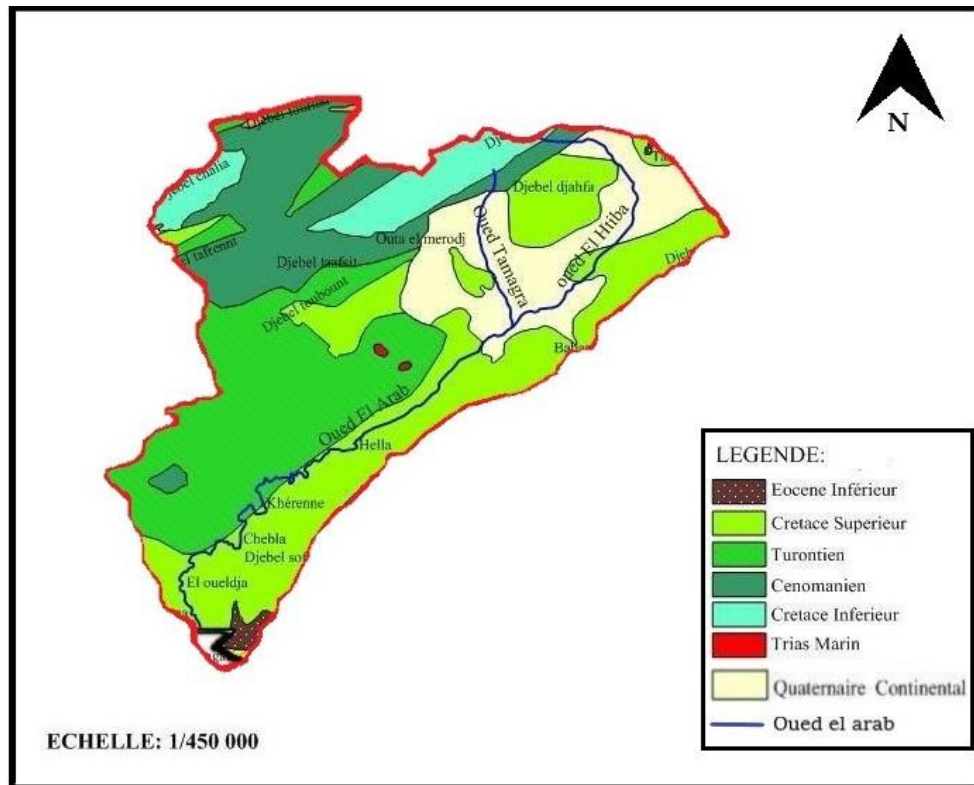


Figure 7: Carte géologique de BV Oued el Arab (source : R Laffitte, 1939 (modifiée)).

2.2 Lithologie

Au niveau lithologique, la zone de Khenchela présente une variété de faciès dont les plus représentatifs sont les suivants :

- **Les alluvions et sables:** Ces phases sont stables et se produisent principalement dans le nord du plateau, les terrasses alluviales d'El Meroudj et de l'oued Guergoub, et au Sud des niveaux glaciaires dans les contreforts des Aurès-Némenchas et les basses plaines.
- **Les marnes :** Sont présentes tout le long de la Vallée de l'Oued El Arab et sur la partie est de la wilaya, correspondant aux monts des Némenchas, Au niveau de ces derniers, qui sont dépourvus de végétation forestière.
- **Les calcaires et dolomies dures :** Formations à bonne résistance à l'érosion, les calcaires et dolomies dures sont présent sur la presque totalité du massif des Aurès et sur les reliefs du nord-est de la wilaya.
- **Les calcaires friables :** Peu répandus dans la wilaya, sont localisés principalement sur la bande médiane séparant le nord du Sud de la région, et localement au nord, dans la zone des Garaets. Ces roches donnent naissance à des sols calcaires, de profondeur

variable suivant leur position topographique, et riches en humus quand ils sont couverts de végétation forestière.

- **Le gypse** : Formation saline, le trias est essentiellement répandu sur les basses plaines sahariennes au Sud de la wilaya. Par ailleurs, on le trouve localement au Nord de Khenchela, à l'est de Babar et au Sud d'Oulad Rechache (**Khabtane, 2015**).

D'après la carte lithologique de Khenchela, le bassin versant se caractérise lithologiquement par la présence des formations suivantes :

- Les Calcaires et Dolomies dures.
- L'Alluvions et Sable.
- Les Calcaires, Dolomies dures et Marnes.
- Les Conglomérats.
- Le Marne.

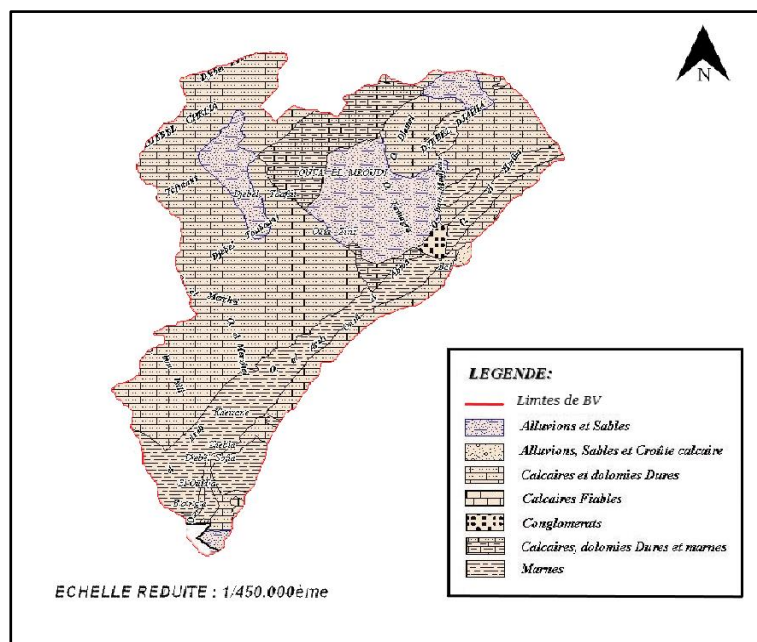


Figure 8: Carte Lithologique de BV Oued el Arab (Source: PDAU khenchela (modifiée)).

Chapitre 03 : **Étude morphométrique**

Chapitre 03 : Étude morphométrique

3.1 Caractéristiques morphométriques

A. Surface et périmètre du bassin versant

La superficie a été mesurée à l'aide du logiciel ArcGIS après avoir placé le fichier DEM. La superficie est égale à $S= 2098,05 \text{ km}^2$. Le périmètre d'un bassin versant est estimé à $P= 264,16 \text{ km}$.

B. Indice de compacité K_c

Cet indice peut être calculé selon la formule suivante

Avec : $P=264.16\text{km}$ et $S=2098.06\text{km}^2$

$$k_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi \times S}} = \frac{264.16}{2\sqrt{3.14 \times 2098.06}}$$

$$k_c = 1.61$$

Si :

- $K_c \leq 1$ Bassin versant de forme circulaire.
- $K_c = 1,12$ Bassin versant de forme carrée.
- $K_c > 1,12$ Bassin versant allonger.

Dans notre cas $K_c = 1,61$ donc le bassin versant de Oued El Arab à une forme allonger.

3.2 Répartition de l'altitude et courbe hypsométrique

A l'aide des représentations du tableau et de la courbe hypsométrique, on remarque la répartition des parties des cotes dans le bassin, représentent 33,38% des superficies du bassin situées aux cotes (146-1123m). Alors que 66,62% des zones sont situées à des altitudes supérieures à (1123m).

1) Les altitudes caractéristiques

- Les altitudes minimales et maximale : Grâce à des Cartes topographiques, nous déterminons l'élévation maximale, qui est le point le plus élevé du bassin, tandis que l'élévation minimale est le point le plus bas du bassin, qui est souvent situé au point de l'exutoire.

Ces données sont importantes pour développer des relations et des analyses des variables de température, de précipitations et d'enneigement, ainsi que pour calculer la pente.

$$H_{\max} = 2258 \text{ m} ; H_{\min} = 146 \text{ m}$$

- L'altitude moyenne : L'altitude moyenne peut être déterminée à l'aide des données cartographiques ou de la courbe hypsométrique, où est défini comme la division du volume de la montagne (V) par la superficie du bassin versant (S).

$$H_{moy} = \frac{v}{s}$$

Le volume V est obtenu comme suit : $V = \frac{S_i(H_1+H_2)}{2}$

S_i : Surface partielle en km² entre deux courbes de niveau.

$$H_{moy} = 1093.35$$

Tableau 1: Répartition de l'altitude en fonction de la surface.

Altitude (m) Hi	Surface partielles		Surfaces cumulées	
	Si (Km ²)	%	Si (Km ²)	%
1733 - 2258	47.110851	2.245459	47.110851	2.245459
1514 - 1732	82.513667	3.932874	129.625	6.178333
1357 - 1513	186.127616	8.871458	315.752	15.049791
1234 - 1356	278.395367	13.269244	594.148	28.319035
1124 - 1233	328.981567	15.680349	923.129	43.999384
1014 - 1123	474.689821	22.625286	1397.8	66.62467
881 - 1013	318.502083	15.180862	1716.32	81.805532
694 - 880	190.937896	9.100731	1907.26	90.906263
453 - 693	125.951807	6.00328	2033.21	96.909543
146 - 452	64.837234	3.090357	2098.05	100.00

2) *Indice de pente moyenne (Im)*

Il est calculé à l'aide de la formule suivante : $I_m = \frac{H_{max}-H_{min}}{\sqrt{S}}$

➤ $H_{max}=2258 \text{ m} / H_{min}=146 / S=2098.05 \text{ km}^2$

$$I_m = \frac{2258 - 146}{\sqrt{2098.05}} = 46.10 \text{ m/km}$$

3) *Indice de pente globale (Ig)*

Sur la courbe hypsométrique, nous prend deux points en laissant tomber les valeurs de 5% et 95% de l'axe de la surface sur la courbe et en déduisant les hauteurs correspondantes, on aura les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$. L'indice de pente globale est calculé selon l'équation

suivante : $I_g = \frac{D}{L}$

➤ **D** : la dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ / **L** : longueur du rectangle équivalent ;
 $L=123.24\text{km}$

A partir de la courbe hypsométrique on tire: $H_{5\%} = 1825 \text{ m}$ et $H_{95\%} = 795 \text{ m}$

$\Rightarrow D = H_{5\%} - H_{95\%} = 1825 - 795 = 1030 \text{ m}$

$$I_g = \frac{1030}{123.24} = 8.35 \text{ m/km}$$

4) *Dénivelée spécifique (Ds)*

Elle est définie comme étant le produit de l'indice de pente globale (I_g) par la racine carrée de la surface du bassin versant : $D_s = I_g \sqrt{S}$

$$D_s = 8.35 \sqrt{2098.05} = 382.81$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelée spécifique du bassin de Oued Al Arab se trouve dans la classe R6, donc on a un relief fort.

Tableau 2: Classification de l'ORSTOM

Classe	Type de relief	Intervale de D_s
R1	Relief très faible	05 à 10 m
R2	Relief faible	10 à 25 m
R3	Relief assez faible	25 à 50 m
R4	Relief modéré	50 à 100 m
R5	Relief assez fort	100 à 250 m
R6	Relief fort	250 à 500 m
R7	Relief très fort	500 à 750 m

3.3 Le réseau hydrographique

La longueur totale du réseau hydrographique est mesurée à l'aide d'ArcGIS.

1) *Densité de drainage D_d*

Elle est déterminée comme étant le rapport entre la longueur totale des cours d'eau de tout ordre (L_x) sur la surface du bassin versant (S).

La longueur des thalwegs est mesurée à l'aide du d'ArcGIS pour chaque ordre séparément. La densité de drainage est donnée par l'équation suivante: $D_d = \frac{\sum_{x=1}^n L_x}{S}$

- **D_d** : densité de drainage en (km/km²)
- **L_x** : longueur totale cumulée de l'ensemble des talwegs ; $L_x = 1946.05$ Km
- **S** : superficie du bassin versant ; $S = 2098.05$ km²

$$D_d = \frac{1946.05}{2098.05} = 0.93 \text{ km/km}^2$$

2) *Coefficient de torrentialité*

C'est le produit de la densité de drainage par la fréquence des talwegs élémentaires.

$$C_t = D_d \frac{N_1}{S}$$

- **C_t** : coefficient de torrentialité.
- **D_d** : densité de drainage ; $D_d = 0.93$ km/km²

- N_i : nombre de talwegs d'ordre « 1 » $N_i = 733$
- S : surface du bassin versant $S = 2098.05 \text{ km}^2$

$$C_t = 0.93 \frac{733}{2098.05} = 0.32$$

3) Temps de concentration

C'est le temps que met une goutte d'eau tombée au point hydrauliquement le plus éloigné pour arriver à l'exutoire.

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_p}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

- T_c : temps de concentration (heures)
- S : superficie du bassin versant, $S = 2098.05 \text{ km}^2$
- L_p : longueur du talweg principal, $L_p = 71.66 \text{ km}$
- H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant ; $H_{moy} = 1093.35 \text{ m}$
- H_{min} : altitude moyenne du bassin versant ; $H_{min} = 146 \text{ m}$

$$T_c = \frac{4\sqrt{2098.05} + 1.5 * 71.66}{0.8\sqrt{1093.35 - 146}} = 17.31 \text{ heures}$$

On remarque que ce temps de concentration est lent, ce qui signifie que le débit d'eau a besoin de temps pour atteindre l'exutoire, ce qui nous donne l'occasion de prendre les précautions nécessaires en cas d'inondation.

4) Vitesse de concentration

C'est la vitesse moyenne de propagation de la crue, elle est calculée par la formule suivante :

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

V_c : vitesse de concentration ; (km/h)

L_p : longueur du talweg principal ; $L_p = 71.66 \text{ km}$

T_c : temps de concentration ; $T_c = 17.31 \text{ h}$

$$V_c = \frac{71.66}{17.31} = 4.13 \text{ Km/heure}$$

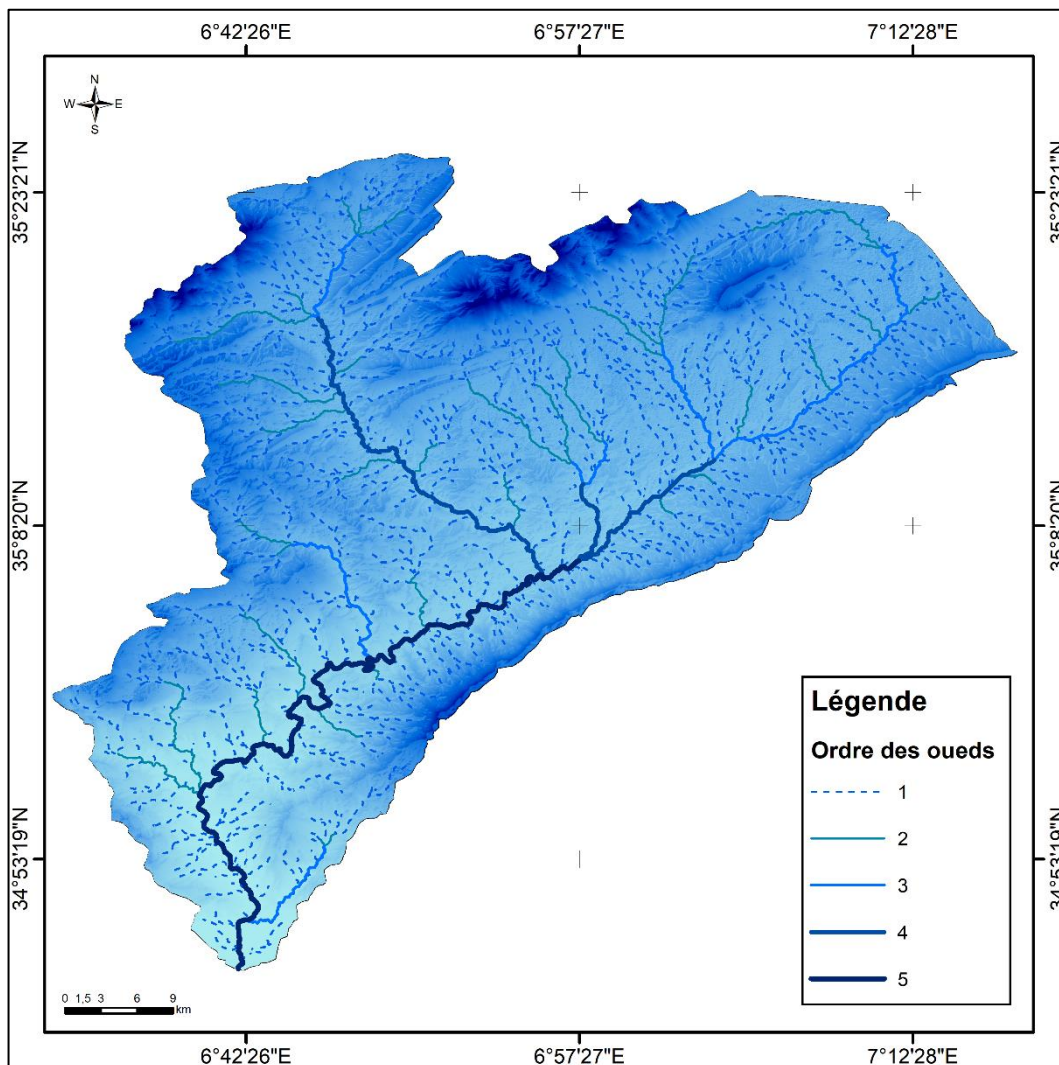


Figure 9: Carte des réseaux hydrographiques selon la classification de STRAHLER.

L'ensemble des caractéristiques de ce bassin versant ont été représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3: Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant.

Caractéristiques	Unités	Symboles	Valeurs
Surface	Km ²	S	2098.05
Périmètre	Km	P	264.16
Altitude maximale	m	H _{max}	2258
Altitude minimale	m	H _{min}	146
Altitude moyenne	m	H _{moy}	1093.35
H5%	m	H _{5%}	1825
H95%	m	H _{95%}	795
Indice de compacité	-	K _c	1.61
Longueur du rectangle équivalent	Km	L	123.24
Largeur du rectangle équivalent	Km	L	123.24
Indice de pente globale	m/Km	I _g	8.35
Indice de pente moyenne	m/Km	I _m	46.10
Altitude médiane	m	H _{50%}	1200
Dénivelée spécifique	m	D _s	382.81
Longueur du talweg principal	Km	L _p	71.66
Densité de drainage	Km/Km ²	D _d	0.93
Coefficient de torrentialité	-	C _t	0.32
Temps de concentration	heurs	T _c	17.31
Vitesse de concentration	Km/ h	V _c	4.13

Chapitre 04:
L'étude de la minéralisation des eaux souterraines

Chapitre 04 : Étude de la minéralisation des eaux souterraines

La minéralisation des eaux souterraines est un phénomène naturel influencé par plusieurs facteurs, tels que la géologie du sous-sol, les caractéristiques hydrogéologiques, le climat, l'utilisation des terres et les activités humaines. Les processus de dissolution, de précipitation et de réaction chimique peuvent entraîner la présence de minéraux dissous dans l'eau souterraine, tels que le calcium, le magnésium, le fer, le sodium et les carbonates (**Gouaidia et al, 2017**). La compréhension de la minéralisation des eaux souterraines revêt une importance capitale pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle permet d'évaluer la qualité de l'eau souterraine et d'identifier les éventuelles limitations à son utilisation dans divers secteurs (**Gorde et Jadhav, 2013**). De plus, cela contribue à prévenir la formation de dépôts minéraux nuisibles dans les infrastructures hydrauliques telles que les puits, les canalisations et les équipements de pompage (**Tirkey et al, 2013**).

Dans cette étude, nous cherchons à améliorer notre compréhension de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin versant d'Oued El-Arab. En examinant les facteurs géologiques, hydrogéologiques et environnementaux spécifiques, nous cherchons à identifier les sources de minéraux dissous en mesurant les paramètres in situ tels que la conductivité, la salinité, le pH, l'oxygène dissous et la température. Les mesures in situ de ces paramètres permettent d'obtenir des données en temps réel, évitant ainsi les altérations ou les modifications éventuelles qui pourraient survenir lors de la collecte et du transport des échantillons d'eau vers un laboratoire. Cela permet une évaluation plus précise et immédiate de la qualité de l'eau souterraine et des processus de minéralisation qui s'y produisent.

4.1 Matériels et méthode

Afin de contribuer à l'étude de la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin versant d'Oued Al Arab, des procédures d'échantillonnage et de traitement spécialisées sont indispensables. Le choix du site d'échantillonnage a été basé sur l'accessibilité du terrain et en tenant compte des limites géographiques du bassin. Des échantillons d'eau provenant de plusieurs puits du site ont été prélevés pour analyse par un multi-paramètre (emprunter aux laboratoires de l'université) les 13/05/2023 et 20/05/2023.

Les paramètres mesurés comprennent la température, le pH, les TDS (Total Dissolved Solids), la conductivité électrique et l'oxygène dissous. Il est important de noter que certaines mesures n'ont pas pu être effectuées en raison de circonstances particulières. Enfin, nous

avons créé une carte de l'emplacement de chaque échantillon prélevé (fig. 12) grâce au logiciel ArcGIS.



Figure 10: Multi-paramètre utilisé.



Figure 11: Les analyses sur terrain, date: 13 et 20/05/2023.

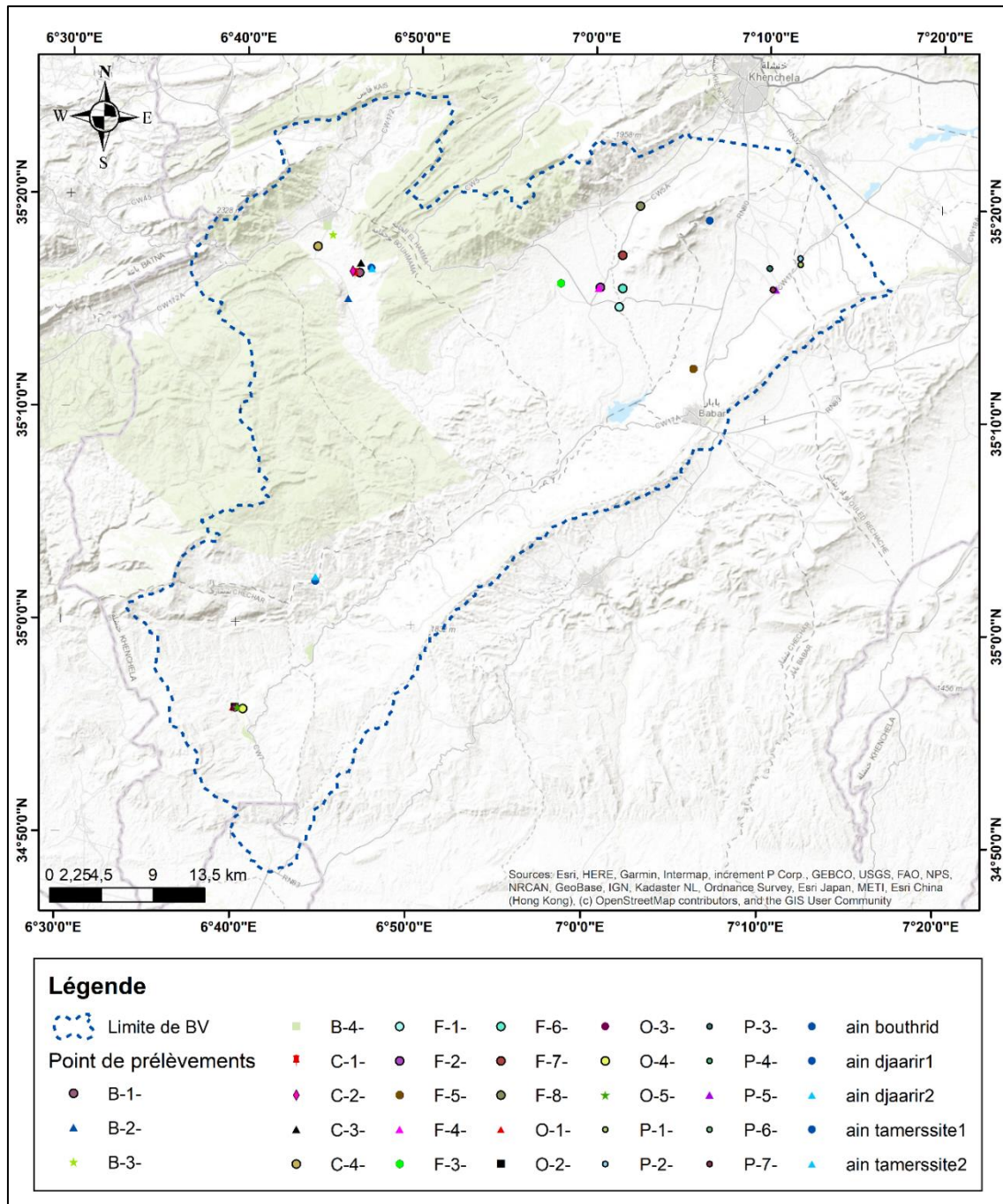


Figure 12: Carte des points de prélèvement.

4.2 Résultats et discussions

4.2.1 Résultats obtenues

Le tableau 04, représente les résultats obtenues de chaque point analyser.

Tableau 4: Résultats obtenues.

Echantillons	nom	pH	T (°C)	CE (µs/cm)	O dissous (mg/l)	TDS (mg/l)
1	P 1	7,16	18,9	1441	5,81	1059,38
2	P 2	6,69	16,4	1388	7,94	24,76
3	P 3	7,15	19,8	3134	7,21	2261,61
4	P 4	6,73	19,2	2891	2,65	1886,73
5	P 5	7,02	18,3	1862	7,03	1388,09
6	P 6	6,76	17,5	2521	5,89	1912,94
7	P 7	6,58	16,2	3353	3,71	2618,91
8	P 8	7,51	17,5	374,1	8,21	284,04
9	F 1	6,75	15,4	1945	2,3	1417,69
10	F 2	7,89	20,6	1974	4,8	1450,88
11	F 3	7,51	16,1	814	9,03	594,36
12	F 4	7,4	13,6	525	8,66	381,53
13	F 5	7,82	23,6	814	9,15	602,34
14	F 6	7,13	13,6	2059	7,37	1530,96
15	F 7	6,87	15,6	2689	8,71	2022,86
16	F 8	7,6	16,3	432	9,35	320,20
17	B1	/	/	798	/	573,10
18	B2	/	/	670,5	/	414,35
19	B3	/	/	670	/	413,00
20	B4	/	/	818	/	580,00
21	C1	7,4	/	1349	/	/
22	C2	7,1	/	1662	/	/
23	C3	7,1	/	1115	/	/
24	C4	7,2	/	1309	/	/
25	djaarir-1-	7,49	34	5350	7,2	2670,00
26	djaarir-2-	7,46	30,7	5360	5,2	2680,00
27	tamerssite-1-	7,64	27,4	2000	4,6	920,00
28	tamerssite-2-	7,6	25,5	1691	6,7	813,00
29	O1	6,79	13,4	6150	/	/
30	O2	6,83	13,2	6150	/	/
31	O3	7,63	13,2	6150	/	/
32	O4	7,63	13,08	6150	/	/
33	O5	7,83	13,02	6150	/	/

4.2.1.1 La Température

Il est essentiel d'obtenir une connaissance précise de la température de l'eau car elle joue un rôle crucial dans la solubilité des sels et des gaz, dans la dissociation des sels dissous et par conséquent dans la conductivité électrique, ainsi que dans la détermination du pH (**J. L. Grondin, 1982**). La température a été systématiquement mesurée lors de la collecte des échantillons, les valeurs sont indiquées dans le diagramme se dessous (fig. 13). La température des eaux mesurées dans les 33 échantillons; elle varie entre de 13,02 °C à 34°C.

Tableau 5: Tableau de température.

T (°C) max	34,00
T (°C) min	13,02
T (°C) moy	18,48
Ecart-Type	5,70

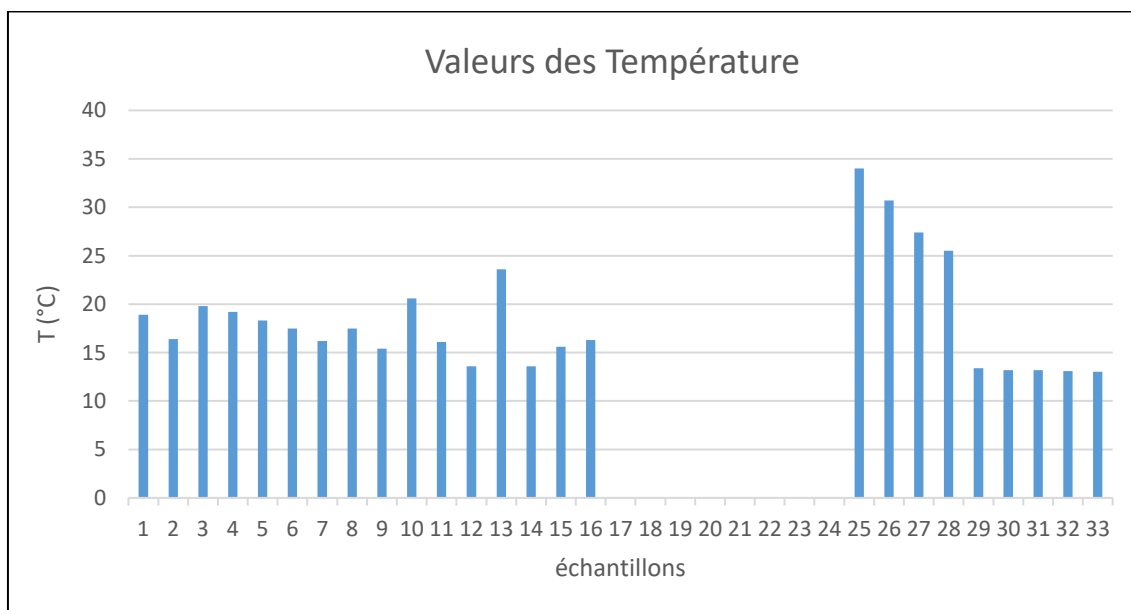


Figure 13: Diagramme de température.

À partir des données précédentes, nous avons réalisé une carte de répartition spatiale des températures des eaux souterraines mesurées in situ, divisée en trois classes, comme indiqué dans la figure 14. Les résultats montrent un faible écart dans les données des températures mesurées, ce qui suggère une relative stabilité thermique dans la zone d'étude. Cependant, des variations significatives de température sont observées entre différentes régions.

4.2.1.2 Le potentiel hydrogène (pH)

La valeur de pH nous renseigne sur l'acidité ou l'alcalinité d'une eau (**Hamed. M et al, 2012**). Le diagramme se dessous (fig. 15) représente les résultats obtenus. Les valeurs mesurées dans les 33 échantillons elles varient entre 6,58 à 7,89.

Tableau 6: Tableau de pH.

pH max	7,89
pH min	6,58
pH moy	7,25
Ecart-Type	0,39

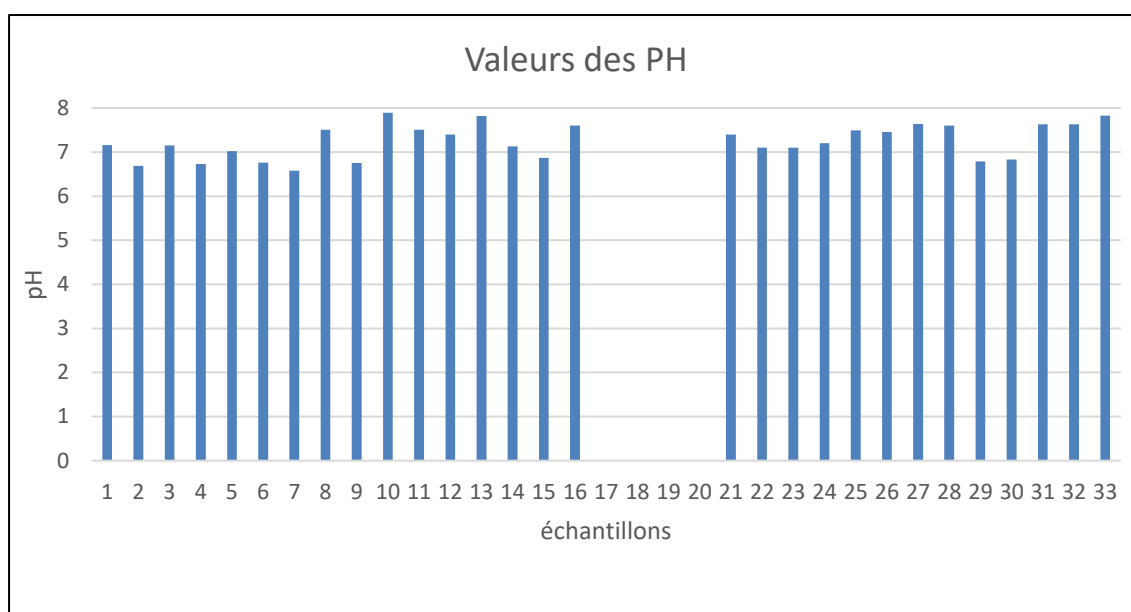


Figure 15: Diagramme de pH.

À partir des données précédentes, nous avons réalisé une carte de répartition spatiale des valeurs de pH des eaux souterraines prélevées. La carte est divisée en trois régions distinctes, comme illustré dans la figure 16. Dans la partie sud du bassin, nous observons une plage de valeurs de pH allant de 6,58 à 7,89. Cela suggère une légère acidité à neutralité dans cette zone. La région ouest présente également une gamme de valeurs de pH variant de 6,87 à 7,89, indiquant des conditions similaires à celles du sud. En ce qui concerne la région centrale, les valeurs de pH obtenues se situent entre 6,58 et 7,89, ce qui confirme la tendance observée dans les régions sud et ouest.

En revanche, la région Est se distingue par des valeurs de pH comprises entre 6,58 et 7,20. Cela peut indiquer une légère acidité dans cette zone par rapport aux autres régions du bassin.

L'analyse des valeurs de pH des eaux souterraines révèle une légère variation dans les différentes parties du bassin. Cependant, dans l'ensemble, les pH mesurés se situent dans une plage neutre à légèrement acide. Ces résultats sont importants pour comprendre la qualité et la chimie des eaux souterraines dans la zone d'étude, ce qui peut avoir des implications sur la santé des écosystèmes aquatiques et l'utilisation des ressources en eau souterraine.

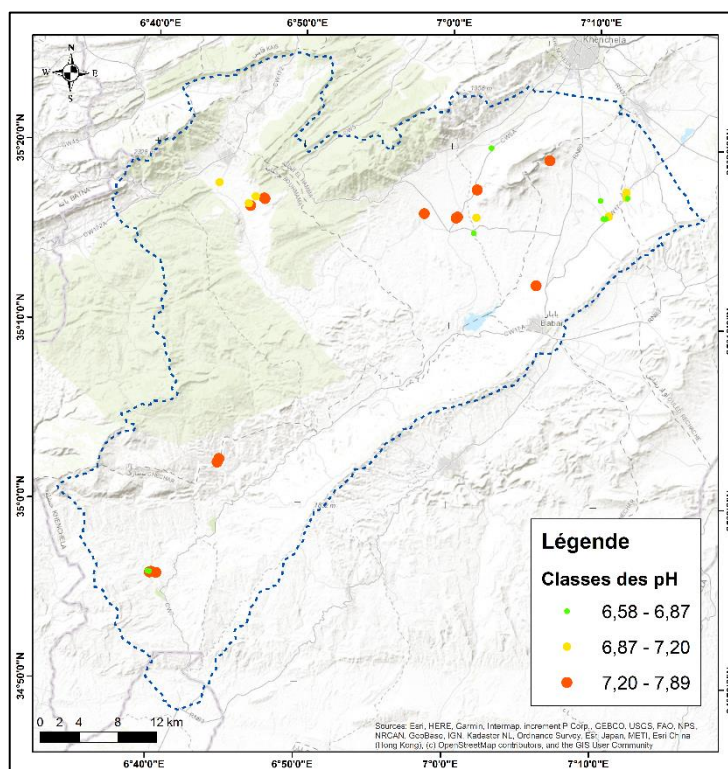


Figure 16: Carte des classes des pH.

4.2.1.3 La conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique de l'eau est le processus de mesure de sa capacité à conduire le courant électrique. Cette mesure est utilisée pour évaluer la présence de substances dissoutes dans l'eau (A.D. N'Diaye et al, 2013). Les résultats des 33 échantillons mesurés données des valeurs varient entre 374,10 et 6150 $\mu\text{s}/\text{cm}$, représentant dans le diagramme (fig. 17).

Tableau 7: Tableau de CE.

CE max	6150
CE min	374,10
CE moy	2074,47
Ecart-Type	1510,65

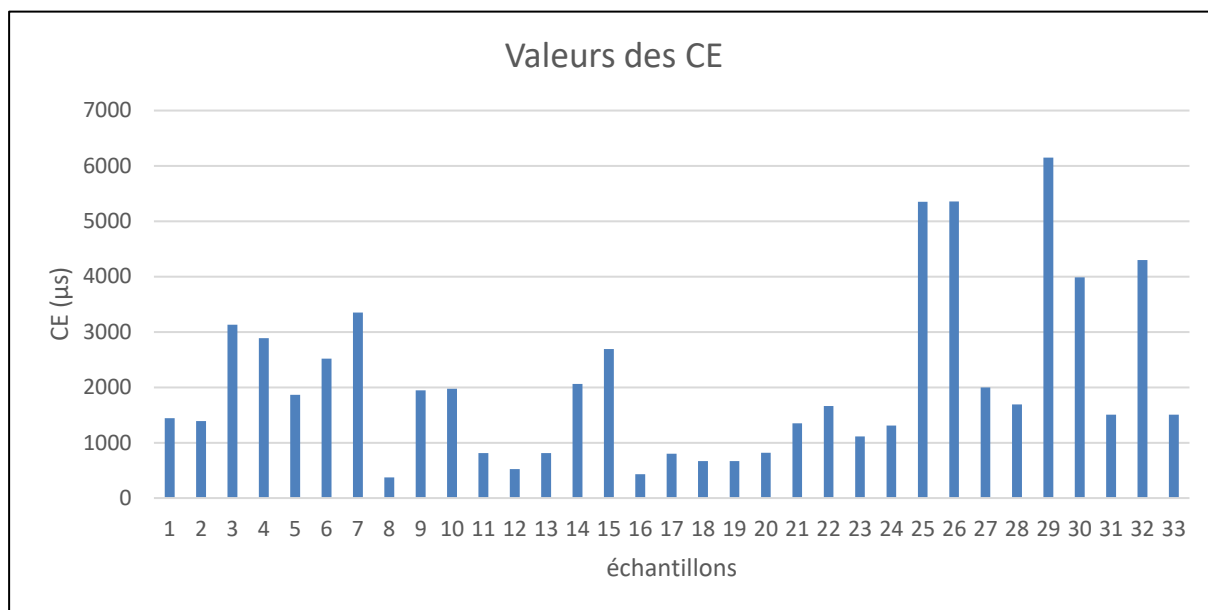


Figure 17: Diagramme de CE.

À partir des données précédentes, nous avons réalisé une carte de répartition spatiale des valeurs de conductivité électrique (CE) des eaux souterraines prélevées dans la zone d'étude. La carte, présentée dans la figure 18, est divisée en quatre classes distinctes. Dans la région Est, nous observons des valeurs de conductivité électrique allant de 374 à 6150 µs/cm en tant que valeur maximale. Ces valeurs relativement élevées peuvent être attribuées à une concentration plus élevée de sels dissous dans les eaux souterraines de cette zone.

La partie centrale présente des valeurs de conductivité électrique variant de 374 à 4300 µs/cm. Ces valeurs indiquent également une présence significative de sels dissous, bien que légèrement moins concentrés que dans la région Est. Dans la partie Ouest, les valeurs de CE se situent entre 1115 et 4300 µs/cm. Cette variation peut être due à des conditions hydrogéologiques spécifiques de cette région, ainsi qu'à une contribution potentielle d'eaux de surface plus minéralisées.

La partie Sud du bassin se caractérise par des valeurs de conductivité électrique comprises entre 1115 et 6150 µs/cm. Cette plage étendue suggère une forte minéralisation des eaux souterraines dans cette zone, ce qui peut être attribué à une évaporation accrue, à des apports de sels dissous provenant de formations géologiques ou à d'autres processus hydrologiques locaux.

L'analyse des valeurs de conductivité électrique des eaux souterraines révèle des variations significatives à travers la zone d'étude semi-aride. Ces résultats indiquent une minéralisation croissante des eaux souterraines d'est en ouest, ainsi que du sud vers le nord.

Cette information est cruciale pour évaluer la qualité et l'utilisation des ressources en eau souterraine dans la région, ainsi que pour comprendre les processus hydrogéologiques qui façonnent la composition des eaux souterraines dans un contexte semi-aride.

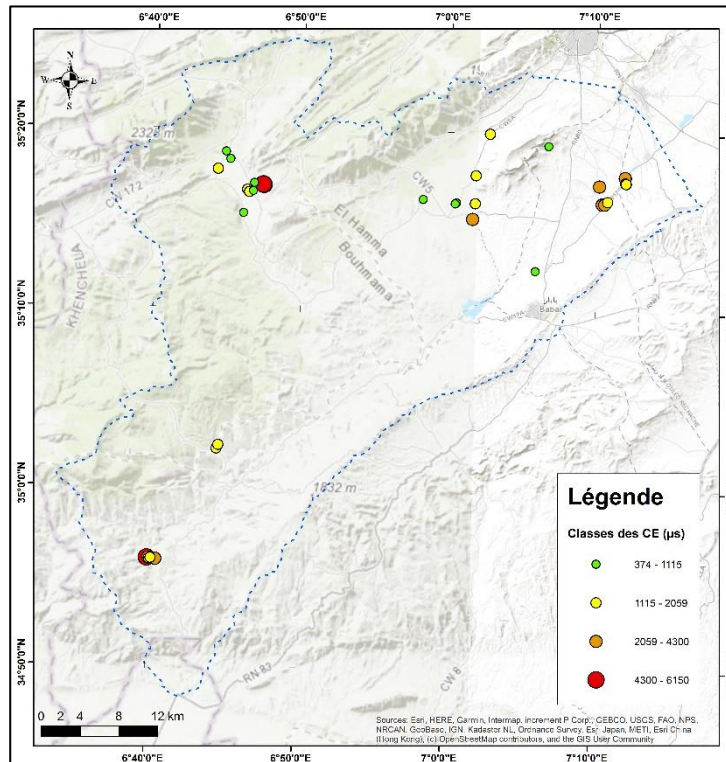


Figure 18: Carte des classes des CE.

4.2.1.4 Oxygène dissous

L'oxygène dissous est mesuré pour évaluer la quantité d'oxygène présent dans l'eau. Cette mesure est importante car l'oxygène dissous joue un rôle crucial dans la survie des organismes aquatiques tels que les poissons, les insectes aquatiques et les plantes aquatiques. La teneur en oxygène dissous influencé par la température et l'activité microbienne (Merabet, S, 2010). Les résultats obtenus dans les 33 échantillons mesurées données des valeurs varient entre 2,3 et 9,35 mg/l représentant dans le diagramme (fig. 19).

Tableau 8: Tableau d'oxygène dissous.

O- dissous max	9,35
O- dissous min	2,3
O- dissous moy	6,58
Ecart-Type	2,14

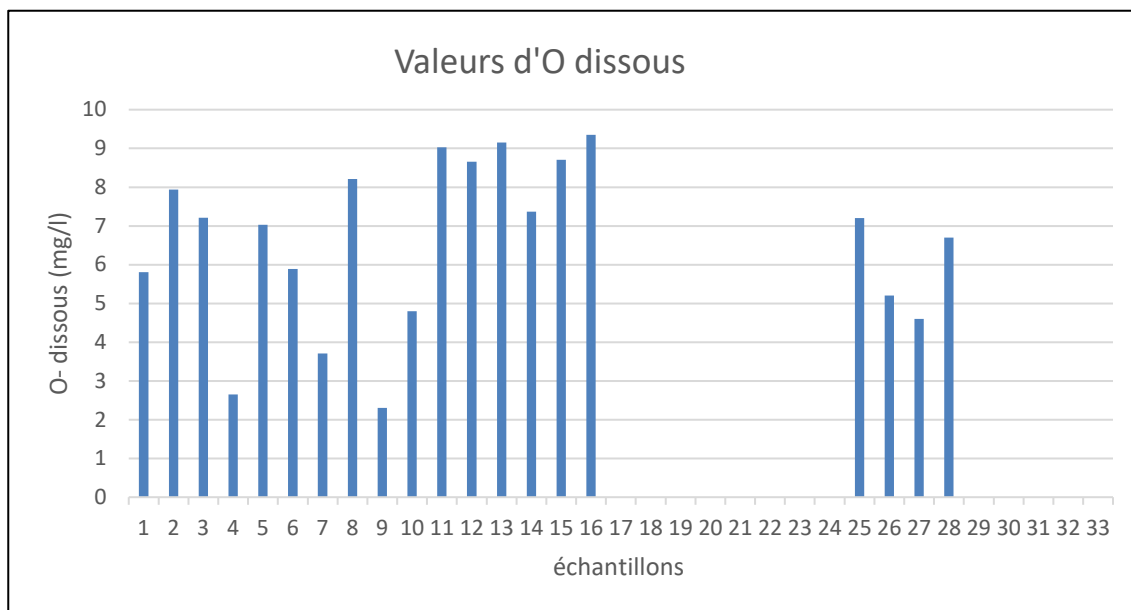


Figure 19: Diagramme d'oxygène dissous.

La carte ci-dessous (fig. 20) présente la répartition des valeurs de l'oxygène dissous, Dans le contexte de la zone d'étude semi-aride et des eaux souterraines minéralisées, les valeurs d'oxygène dissous fournissent des informations importantes sur la qualité et les conditions de l'eau. Les résultats montrent une distribution des valeurs qui peut être interprétée comme suit :

Dans les régions Sud et Ouest, où les eaux souterraines sont influencées par des conditions semi-arides, les valeurs d'oxygène dissous varient entre 3,71 et 7,94 mg/l en tant que valeurs maximales. Ces niveaux indiquent une concentration modérée à élever en oxygène dissous, ce qui peut être attribué à une aération naturelle de l'eau due à une exposition à l'atmosphère ou à des interactions avec les eaux de surface. La présence de valeurs plus élevées peut être le résultat de processus de recharge et d'infiltration dans ces régions.

Dans la zone centrale, les valeurs d'oxygène dissous sont plus élevées, se situant entre 7,94 et 9,35 mg/l. Cela peut être dû à une combinaison de facteurs, notamment une température plus basse, une minéralisation des eaux souterraines et une éventuelle influence de sources d'eau douce. Les valeurs plus élevées d'oxygène dissous dans cette zone peuvent indiquer une meilleure oxygénation de l'eau, ce qui peut être bénéfique pour la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques locaux.

Il convient de noter que la distribution des valeurs d'oxygène dissous est principalement contrôlée par la température. La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue

avec une augmentation de la température, ce qui peut expliquer pourquoi les régions avec des températures plus élevées peuvent présenter des valeurs d'oxygène dissous plus faibles.

En conclusion, les valeurs d'oxygène dissous dans les eaux souterraines de la zone d'étude semi-aride et minéralisée indiquent une gamme de concentrations modérées à élevées. La distribution spatiale des valeurs est influencée par des facteurs tels que l'aération de l'eau, les processus de recharge et la température. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur la qualité et les conditions des eaux souterraines dans la région, ainsi que sur leur potentiel à soutenir la vie aquatique.

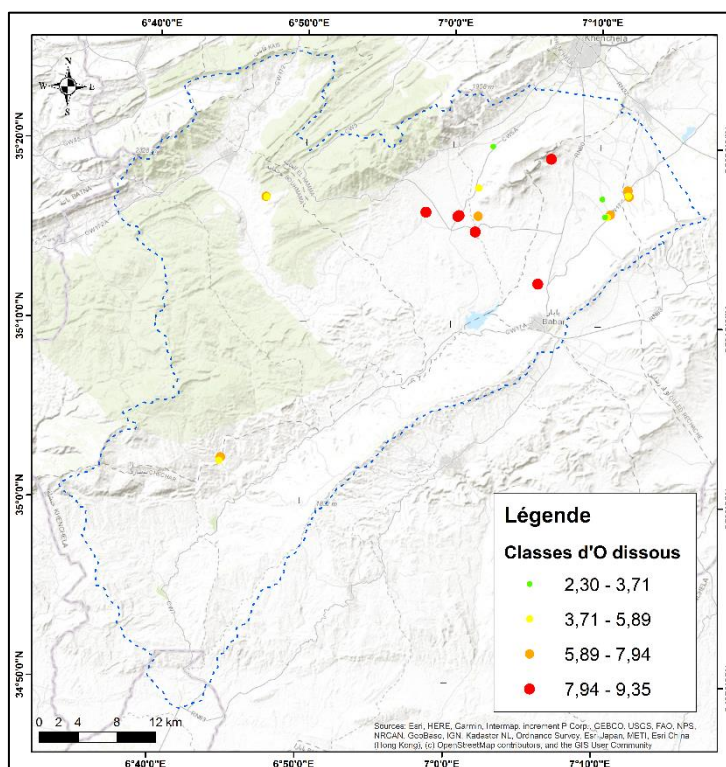


Figure 20: Carte des classes d'oxygène dissous.

4.2.1.5 TDS (Total Dissolved Solids)

Est une mesure de la concentration totale des solides dissous dans une solution. Il est utilisé comme indicateur de la qualité de l'eau, car une concentration élevée de TDS peut affecter son goût, sa pureté et sa potabilité (Aminot. A & Chaussepied. M, 1983). Les résultats obtenues dans les 33 échantillons mesurés donnent des valeurs variant entre 24,76 et 2680 mg/l représentés dans le diagramme (fig. 21).

Tableau 9: Tableau de TDS.

TDS max	2680
TDS min	24,76
TDS moy	1200,86
Ecart-Type	835,461

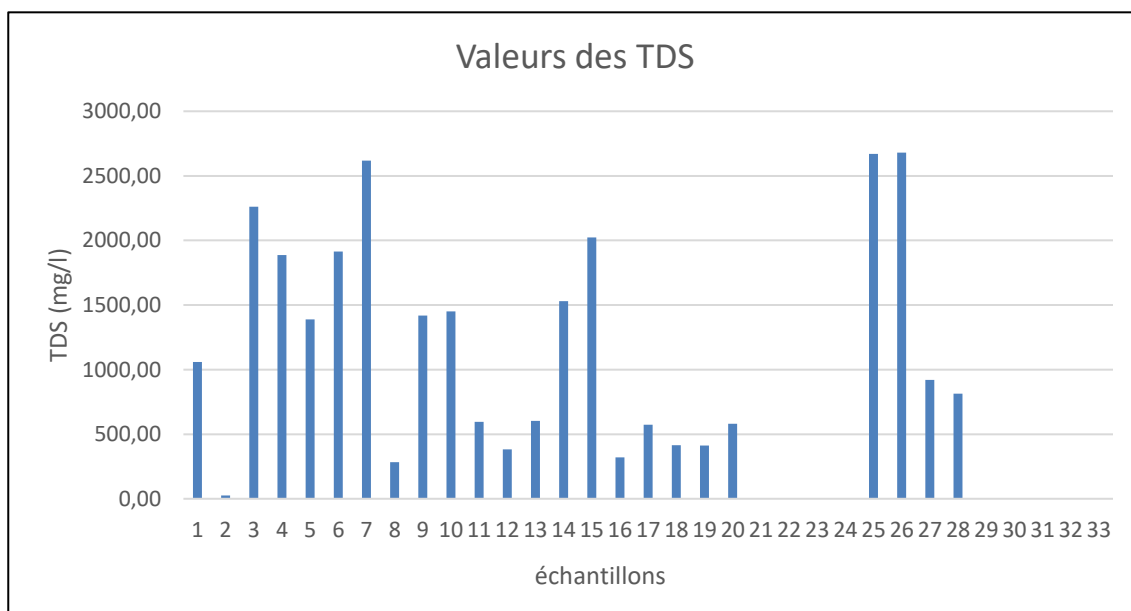


Figure 21: Diagramme de TDS.

Les résultats de la mesure des TDS (Total Dissolved Solids) dans les eaux souterraines de la zone d'étude fournissent des informations essentielles sur la minéralisation de l'eau. La carte ci-dessous (fig. 22) représente la répartition des valeurs de TDS des échantillons prélevés. Au Sud de la zone d'étude, les valeurs de TDS varient entre 414,35 et 1059,37 mg/l. Ces valeurs indiquent une minéralisation modérée de l'eau souterraine dans cette région. La présence de minéraux dissous peut provenir de sources naturelles, de l'érosion des sols ou d'autres processus géochimiques. Il convient de noter que ces valeurs se situent dans une gamme relativement basse par rapport aux autres régions du bassin.

Dans la région Ouest, une plus grande diversité de classes de valeurs de TDS est observée. On retrouve les quatre classes suivantes : 24,75 à 414,35 mg/l, 414,35 à 1059,37 mg/l, 1059,37 à 2022,86 mg/l et 2022,86 à 2680 mg/l. Cela suggère une variabilité significative de la minéralisation dans cette région, allant d'une faible minéralisation à une minéralisation élevée. Cette variation peut être le résultat de facteurs géologiques locaux, de la composition des sols et des roches environnantes, ainsi que de l'influence des eaux de surface.

Dans la région Est et au centre du bassin, la majorité des valeurs de TDS se situent entre 1059,37 et 2022,86 mg/l. Ces valeurs indiquent une minéralisation plus élevée de l'eau souterraine dans ces zones. La présence de concentrations élevées de solutés dissous peut être associée à des processus géologiques spécifiques, tels que la dissolution des minéraux dans les formations géologiques environnantes.

L'analyse des TDS dans les eaux souterraines permet de comprendre la composition chimique de l'eau, sa minéralisation et sa qualité. Les valeurs élevées de TDS peuvent avoir des implications sur la potabilité de l'eau, son utilisation pour l'irrigation agricole et son impact sur les écosystèmes aquatiques. Une surveillance continue des TDS est importante pour évaluer et gérer adéquatement les ressources en eau souterraine dans la zone d'étude.

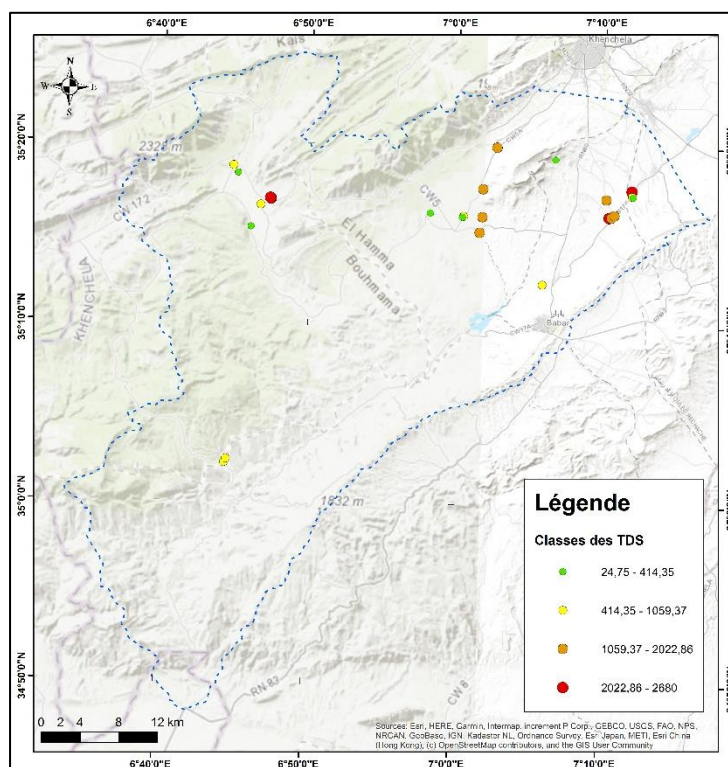


Figure 22: Carte des classes des TDS.

4.3 Discussion des résultats

Les résultats de la température indiquent une variation spatiale relativement faible. Les régions Sud et Nord présentent des températures plus basses, tandis que les régions Nord-Est et centrale ont des températures légèrement plus élevées. Ces différences peuvent être attribuées à des facteurs tels que la profondeur de l'aquifère, les conditions climatiques locales et les influences géothermiques. La présence de températures élevées dans la région Nord peut être liée à l'influence des eaux thermales.

En ce qui concerne le pH, les résultats montrent des valeurs comprises entre 6,58 et 7,89 dans toutes les régions étudiées. Ces valeurs se situent dans une plage légèrement acide à neutre, ce qui indique que les eaux souterraines dans l'ensemble de la zone d'étude sont relativement proches d'un pH neutre. Cela peut être attribué à la lithologie des formations géologiques qui influencent la composition chimique de l'eau.

La conductivité électrique (CE) fournit des informations sur la minéralisation de l'eau souterraine. Les résultats montrent une variation significative de la CE dans différentes régions de l'étude. Les régions Est et centrale présentent des valeurs plus élevées de CE, indiquant une plus grande minéralisation des eaux souterraines. Cela peut être dû à la présence de formations géologiques riches en minéraux solubles. Les régions Sud et Ouest montrent des valeurs de CE plus basses, indiquant une minéralisation relativement faible. La zone d'étude semi-aride peut jouer un rôle dans la concentration des minéraux dissous, ainsi que dans la recharge limitée des eaux souterraines.

Les valeurs d'oxygène dissous (OD) reflètent l'état de l'oxygénation de l'eau souterraine. Les régions Sud et Ouest présentent des concentrations modérées à élevées d'OD, ce qui peut être attribué à l'aération naturelle de l'eau ou à l'influence des eaux de surface. La région centrale montre des valeurs d'OD relativement élevées, indiquant une bonne oxygénation de l'eau souterraine. La distribution de l'OD est principalement contrôlée par la température, avec une diminution de la solubilité de l'oxygène avec une augmentation de la température.

Enfin, les résultats du TDS indiquent une variation importante de la minéralisation dans les différentes régions de l'étude. Les régions Est et centrale présentent des valeurs élevées de TDS, reflétant une minéralisation plus importante de l'eau souterraine. Les régions Sud et Ouest montrent des valeurs de TDS plus basses, indiquant une minéralisation

relativement faible. La présence de minéraux dissous peut être liée à des facteurs géologiques locaux et à des processus d'érosion.

En conclusion, les résultats obtenus à partir des mesures de température, pH, conductivité électrique, oxygène dissous et TDS fournissent des informations précieuses sur les caractéristiques des eaux souterraines dans la zone d'étude. Ces paramètres reflètent la géologie, le climat, la recharge des eaux souterraines et les influences anthropiques. Comprendre ces caractéristiques est essentiel pour une gestion durable des ressources en eau souterraine et pour évaluer l'impact potentiel sur les écosystèmes et les usages humains tels que l'agriculture et la consommation d'eau potable.

Conclusion général

Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux souterraines du Bassin versant d'Oued El Arab -Khenchela- (NE Algérie), nous a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif sur la réserve en eau de la région. Ainsi, cette étude a permis de dire que d'après :

L'étude géomorphologique de la région, le bassin versant de Oued El Arab a une superficie de 2098.05 km² et une forme carrée. Le temps de concentration est estimé à 17.31 heures avec une vitesse de concentration de 4.13Km/heure. La densité de drainage ($Dd=0.93\text{km/km}^2$) caractérise un réseau hydrographique bien développé.

Les données climatiques de la région étudiée, cette dernière a un climat semi-aride. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 310 mm pour une température moyenne annuelle de 15,12°C. L'évolution annuelle de ces deux paramètres permet de distinguer une période chaude et sèche et une période froide et humide. L'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 288 mm soit 92 % des précipitations moyennes annuelles. Le déficit agricole est de l'ordre de 395 mm pour la station de Babar.

L'étude géologique, les formations prédominantes sont d'âge Crétacé supérieur, Crétacé inférieur, Éocène inférieur, Quaternaire continentale, Cénomaniens, Trurontien, Trias marin. Ceci nous permet de dire que la zone d'étude a une perméabilité moyenne mais l'action de l'érosion reste importante sur la majorité de la surface du bassin surtout sur la zone à forte pente et dépourvue de végétation.

La région étudiée caractérise lithologiquement par la présence des formations suivantes : (Les Calcaires et Dolomies dures), (L'Alluvions et Sable), (Les Calcaires, Dolomies dures et Marnes), (Les Conglomérats), (Le Marne) répartis dans toute la région.

Le bassin versant d'Oued Al-Arab a une forme allongée ($Kc= 1,61$), l'altitude la plus élevée dans la zone est de 2258 m et l'altitude la plus basse est de 146 m au point d'exutoire. La zone se trouve dans la classe R6 selon Classification de l'ORSTOM, où ($Ds= 382,81$).

Les résultats de l'étude de 33 sites d'eau souterraine ont montré que les paramètres physico-chimiques sont dans les limites normales. Lorsque la température varie entre 13.2 et 34 T°C, pour l'analyse de pH 6.58 à 7,89, la mesure de la conductivité électrique a montré des valeurs de 374,10 à 6150 $\mu\text{s/cm}$. La mesure de l'oxygène dissous a montré des valeurs de 2,3

à 9,35 mg/l. La mesure de la concentration totale des solides dissous a donné des valeurs comprises entre 24,76 et 2680 mg/l.

Références bibliographiques

- 1) A.D. N'Diaye et al. (2013). Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique de l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/148>.
- 2) Aminot, A., Chaussepied, M. (1983). Manuel des analyses chimiques en milieu marin CNEXO, Brest, p 395.
- 3) Amiour, H., Boulaloua, M. (2019). Géométrie et épaisseur des formations du Mio-Plio-quadernaire du bassin de Rémila-Khenchela-.
- 4) Aouachria, Miloud. (2008). Analyses morphodynamique et hydropluviométrique De la Vallée de Oued El Arab et leurs Impacts Sur la pérennité Du Barrage de Babar (Magister en aménagement du territoire). Université El Hadj Lakhdar -Batna-.
- 5) Benmessaoud, H., & Kalla, M., & Driddi, H., & Beghami, Y. (2008). Utilisation des données satellitaires pour le suivi des changements d'occupation du sol et de la dégradation du couvert végétal dans les zones semi-arides: cas de la région Sud des Aurès (Algérie). Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, 18, 58-68.
- 6) Boubelli, Salim. (2009). Identification et mise en évidence des formations hydrogéologiques de la wilaya de Khenchela (Nord-Est algérien) Analyse et synthèse de données (Magister Option: Hydrogéologie). Université BADJI MOKHTAR - ANNABA-.
- 7) Brauman, K. A., Siebert, S., & Foley, J. A. (2013). Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security a global analysis. Environmental Research Letters, 8(2), 024030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024030>.
- 8) Chenaker, Maroua. (2022). L'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le nord-est de l'Algérie Caractéristiques hydrochimiques et évaluation de la qualité de l'eau Cas de : Province de Khenchela (Master en écologie et environnement). Université ABBES LAGHROUR -KHENCHELA-.
- 9) Chermime, N. (2013). Contribution à l'étude de la forme optimale de la section transversale sur les différents tronçons de l'oued el arab wilaya de Khenchela. <http://bib.univ-ueb.dz:8080/jspui/handle/123456789/7773?mode=simple>.

- 10) Gaagai, Aissam. (2009). Etude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de babar sur oued el arab region est de l'algerie (Magister en Hydrogéologie). Université de BATNA.
- 11) Gorde, S. P., & Jadhav, M. V. (2013). Assessment of water quality parameters: a review. *J Eng Res Appl*, 3(6), 2029-2035.
- 12) Gouaidia, L., Nabil, D., Noureddine, Z., & Salah, L. M. (2017). Origine de la minéralisation des eaux souterraines d'un aquifère dans une zone semi-aride, cas de la nappe de la merdja, NE Algerien. *International Journal of Environment & Water*, vol 6, Issue 2, 2017.
- 13) Hamed, M., & Guettache, A., & Bouamer, L. (2012). Etude des propriétés physicochimiques et bactériologiques de l'eau du barrage Djorf-Torba Bechar. [Mémoire d'Ingénieur d'état en Biologie]. Université de Bechar.
- 14) J. L. Grondin, (1982). Paramètres physico-chimiques des eaux naturelles mesures in situ. Note technique N° 04. Laboratoire de géologie ,société nationale Elf-Aquitaine (Production), Boussens, France.
- 15) Khabtane, Abdelhamid. (2015). contribution à l'étude des caractères morphologiques, physiologiques et des marqueurs moléculaires pour l'évaluation du polymorphisme phénotypique et génétique des espèces du genre Tamarix dans différents écotopes de la zone steppique de KHENCHELA (EST ALGERIEN) (Docteur en sciences Filière: Biologie-écologie végétale). Université DES FRERES MENTOURI - CONSTANTINE-.
- 16) McCutcheon, S. C., Martin, J. L., & Barnwell, T. O., Jr. (1993). Water quality. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology* (pp. 11.1–11.73). New York: McGraw-Hill.
- 17) Meddour, Larbi. (2013). L'état actuel et le devenir des centres des noyaux anciens dans les villes moyennes en Algérie « Cas de Khenchela » (Magister En architecture). Université MOHAMED KHIDER -BISKRA-.
- 18) Merabet, S. (2010). Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux brutes et distribuées du barrage réservoir de beni Haroun [Mémoire de magister chimie analytique]. Université mentouri de Constantine.
- 19) Merghad, Ghizlane & Rahal, Fayrouz. (2022). Analyse morphologique et hydrologique d'un bassin versant d'oued el-arab (Master academique filiere : Ecologie et Environnement). Université ABBES LAGHROUR -KHENCHELA-.

- 20) Lafitte, R. (1939). Structure et relief de l'Aurès (Algérie). Bulletin de l'Association de géographes français, 16(119), 34-40. <https://doi.org/10.3406/bagf.1939.7028> .
- 21) Seiler, K. (2008). Man's Impact on Groundwater Systems. INIS. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN%3a42081550.
- 22) Shahdany, S. M. H., et al. (2018). Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. Agricultural Water Management, 204, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.014>.
- 23) Sigg, L., Behra, P., & Stumm, W. (2014). Chimie des milieux aquatiques.
- 24) Srinivasa, Raju. K., et Nagesh, Kumar. D. (2004). Irrigation Planning using Genetic Algorithms. Water Resources Management 18, 163–176. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000024738.72486.b2>.
- 25) Tirkey, P., Bhattacharya, T., & Chakraborty, S. (2013). Water quality indices- important tools for water quality assessment: a review.
- 26) Wilhite, D.A. (Ed.). (2000). Droughts: A Global Assesment (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315830896>.
- 27) Yang, Y et al. (2016). Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. Sci Rep 6, 23284. <https://doi.org/10.1038/srep23284>.

Résumé

Cette étude porte sur la minéralisation des eaux souterraines dans le bassin versant d'Oued l'Arab, situé dans la wilaya de Khenchela, au nord-est de l'Algérie. Ce bassin se caractérise par un climat semi-aride et une topographie irrégulière. Les paramètres de température, pH, conductivité électrique, oxygène dissous et TDS ont été mesurés in situ. Les résultats mettent en évidence des variations spatiales de la minéralisation des eaux souterraines dans la région d'étude. Les régions Est et centrale présentent des niveaux plus élevés de conductivité électrique et de TDS, indiquant une plus grande concentration de minéraux dissous. En revanche, les régions sud et ouest affichent des niveaux de minéralisation relativement plus faibles. Ces variations de la minéralisation sont attribuées aux formations géologiques locales traversées par les eaux souterraines, qui peuvent libérer des minéraux solubles dans l'eau. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des propriétés chimiques de l'eau souterraine et peuvent orienter les décisions de gestion et de préservation de cette ressource cruciale dans un contexte semi-aride.

Mots-clés

Bassin versant, minéralisation, eaux souterraines, paramètres physico-chimiques, mesures in situ.