



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Popular and democratic republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

The ministry of higher Education and Scientific Research

جامعة عباس لغرور خنشلة

Abbes Laghrour University, Khenchela

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculty of Nature Science and life

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Spécialité :Écologie Fondamentale et Appliquée

Présentée en vue de l'obtention de Diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE en Ecologie et Environnement



Intitulé

**Caractérisation physico-chimiques des eaux
souterraines de la région
Kantina - Khenchela**

Soutenue le 23 juin 2024

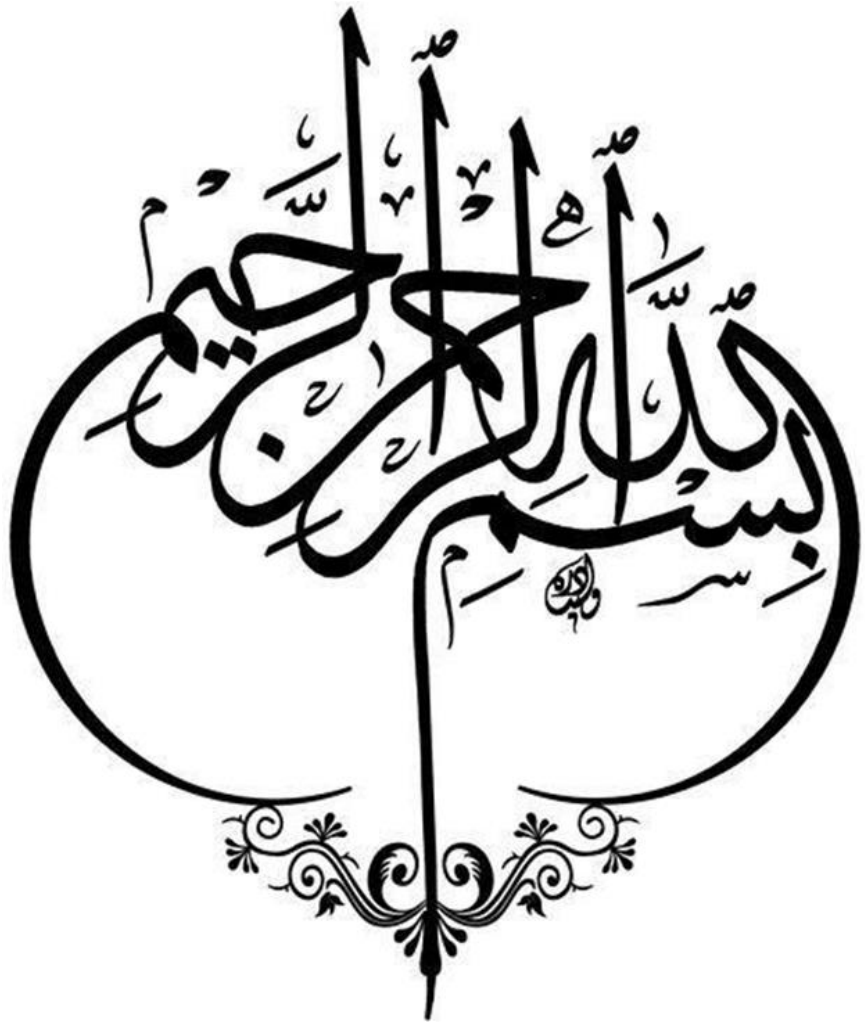
Présenté par :

- MERAH Noureddine
- LAICHE Suzane

Devant le jury composé

Président : Dr. MEZHOUD Amel	MAA	UNIV. Khenchela.
Encadrant : Dr. BELKOUM Noureddine	MCB	UNIV. Khenchela.
Examineur : Dr. BERAKNI Cherifa	MCA	UNIV. Khenchela.

Année universitaire :2023/2024



Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots justes, tous les mots ne sauraient exprimer ma gratitude, mon amour, mon respect et ma reconnaissance. C'est pourquoi je dédie humblement ce modeste travail à :

À mon père, qui m'a encouragé et qui est ma source de force pour aller jusqu'au bout. Cet homme m'a toujours soutenu et a cru en moi. Je ne saurais jamais le remercier assez pour tout ce qu'il a fait pour moi.

À celle qui m'a donné la vie, m'a élevée et, surtout, m'a aimée. Il n'y a pas assez de mots pour décrire à quel point tu es importante pour moi.

Je t'aime, maman!

À ma sœur Mimi, la moitié de mon âme, qui est toujours proche de moi, me soutient et m'a énormément aidée dans mon parcours.

À mon cher FRÈRE, mon ami d'enfance, mon conseiller, qui m'a assisté dans les moments difficiles et qui m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles. Zinne

À ma chère cousine LINDA, qui m'a toujours encouragée, conseillée et soutenue dans mon parcours universitaire.

À ma chère amie HOUDA, ton soutien et tes encouragements ont été précieux tout au long de mon parcours. Je suis reconnaissant d'avoir une amie comme toi dans ma vie.

À mes adorables princesses, SILLIN et JOURI.

À ma binôme, ton soutien et tes encouragements ont été essentiels pour accomplir ce projet ensemble avec succès. Merci pour tout.

À mon petit frère ASSIL.

À ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur.

ET à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

FARSE.

Dédicace

Louange à Dieu pour l'amour, la gratitude et la reconnaissance du commencement jusqu'à la fin.

Le voyage n'a pas été court et la route n'a pas été facile, mais je l'ai accompli.

Louons Dieu qui guide les débuts et nous conduit à la fin par Sa grâce et Sa générosité.

Je dédie ce succès à mon moi ambitieux, qui a commencé avec une ambition et l'a terminé par un succès, ainsi qu'à tous ceux qui ont travaillé avec moi pour achever mon parcours universitaire.

*Avec tout mon amour, je dédie le fruit de ma réussite et de mon diplôme :
À la lumière qui a éclairé mon chemin et à la lampe dont la lumière ne s'éteindra jamais, et qui a déployé des efforts pendant des années pour que je grimpe les échelons du succès. À celui que je porte le nom avec fierté. À celui qui a enlevé les épines de mon chemin pour me préparer la voie de la connaissance. Je lui avais promis ce succès, alors voici, j'ai tenu ma promesse et je le lui ai dédié.*

"Mon cher et mon modèle, mon père bien-aimé."

Je dédie mon diplôme au paradis de Dieu sur terre :

*À celle qui m'a appris la morale avant les lettres. Au pont qui me mène au paradis.
Au premier soutien de ma vie et à la main invisible qui a enlevé les épines et les difficultés de mon chemin.*

"Ma mère, mon amie et ma compagne de route."

"Je dédie mon diplôme à mes inspirateurs de succès : ceux qui m'ont soutenu avec amour dans mes faiblesses, ont balayé les problèmes sur mon chemin, préparé le terrain, semé la confiance et la persévérance en moi. Ils ont été mon soutien et les épaules sur lesquelles je me suis toujours appuyé. Ils ont toujours été l'ombre de ce succès."

"Mes frères"

"À celui qui demeure éternellement au fond de mon cœur, mon grand-père, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis."

Sans oublier mon binôme pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

Et enfin, celui qui lui a dit "elle l'a eue" et je l'ai eue pour elle, malgré tout, je l'ai eue. Je n'aurais pas pu le faire sans la grâce de Dieu. Voici le grand jour, le jour où j'ai accompli mes études et des années de travail acharné. J'en rêvais jusqu'à ce qu'elles se concrétisent par sa grâce et sa générosité, pour la joie de l'accomplissement. Louange à Dieu, par qui le bien et l'espoir se répandent et nous submergent de joie et de bonheur qui nous font oublier nos peines.

Suzane.

Remerciements

« La connaissance est la seule chose qui s'accroît lorsqu'on la partage. »

Avant tout, louange à **Dieu** le Tout-Puissant, le Miséricordieux, de nous avoir donné le courage, la force, la santé et la persévérance, et de nous avoir permis de finaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous exprimons notre profonde gratitude au **Docteur Belkoum Noureddine** de l'Université Abbes Laghrour Khenchela pour ses encouragements constants et la sympathie dont il nous a toujours entourés. Nous le remercions vivement pour avoir choisi ce sujet et pour nous avoir accordé l'opportunité de travailler sous sa direction éclairée. Son dynamisme, sa disponibilité, et ses précieux conseils ont grandement enrichi nos recherches. Sa confiance en nous et ses qualités humaines exceptionnelles ont été des moteurs essentiels de notre progression. Encore une fois, merci pour tout.

Nous adressons nos sincères remerciements à la présidente du jury, **Dr. MEZHOUD Amel**, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance. Nous vous exprimons ici notre sincère reconnaissance et notre profond respect.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Dr. BERAKNI Cherifa**, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de faire partie du jury de ce travail et de l'examiner. Qu'elle trouve ici l'expression de notre reconnaissance la plus sincère.

Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance à **tous les enseignants** du Département d'Écologie et d'Environnement pour leur soutien et leur expertise tout au long de notre parcours académique. Leurs conseils avisés et leur dévouement ont considérablement enrichi nos connaissances dans ce domaine spécifique. Nous leur sommes profondément reconnaissants pour l'impact positif qu'ils ont eu sur notre formation académique.

Résumé :

Les eaux souterraines de Kantina présentent d'importantes variations chimiques induites par l'aridité du climat, la dissolution minérale et l'activité agricole. L'utilisation des techniques géochimiques a identifié que l'évolution des faciès chimiques se fait depuis le pôle bicarbonaté calcique vers un faciès majeur de type sulfaté calcique. Ces faciès chimiques sont déterminés par l'interaction eau-roches, la dissolution et les précipitations minérales, à travers les échanges cationiques tout au long de l'écoulement de l'eau vers son exutoire et l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels et en fertilisants dans les périmètres irrigués. Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, notamment sous la forme de calcite et de dolomite. Par contre, les minéraux évaporitiques (gypse et halite) tendent à la dissolution.

Mots clés : Kantina, eaux souterraines, faciès chimique, irrigation, fertilisants.

Abstract:

The groundwater of Kantina exhibits significant chemical variations induced by the aridity of the climate, mineral dissolution, and agricultural activity. Geochemical techniques have revealed that the evolution of the chemical facies progresses from a calcium bicarbonate base towards a predominant calcium sulfate facies. These chemical facies are shaped by water-rock interactions, dissolution, and mineral precipitation, through cationic exchanges occurring as water flows towards its outlet and as irrigation waters laden with salts and fertilizers infiltrate the irrigated areas. The calculation of the mineral saturation index in the water shows that only carbonate minerals tend to precipitate, specifically in the forms of calcite and dolomite. Conversely, evaporitic minerals (gypsum and halite) tend to dissolve.

Keywords: Kantina, Groundwater, Chemical Facies, Irrigation, Fertilizers.

الملخص:

تظهر المياه الجوفية في كانتينا تغيرات كيميائية هامة ناجمة عن جفاف المناخ، وذوبان المعادن، والنشاط الزراعي. كشفت التقنيات الجيوكيميائية أن تطور الأوجه الكيميائية يتقدم من قاعدة البيكربونات الكالسيومية إلى الوجه الكبريتاتي الكالسيومي السائد. تتشكل هذه الأوجه الكيميائية نتيجة تفاعلات الماء مع الصخور وذوبان المعادن وترسيبها، من خلال التبادل الكاتيوني الحاصل أثناء تدفق المياه نحو مخرجها وتسرب مياه الري المحملة بالأملاح والمسمدات في المناطق المروية. يظهر حساب مؤشر التشبع بالمعادن في المياه أن المعادن الكربوناتية فقط هي التي تميل إلى الترسيب، وخصوصاً في أشكال الكالسيوم والدولوميت، بينما تميل المعادن البخارية (الجبس والملح) إلى الذوبان.

الكلمات المفتاحية: كانتينا، المياه الجوفية، الأوجه الكيميائية، السقي، المسمدات.

Table des Matières

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

Chapitre 01 : Présentation du secteur et contexte géologique

1	Description du bassin versant.....	1
1.1	Situation du bassin versant.....	1
1.2	Relief et caractéristiques hydrographiques.....	3
1.3	Occupation du sol.....	7
1.3.1	Description de la végétation.....	7
2	Introduction.....	9
2.1	Géomorphologie.....	9
2.2	Géologie.....	10
2.2.1	Géologie Régionale.....	10
2.3	Stratigraphie	10
2.3.1	Les formations superficielles.....	11
2.3.1.1	Les alluvions actuelles du lit mineur	11
2.3.1.2	Les terrasses alluviales récentes	11
2.3.1.3	Les terrasses alluviales anciennes	11
2.3.1.4	Les colluvions	11
2.3.1.5	Les colluvions grossières.....	12
2.3.2	Les formations anciennes	12
2.3.2.1	Le Tortonien.....	13
2.3.2.2	Le Campanien	13
2.3.2.3	Le Santonien	13
2.3.2.4	Le Coniacien	14
2.3.2.5	Le Turonien.....	14
2.3.2.6	Le turonien basal	15
2.3.2.7	Le Cénomaniens supérieur.....	15
2.4	Piézométrie.....	27

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUE CLIMATOLOGIQUE.

Introduction.....	19
1. Données climatiques.....	20
1.1. Les précipitations	20
1.1.1. Précipitations moyennes mensuelles	20
1.1.2. Les Précipitations annuelles et leurs variabilités.....	21
1.2. Les températures	21
1.2.1. Variations des températures moyennes mensuelles	22
1.2.2. Variations des températures moyennes annuelles	22
2. Caractérisation du climat	23
2.1. Diagramme pluviothermique.....	23
2.2. Indice de Martonne.....	23
3. Le bilan hydrique.....	24
3.1. Estimation de l'évapotranspiration.....	24
3.1.1. Évapotranspiration potentielle (ETP)	24
3.1.2. L'évapotranspiration réelle (ETR).....	25
3.2. Le bilan hydrologique selon Thornthwaite	26
3.3. Interprétation du bilan hydrique	27
4. ruissellement superficiel et l'infiltration	28
Conclusion	29

CHAPITRE III : GEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES.

Introduction.....	30
1. Méthodes et stratégie de travail.....	30
1.2 Analyse physico-chimique.....	31
1.2.1. Mesures in situ.....	31
2. Variation spatiale des paramètres physico-chimiques.....	35
2.1. Paramètres physiques.....	35
2.1.1. La Température.....	36
2.1.2. Le potentiel hydrogène (Ph).....	36
2.1.3. Conductivité électrique.....	37
2.2 Evaluation spatiale des éléments chimiques majeurs.....	38
2.2.1. Le calcium (Ca ⁺⁺).....	38
2.2.2. Le Magnésium (Mg ⁺⁺).....	39

2.2.3.	Le Sodium Na ⁺ et le potassium K ⁺	39
2.2.4.	Bicarbonates (HCO ₃ ⁻).....	40
2.2.5.	Les chlorures (Cl ⁻).....	41
2.2.6.	Les sulfates (SO ₄ ⁻²).....	42
3.	Le faciès chimique des eaux échantillonnées.....	43
3.1.	Diagramme de Piper.....	43
3.2.	Diagramme de Schoëller et Berkalov.....	44
4.	Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.....	45
5.	Géochimie thermodynamique.....	47
6.	Conclusion.....	49
	Conclusion générale.....	51
	Références bibliographiques.....	54

Liste des figures

Figure 1 :	situation géographique de sous bassin versant de Tagharist	2
Figure 2 :	Délimitation du bassin versant de Tagharist partir du modèle numérique de terrain SRTM avec le réseaux hydrographiques et les ordres des oudes (DHWK,2006).....	5
Figure 3 :	carte des pentes du BV de Tagharist.....	6
Figure 4 :	carte d'occupation de sol du BV de Tagharist.....	8
Figure 5 :	carte géologique du BV de Tagharist.....	15
Figure 6 :	délimitation de sous bassin versant de Tagharist sur la carte géologique de W.khenchela.	16
Figure 7 :	Carte géologique de la cuvette de l'oued Tagharist.....	16
Figure 8 :	Profile géologique AA' de l'oued Tagharist.....	17
Figure 9 :	Carte piézométrique d'après (Houha, 2007).....	18
Figure10 :	Les précipitations moyennes mensuelles pour période de 21 ans (1998-2018).....	20
Figure11 :	Les précipitations moyennes annuelles pour période de 21 ans (1998-2018).....	21
Figure12 :	Températures moyennes mensuelles à la station d'Al Hamma (1998-2018).....	22
Figure13 :	Températures moyennes annuelle à la station d'Al Hamma (1998-2018).....	22
Figure14 :	Courbe pluviothermique (1998-2018).....	23
Figure15 :	Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de khenchela par la méthode de thornthwaite.....	27
Figure16 :	les échantillons dans des flacons en plastiques.....	30
Figure17 :	Carte d'inventaire des eaux de la zone d'étude.....	31
Figure18 :	Répartition des températures (°C) des eaux de la zone d'étude.....	36
Figure19 :	Répartition des Ph des eaux de la zone d'étude.....	37
Figure20 :	Répartition des conductivités (c25°C).....	38
Figure21 :	Répartition des concentrations de Ca (mg/l).....	38
Figure22 :	Répartition des concentrations de Mg (mg/l).....	39
Figure23 :	Répartition des concentrations de Na (mg/l).....	40
Figure24 :	Répartition des concentrations de K (mg/l).....	40
Figure25 :	Répartition des concentrations de Hco3 (mg/l).....	41
Figure26 :	Répartition des concentrations de Cl (mg/l).....	42
Figure27 :	Répartition des concentrations de So4 (mg/l).....	43
Figure28 :	Diagramme de Piper.....	44
Figure29 :	Diagramme de Schoëller et Berkalov	45
Figure30 :	Relation entre les éléments majeurs et les chlorures.....	46

Liste des tableaux

Tableau1: Les caractéristiques du bassin versant de O.Tagharist.....	4
Tableau2: La superficie occupée par l'agriculture à Yabous pour l'année 2012/2013.....	7
Tableau3: Les coordonnées géographiques de la station d'Al Hamma.....	20
Tableau4: Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de kenchela.....	27
Tableau5: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux échantillonnés.....	35
Tableau6: Indice de saturation des eaux échantillonnés.....	48

Liste des Abréviations

BV : Bassin versant.

CE : Conductivité Électrique.

ETP : Évapotranspiration potentielle.

ETR : Évapotranspiration réelle.

F : Forage.

NPK : désigne les trois principaux éléments nutritifs présents dans les engrais : azote (N), phosphore (P) et potassium (K).

Ph : Potentiel d'hydrogène.

P : Précipitation.

R : Ruissellement.

T : Température.

Introduction Générale

Introduction Générale :

À l'échelle mondiale, les ressources en eau potable sont composées à 69 % d'eaux de surface (glaciers, lacs et rivières) et à 30 % d'eaux souterraines. Contrairement aux eaux de surface, facilement exploitables mais sujettes aux pollutions anthropiques, les eaux souterraines sont moins exposées et globalement de meilleure qualité.

Les périodes de sécheresse qui ont durement affecté de nombreuses régions du monde durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle ont mis en lumière la précarité des réserves en eaux souterraines et de surface dans les zones semi-arides et arides.

En Algérie, la rareté et le caractère aléatoire des précipitations, ainsi que le phénomène de désertification, de plus en plus préoccupant et résultant de la dégradation des ressources naturelles sous l'action de l'homme et de la rigueur des conditions climatiques, menacent non seulement les agglomérations, mais aussi les terrains agricoles et les infrastructures d'irrigation, notamment dans la région de Khenchela.

La région de Yabous, située au nord-est de l'Algérie, fait face à d'énormes difficultés liées à une faible pluviosité et à une répartition inégale des précipitations du sud au nord. Ceci est dû aux longues périodes de sécheresse sévère qui l'ont affectée au cours des dernières décennies.

La surexploitation des eaux souterraines, liée à la forte pression démographique et aux activités agropastorales, a accentué la baisse des niveaux de la nappe de Yabous (El Kantina). Il est donc nécessaire de mener, parallèlement à l'exploitation de cette nappe, des études globales pour la reconnaissance des ressources en eau en vue d'une gestion durable.

Sachant que l'accès à une eau de bonne qualité, tant pour la consommation que pour l'agriculture, est une condition essentielle au développement d'un pays, une meilleure connaissance de l'origine et des mécanismes de dégradation qualitative et quantitative des eaux contribuerait à une gestion durable de l'eau. Ainsi, une gestion efficace et durable des ressources en eaux souterraines nécessite une compréhension approfondie du fonctionnement des réservoirs sollicités, en particulier dans les zones semi-arides et arides où la baisse des précipitations affecte la recharge des nappes. (Sekkiou, S. 2020)

L'objectif de notre étude est de clarifier l'influence de l'activité anthropique, de la lithologie et des paramètres climatologiques sur la qualité physico-chimique des eaux et leur origine. Dans ce travail, nous allons étudier la variation des concentrations des éléments chimiques caractérisant la salinité afin de comprendre la qualité des eaux dans cette région. Pour cela, nous avons adopté la méthodologie suivante :

- La première partie sera consacrée à une synthèse bibliographique, en tenant compte de la présentation du milieu. Nous nous attacherons à définir le cadre général de la zone d'étude, afin d'en tirer une monographie géographique, géologique et géophysique.
- La deuxième partie sera consacrée à l'étude des données climatiques, permettant d'analyser les facteurs influençant le climat de la région d'étude. Cette analyse nous renseignera sur le type de climat, le comportement hydroclimatologique et le bilan hydrologique.

- La troisième partie, consacrée aux méthodes et à l'analyse, consistera à prélever des échantillons d'eau couvrant l'ensemble de la plaine. Les résultats obtenus seront présentés, interprétés et discutés.
- Enfin, une conclusion générale résumera le travail effectué.

***CHAPITRE I : PRESENTATION DU SECTEUR ET
CONTEXTE GEOLOGIQUE***

Introduction :

Ce chapitre présente le cadre géographique et géologique de la zone d'étude. Cette présentation constitue un préalable indispensable à toute étude de l'eau souterraine à une échelle régionale. Elle permet de dresser un bilan des connaissances générales sur le bassin à partir d'une revue bibliographique. Après avoir défini les limites géographiques de l'étude et le cadre naturel, quelques rappels sur l'histoire géologique des Aurès sont nécessaires, comme décrits dans la littérature par de nombreux auteurs (Laffite, 1939; Guiraud, 1973; Vila, 1977; Houha, 2007).

1 Description du bassin versant

1.1 Situation du bassin versant

L'oued Tagharist est situé dans la wilaya de Khenchela, à environ 40 km du chef-lieu de la wilaya.

Le bassin versant de l'oued Tagharist, qui fait partie du bassin des hauts plateaux constantinois, chevauche deux zones : les hautes plaines de Yabous et Ouled Fadhel, qui sont disséquées par un chevelu hydrographique très dense, et le massif montagneux des Aurès au sud. Le bassin hydrographique est divisé en deux parties distinctes :

- Au nord : le Djebel Tkhizrant (altitude 1540-1796 m), avec un prolongement vers l'est du site par le Djebel Khaled (1421 m) et le Djebel Fersane (1500 m).
- Au sud : le Djebel Yabous (1700-1750 m) longe tout le site, coiffé par le Djebel Chelia (2328 m) qui culmine.

Le bassin est couvert en majorité par la commune de Yabous (wilaya de khenchela) et par en petite partie par la commune de FoumToub (wilaya de batna). Il limité par les cordonnées Lambert :

X = 864 000 au nord ; Y = 241 500 à l'Est

X = 851 750 au sud ; Y = 231 000 à l'ouest

La commune de Yabous est limitée par les communes limitrophes suivantes :

- Au Nord : Commune de Ouledfadel ;
- Au Sud : Commune de Bouhmama et Inoughissene ;
- A l'Est : Commune de Taouziant et Chelia ;
- A l'Ouest : Commune de Foum El Toub et Ichemoul.

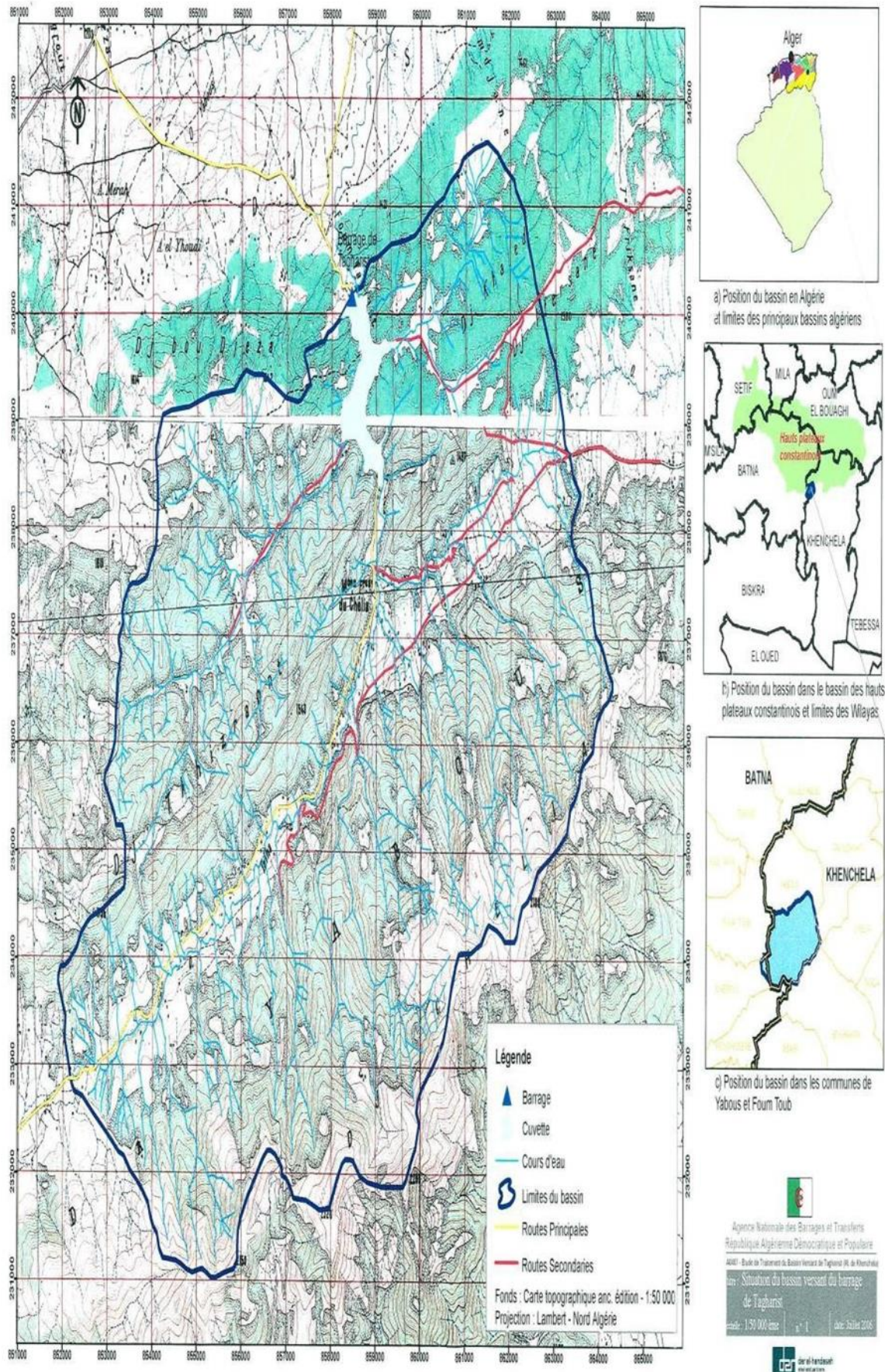


Figure 1: Localisation du sous-bassin versant de l'oued Tagharist (DHWK, 2006).

1.2 Relief et caractéristiques hydrographiques

Le bassin versant de Tagharist couvre une superficie de 77Km² dans la commune de Yabous. Sur le plan physique, le territoire de la commune de Yabous est constitué :

- Par un relief montagneux au Sud totalisant une superficie de 9677 ha soit 62,2 % de la superficie totale.
- Par des plaines au Nord avec 5025 ha, soit 32 % de la superficie totale.
- Un réseau hydrographique constitué essentiellement par des Oueds au régime torrentiels dont le principal est l'oued Talha.

Le bassin versant de tagharist est entièrement contenu dans le sud de Yabous dans la partie montagneuse. Il est ainsi caractérisé par un relief montagneux assez varié divisé en trois parties distinctes :

- Le relief montagneux, caractéristique des Aurès où culmine à 2308m (Ras Keltoum), le plus haut sommet de l'est de l'Algérie, est la barrière montagneuse qui prolongeant les hauts plateaux de l'Atlas, marquante brutalement sur la face Sud, est accidenté, avec de fortes et très fortes pentes disséquées par l'érosion à différents stades ; en bas de pentes le long des oueds on trouve quelques petites surfaces de terre, soumises à une érosion intense.
- La zone en dehors de quelques piedmonts et plateaux est très accidentée avec des pentes très élevées et caillouteuse en surface.
- La partie centrale, le long des oueds principaux, laisse apparaître une plaine agricole.

La superficie du sous BV de tagharist est de 77 km². Les altitudes extrêmes minimales et maximales du bassin versant (BV) sont respectivement de 1191 m et 2311 m, avec une moyenne de 1564 m.

La carte des pentes obtenue à partir du SIG, est illustrée par la figure 2. La pente moyenne du BV est égale à $I_{BV} = 26,07 \%$, avec un minimum et un maximum de 0,47% et 89,1%, respectivement, et un écart type de 13,7%.

L'altitude moyenne du bassin versant (H_{moy}) est calculée par l'expression suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum(H_i \cdot S_i)}{S_{BV}}$$

La courbe hypsométrique est de 1580 m. le périmètre et la longueur du thalweg le plus long, mesurés à l'aide du SIG, égalent à 50,3 km et 13,5 km, respectivement. Sa pente moyenne exprimée en % est évaluée à 21,9%, avec un minimum et un maximum de 2,8 % et 55%, respectivement, et

un écart type de 11%. La distance depuis l'exutoire du bassin jusqu'à la projection du centre du bassin versant sur le thalweg le plus long est de 4,7 km (DHWK, 2006).

La largeur moyenne (l_{moy}) du BV est calculée la relation suivante : $l_{moy} = S/L$;(km) S: est la superficie du BV en km^2 . Et L: la longueur du thalweg le plus long en km. L'application numérique donne $l_{moy} = 5,70$ km (DHWK, 2006).

Le réseau hydrographique du bassin versant est illustré par la figure 2. La densité de drainage (Dd) représentant les longueurs des cours d'eau de tous les ordres divisés par la superficie du bassin versant est de $1,4$ km/km^2 (DHWK, 2006).

Le coefficient d'allongement est obtenu à partir de la relation : $C_a = L^2/S$, d'où $C_a = 2,37$. L'indice de compacité est calculé suivant la relation : $K_c = 0,28P/\sqrt{S}$, d'où $K_c = 1,61$.

Le temps de concentration calculé par la moyenne des deux formules de Bransby William et de Kirpich est de 100 minutes (DHWK, 2006).

Caractéristiques du bassin versant :

tableau 1:Les caractéristiques du bassin versant de O.Tagharist.

Bassin principal	Hauts plateaux constantinois
Oued	Tagharist
Surface	$S = 77$ Km^2
Périmètre	$P = 50$ m
Altitude maximale	$HM = 2311$ m
Altitude minimale	$Hm = 1191$ m
Altitude moyenne	$H = 1564$ m
Longueur du thalweg principal	$L = 13,5$ Km
Largeur moyenne du BV	$L_{moy} = S/L = 5,7$ Km
Indice de pente	$I (BV) = 26$ %
Pente maximal	$I = 89$ %
Pente minimal	$I = 0,5$ %
Indice de compacité	$Kc = 1,61$
Temps de concentration	1h40 min
Densité de drainage	$Dd = 1,4$ Km/Km^2

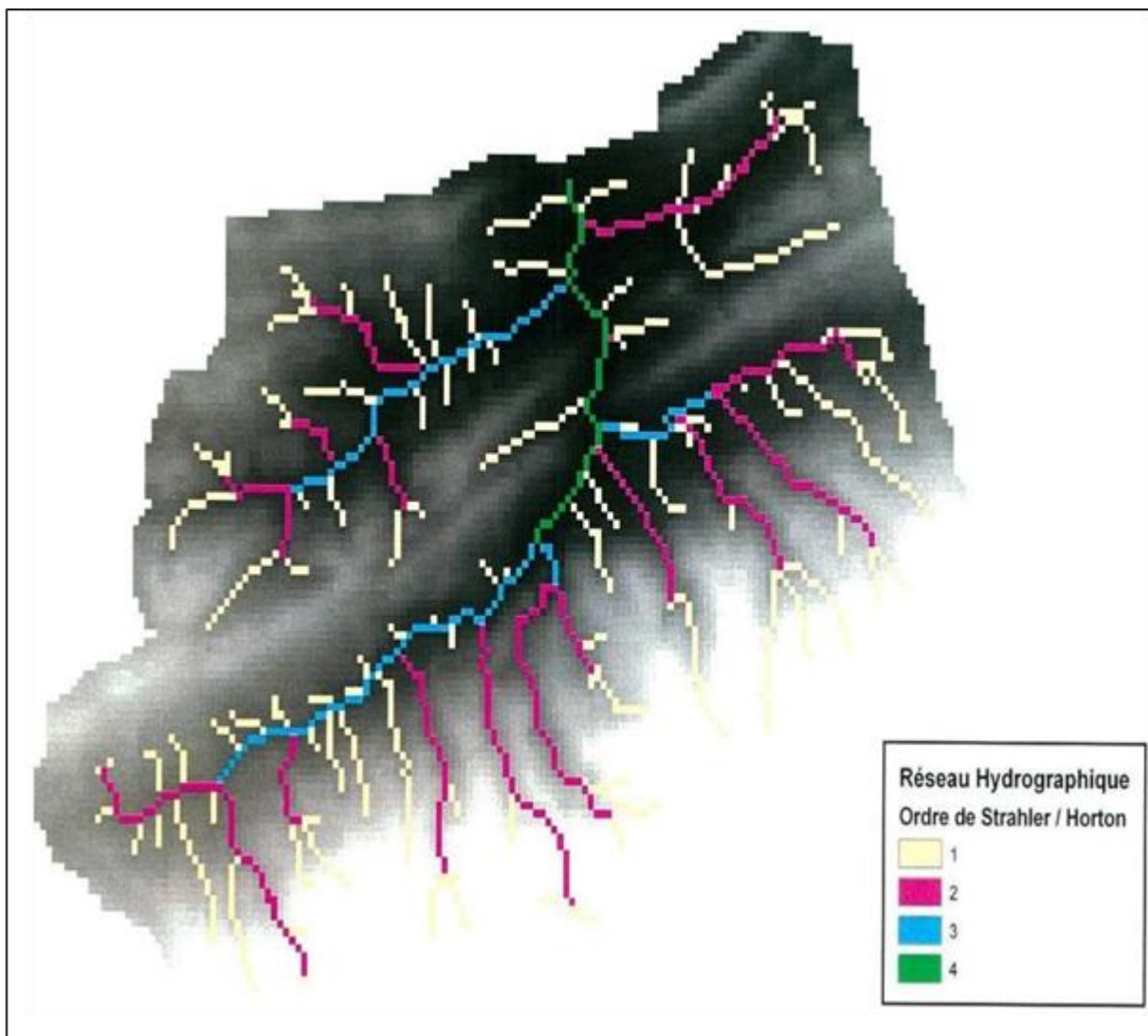


Figure 2 : Délimitation du bassin versant de l'oued Tagharist à partir du modèle numérique de terrain SRTM, avec le réseau hydrographique et les ordres des oueds (DHWK, 2006).

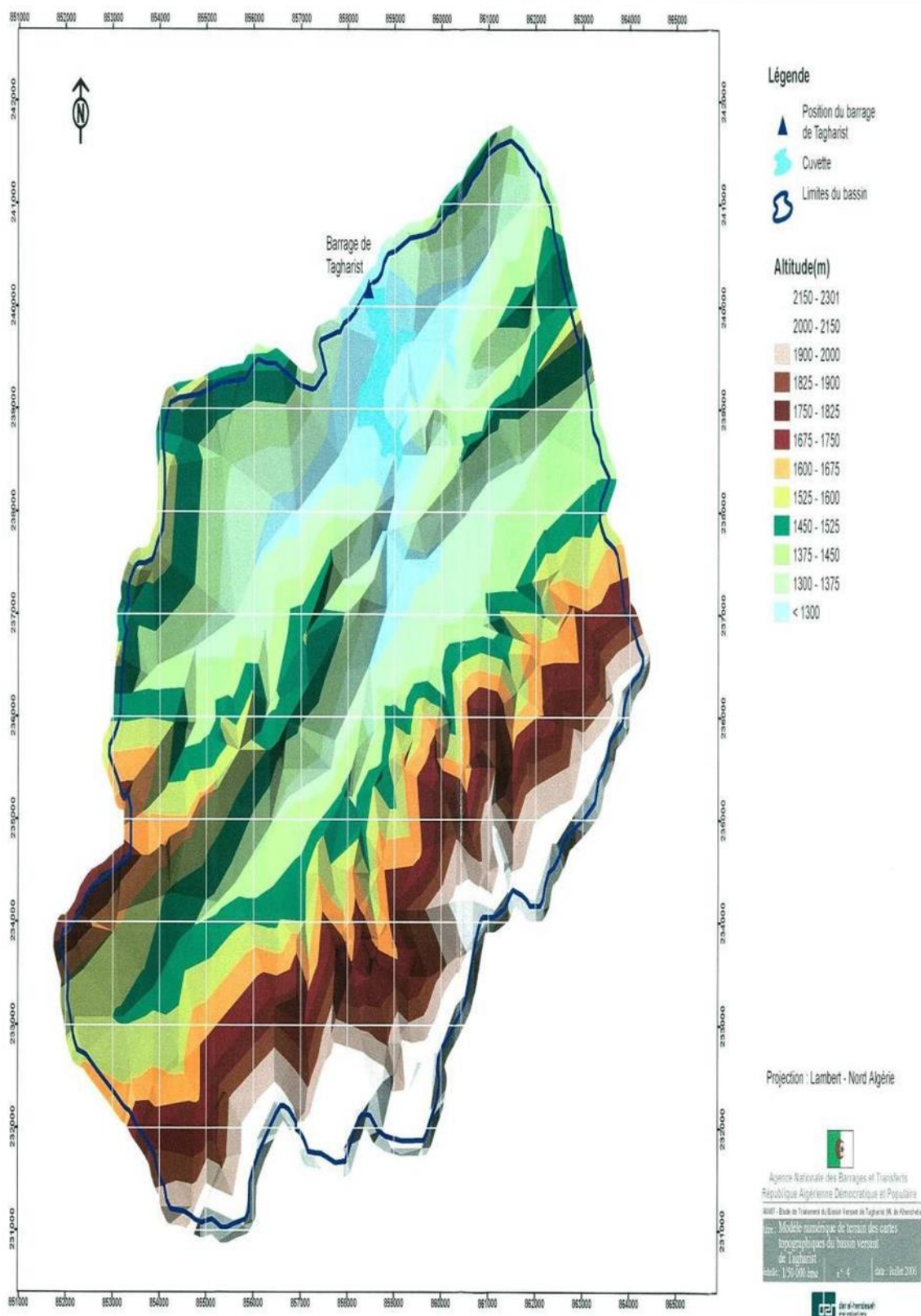


Figure 3 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Tagharist (DHWK, 2006).

1.1 Occupation du sol

1.1.1 Description de la végétation

La couverture végétale du bassin versant de Tagharist est importante (plus de 80%) et elle est essentiellement forestière, surtout dans les zones élevées, en dehors de quelques zones de cultures dans les bas-fonds. En effet, l'espace forestier de la commune de Yabous couvre une superficie de 9 308 ha et appartient aux forêts domaniales de Béni Oudjena.

En général, la végétation et le couvert forestier jouent un rôle important en matière de stabilisation des terres dans les périmètres de BV et de rétention des eaux de ruissèlement. Aussi elles constituent un support non négligeable dans le développement économique et social des régions montagneuses.

Les essences forestières d'implantation naturelle, observées dans le bassin versant de Tagharist, constitue des forêts denses prédominantes de pins d'Alep, des forêts de chênes verts, de cèdres sur les hautes altitudes (Chélia), de garrigues ou forets dégradées constituées principalement de : genet, ciste, bruyère et lentisque, Diss.

Tableau 2 : la superficie occupée par l'agriculture à yabous pour l'année 2012/2013

classe de l'occupation de sol	superficies (ha)
Maraichage	26,5
Arbre fruitière plantées	395
Cereals	2520

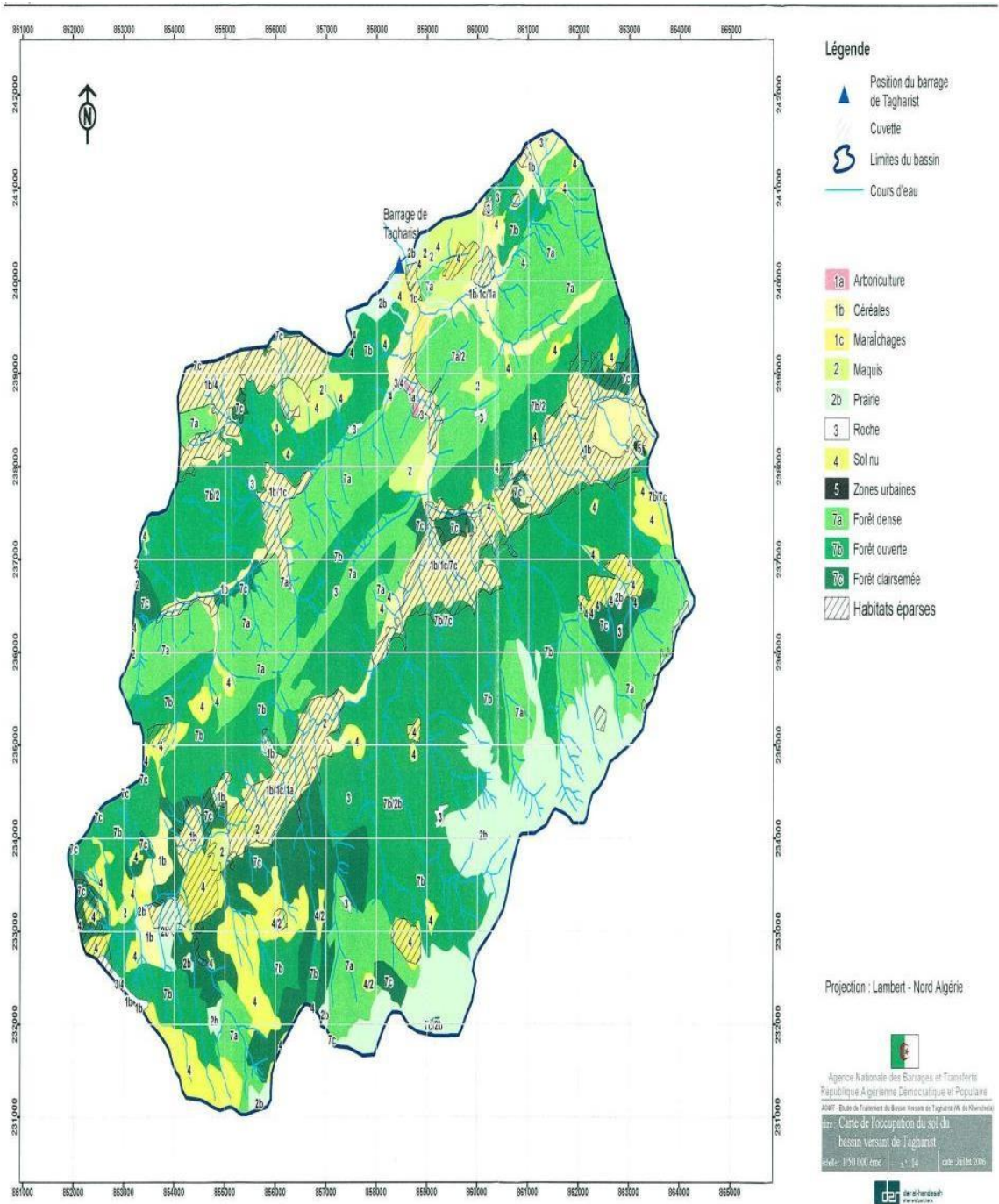


Figure 4:carte d'occupation de sol du BV de Tagharist (DHWK,2006).

2. introduction

Le site de l'oued Tagherist est situé dans la wilaya de Khenchela, au pied nord du Djebel Chélia, en amont immédiat du village de Yabous (figure 1). Ce projet comprend la construction d'une digue d'environ 40 mètres de hauteur sur l'oued Tagherist, dont le bassin versant couvre une superficie de 77 km².

2.1 Géomorphologie

Le bassin versant de l'oued Tagharist constitue une zone de transition orographique entre le massif élevé du chélia au sud (2 326 m), à relief escarpé, et le bassin de touffana, au nord, à relief plus adouci, de type collinaire (900 à 1 200 m). Cette morphologie prévaut sur plus de 100 km dans la direction Est-Ouest, entre Batna et khenchela, où le réseau hydrographique débouche dans le bassin néogène de Timgad, par des gorges très entaillées franchissant les formations atlasiques anciennes (FoumToub, FoumTagharist, Foum El Gueiss).

Le bassin versant de l'oued l'oued Tagharist présente un écoulement sensiblement sud-nord. Il traverse des structures géologiques assez orthogonales à sa direction d'écoulement et débouche dans la plaine de Yabous, en franchissant une série de barres gréseuses qui soulignent la limite entre la plaine et le domaine montagneux (photo 2). Dans ce contexte morpho-structural, la vallée est étroite et la prédominance des alluvions grossières dans le lit mineur, témoigne d'un écoulement torrentiel de ce cours d'eau. Le réseau hydrographique qui lui est associé est représenté essentiellement par deux thalwegs en rive droite. Au niveau des lieux-dit : Touchent et Aghlane, et un thalweg en rive gauche, au niveau de Diar el Gaïd, ces thalwegs, orientés NE-SO, contrairement au cours d'eau principal, conformes à la direction des couches et creusés dans les formations les plus faciles à l'érosion (marnes et pélites crétaées).

La vallée de l'oued Tagharist et ses affluents sont délimités par des reliefs suffisamment boisés, de pentes moyennes de 20 à 40° , à l'exception de quelques barres rocheuses qui forment des arêtes bien visibles sur le terrain. La dénivelée entre la vallée et les sommets de la cuvette ne dépasse pas 150 m et le raccordement topographique se fait progressivement par une accumulation de colluvions à dominante argileuse.

La végétation est de type maquis, parsemée de quelques bois de chênes. Une petite agriculture vivrière est développée sur les terrasses alluviales étroites de l'oued Tagharist et ses glacis latéraux.

2.3 Géologie

2.3.1 Géologie Régionale

La structure géologique du nord de l'Algérie se divise en trois principales structures géomorphologiques :

- L'Atlas Tellien
- Le Haut plateau entre l'Atlas tellien et l'Atlas Sahrien
- L'Atlas Saharien

L'Atlas Tellien consiste en une succession de chaînes de montagne et de vallées parallèles au littoral avec des plateformes juxtaposées (bassins alluvionnaires) et un relief topographique haut avec un niveau maximal d'environ 2 000 m.

Le haut plateau entre l'Atlas tellien et l'Atlas Sahrien est une région de plaines élevées (à environ 1 000 m) ayant une topographie relativement plate.

L'Atlas Saharien est une chaîne de montagnes très plissées.

La zone autour du site de bassin est située entre l'extrémité sud du bassin constantinois (Etendue sud du Haut plateau) et l'Etendue Nord de l'Atlas Saharien (Figure 1).

Donc, comme mentionné ci-dessus et indiqué sur le Figures 1, Le bassin de l'oued est situé près de la frontière des deux structures géologiques principales suivant, nommément :

- L'Atlas saharien des aurès, au Sud, représenté par les formations rocheuses des périodes Jurassique-Crétacée, Il est caractérisé par de grand plis d'échelle pluri- kilométrique, orientés NE-SO, à matériel essentiellement crétacé.
- Le bassin néogène de Timgad, qui forme la partie Sud du bassin inter-montagneux de Constantine. Il est constitué de matériel miocène (dépôts Néogènes et Quaternaires), et de structure plissée d'échelle plus modeste (kilométrique).

Ces deux ensembles sont affectés par une tectonique plicative récente (mio-pliocène) à l'origine des plis NE-SO et par des failles sub-méridiennes à composante essentiellement décrochant. Le réseau hydrographique descendant de cette partie orientale des Aurès est étroitement contrôlé par ces accidents, tel que celui de l'oued de Tagharist que nous verrons plus en détail dans ce qui suit.

2.4 Stratigraphie

La série stratigraphique du site de l'oued Tagharist et de sa cuvette est rendue relativement aisée à identifier, par suite d'une structure d'ensemble monoclinale assez redressée et d'une

végétation clairsemée. Cette série est représentée par des formations superficielles récentes, quaternaires, et des formations plus anciennes d'âge miocène supérieur et créacé.

2.4.1 Les formations superficielles

2.4.1.1 Les alluvions actuelles du lit mineur :

Elles sont représentées par des blocs roulés de 10 à 20 cm de diamètre, des galets et graviers et du sable grossier en faible proportion. Ces alluvions sont de nature calcaire prédominante et gréseuse. Au droit des variantes de digue, leur épaisseur est de 3 à 4 m. Elles conservent la même épaisseur plus en amont. Au lieu-dit Diar El Gaïd, d'après les coupes de puits réalisés lors de l'étude de faisabilité (DHWK, 2006).

2.4.1.2 Les terrasses alluviales récentes :

Elles sont limoneuses en surface et deviennent plus grossières à partir de 0.5 m de profondeur. Leur épaisseur moyenne d'après les coupes des puits PE3 à PE8, de l'étude de faisabilité (DHWK, 2006) est de l'ordre de 2 à 3 m. elles sont très étroites, parfois inexistantes, et ne dépasse pas la largeur de 100 m de part et d'autre de l'oued Tagharist.

2.4.1.3 Les terrasses alluviales anciennes :

A l'affleurement, la présence de terrasses alluviales anciennes n'est témoignée que par un lambeau accroché en rive gauche de l'oued Tagharist à une altitude de 5 m environ au-dessus de la cote du lit mineur (zkakat). Cette terrasse de 2 à 3 m d'épaisseur, est formée par des alluvions grossières (galets et bloc calcaires et gréseux) dans une matrice limoneuse en faible proportion. L'examen des coupes des puits réalisés. Lors de l'étude de faisabilité, dans la recherche des zones d'emprunt (DHWK, 2006), révèle l'existence de ces terrasses anciennes. En effet, sous les colluvions argileuses de Diar el Gaïd, ont traversé des alluvions grossières de 2 à 3 m d'épaisseur, à des altitudes suffisamment élevées pour ne plus les confondre avec les terrasses alluviales récentes qui elles, jalonnent l'oued Tagharist.

2.4.1.4 Les colluvions :

Elles sont distribuées sur les surfaces de faible déclivité (5 à 15% de pente) et jalonnent les berges du réseau hydrographique principal (l'oued Tagharist et ses affluents). Malgré leur hétérogénéité et leur variation d'épaisseur, on peut distinguer des colluvions fines, argilo-limoneuses, et des colluvions grossières à blocs et galets enrobés dans une matrice argileuse.

Les colluvions fines, de couleur brune, sont localisées pour l'essentiel :

- En aval du barrage, à l'entrée sud village de yabous, Dans la cuvette, au lieu-dit Diar el Gaid. C'est dans ces colluvions qu'ont été définies les 4 zones d'emprunt de matériaux

fins, lors de l'étude de faisabilité. Les nombreux puits creusés (30) dans ces colluvions révèlent une épaisseur moyenne de 3 à 6 m d'argile renfermant souvent une proportion non négligeable de galets et graviers.

2.4.1.5 Les colluvions grossières :

Elles sont particulièrement développées à proximité des 3 variantes de digue, de part et d'autre de l'oued Tagharist (bouhazra), et à l'extrémité sud de la retenue (cantina, ras el hanchir, aghhlane).

- A proximité des variantes de digue, le versant rive gauche, de faible déclivité, est tapissé par des colluvions argileuses à gros blocs gréseux (1 à 10 m³). Les sondages anciens et récents (coupes géologiques BB', cc 'et DD') (DHWK, 2006) montrent que cette formation, d'épaisseur variable, peut atteindre 8 à 10 m. les blocs proviennent de l'érosion des barres tortonniennes situées plus en amont des colluvions tandis que la matrice argileuse provient de l'altération locale des marnes du Campanien. Le versant rive droite est assez distinct de son opposé. Il montre une bande d'argile plastique à galets, de 5 à 10 m d'épaisseur, entraîne dans un mouvement de fluage (coupe géologique cc') (DHWK, 2006) et un épais manteau de colluvion à galets et blocs de taille décimétrique à demi-métrique (coupe géologique cc', lieu-dit bouhazra) (DHWK, 2006).
- A l'extrémité sud de la retenue, une vaste zone d'épandage s'est développée au pied du massif du Chélia. Cette morphologie a favorisé une accumulation de débris rocheux, anguleux, à dominante calcaire, enrobés dans une matrice plus fine. L'épaisseur de ces colluvions reste indéterminée, elle peut cependant atteindre une dizaine de mètres dans leur partie centrale.

2.4.2 Les formations anciennes

A partir de la première barre rocheuse qui domine au sud, le village de Yabous et en remontant le débouché (Foum) de l'oued Tagharist vers l'intérieur de la cuvette, une succession de reliefs découpés par quelques arêtes rocheuses vives, montrent une série stratigraphique représentée par le Miocène supérieur (Tortonien) et Crétacé supérieur (Cénomaniens à Sénonien).

La similitude des faciès du Crétacé supérieur ne permet pas de délimiter précisément ses différents sous-étages sur le terrain, tels qu'établis sur la carte géologique au 1/50 000 de touffana (DHWK, 2006). Les limites que nous avons adoptées pour le lever géologique de la cuvette, au 1/5 000, sont basées essentiellement sur les grandes variations lithologiques, ponctuées par des barres calcaires aisément cartographiables.

2.4.2.1 Le Tortonien

Il est représenté par une alternance de bancs gréseux massifs dont on peut dénombrer 5 barres, et d'argiles grises, qui forment le premier relief au sud de Yabous. Les barres gréseuses, qui peuvent atteindre 10 m d'épaisseur vers le sommet de la série, sont blanchâtres, grossiers et localement conglomératiques (dragées de quartz pilulaire). Les argiles sont souvent silteuses et renferment elles-mêmes des bancs gréseux d'échelle métrique. Elles forment des combes recouvertes par des éboulis. Le passage des argiles aux grès est souligné par une transition d'argiles sableuses verdâtres puis de bancs décimétrique gréseux.

Au-dessus de la première barre gréseuse de la série, est intercalé un banc de calcaire métrique dur, organogène (débris d'huitres) que l'on observe bien au cimetière de Bouhazra. Ce banc calcaire, concordant dans la série de base argilo-gréseuse, correspond au faciès carbonaté fossilifère du langhien-serravalien (S. Guellal, 1973).

La série tortonienne atteint 400 m d'épaisseur. Sa base est située en aval immédiat des 3 variantes de digue du barrage. Elle est discordante sur les formations crétacées.

La lacune stratigraphique de tout le Paléogène jusqu'au Miocène inférieur s'observe sur toute la bordure nord-orientale des Aurès.

Plun en aval du site, dans la plaine de Yabous, se développent des argiles rouges du tortonien supérieur, occupant de grandes étendues.

2.4.2.2 Le Campanien

Il est représenté par une série épaisse de marnes grises, assez homogènes. La stratification est soulignée par des bancs fins marno-calcaires, de couleur plus claire. Elles sont très pauvres en macro-fossiles, contrairement aux séries marneuses plus anciennes. Ces marnes sont assez ravinées en surface par suite de leur décompression et altération. Elles forment par ailleurs l'horizon de fondation des 3 variantes de digues, dans la mesure où elles sont épaisses. Les nombreux sondages qui ont été réalisés dans cette formation montrent qu'elles deviennent de plus en plus denses en profondeur (DHWK, 2006), de couleur plus sombre, et admettent quelques rares passées franchement calcaires. L'observation des carottes de sondages récents montre que ces marnes sont finement diaclasées et fracturées par endroits. Les fractures d'ouverture demi-centimétrique sont souvent recristallisées en calcite blanche elles sont par contre très sensibles à la décompression et débitent alors, quelle que soit leur consistance, en fragments centimétrique anguleux. L'épaisseur de cette formation est de 500 m environ.

2.4.2.3 Le Santonien

Les marnes campaniennes passent progressivement à des marnes plus claires, à cassure terreuse et fossilifères (fragments d'Inocéram, Echinodermes, huîtres, Strombes). Celles-ci renferment des

bancs marno-calcaires noduleux, d'épaisseur décimétrique, fossilifères. Elles sont ravinées et recouvertes par une mince pellicule d'éboulis (nodules marno-calcaires) en surface. La végétation arborée qui recouvre cette formation la protège efficacement contre l'érosion.

Son épaisseur est de 150 à 200 m.

La limite stratigraphique présumée entre le Santonien et le Coniacien correspond à un banc de calcaire dolomitique, fossilifère de 2 m, bien visible de part et d'autre de l'oued Tagharist, au lieu-dit Diar el Gaïd.

2.4.2.4 Le Coniacien

Au-dessous du banc calcaire-dolomitique que nous avons attribué au Santonien, se développe une sédimentation à dominante marno-calcaire et pélitique, en bancs centimétrique à décimétrique, très fossilifères (huîtres). Le sommet de la formation renferme des niveaux calcaires noduleux, comparables à ceux du Santonien, tandis que sa base est caractérisée par la présence de bancs fins et durs de couleur sombre. Cette formation est largement visible au fond du thalweg qui remonte, en rive droite de l'oued Tagharist, vers le village de touchent. Dans son ensemble, elle est plus robuste que la formation précédente et donc plus résistante à l'érosion. Son épaisseur est de 300 à 350 m.

2.4.2.5 Le Turonien

On, a distingué sur le plan lithologique et cartographique deux formations turoniennes et on a adopté comme limite supérieure les trois bancs calcaires métriques à minces joints marneux, qui affleurent sur toute la largeur de l'oued Tagharist, à Diar EL Gaïd, en formation des seuils naturels de déversement des eaux de crues . Ces bancs calcaires, qui appartiennent à la formation supérieure, sont de couleur blanchâtre, fins, et renferment des débris de fossiles. Puis, succède une alternance de mares grises épaisses renfermant des bancs calcaires demi-métriques qui apparaissent bien en rive droite de l'oued Tagharist, entre les combes marneuses. Son épaisseur est de 500 à 600 m.

La formation inférieure est assez comparable au supérieur mais plus carbonatée.

Elle débute par une arête topographique bien visible sur les deux versants de l'oued Tagharist, à la hauteur de Zkakat. Elle se poursuit à Tibelrdjine par une alternance de marnes verdâtres fossilifères (Huîtres) renfermant, en plus grand nombre, des bancs calcaires à patine jaunâtre. Son épaisseur est de 400 à 500 m.

2.4.2.6 Le turonien basal

La formation turonienne se poursuit vers la base, par une alternance de bancs calcaires d'épaisseur métrique et de marnes pélitiques verdâtres. Les bancs calcaires, fortement redressés et bien dégagés en rive droite de l'oued Tagharist, sont fins, de couleur grise à la cassure et à patine ocre. Ils renferment des débris de fossiles. Les marnes sont à cassure terreuse et renferment de grosses huîtres. Cette formation d'âge probable turonien inférieur, a une épaisseur de 300 à 400 m.

2.4.2.7 Le Cénomaniens supérieur

Il est représenté par des marnes grises à verdâtres, épaisseur, renfermant des bancs marno-calcaires d'épaisseur demi-métrique et des lumachelles Huîtres. Le sommet de cette formation est très fossilifère avec une nette prédominance de petites huîtres. Cette formation occupe la partie amont de la cuvette du barrage et est recouverte en grande partie par les colluvions grossières des bas piedmonts du Chélia (Cantina, Ras el Hanchir). Son épaisseur est supérieure à 600 m. elle repose sur une série de consistance plus rocheuse, de même âge, qui affleure vers l'extrémité sud-ouest de la cuvette (Cantina). Il s'agit de bancs calcaires durs et massifs, d'épaisseur plurimétrique, alternant avec des passées plus tendres, marneuses. Cette série qui affleure largement plus au sud de la cuvette, forme les premiers contreforts du massif du chélia.

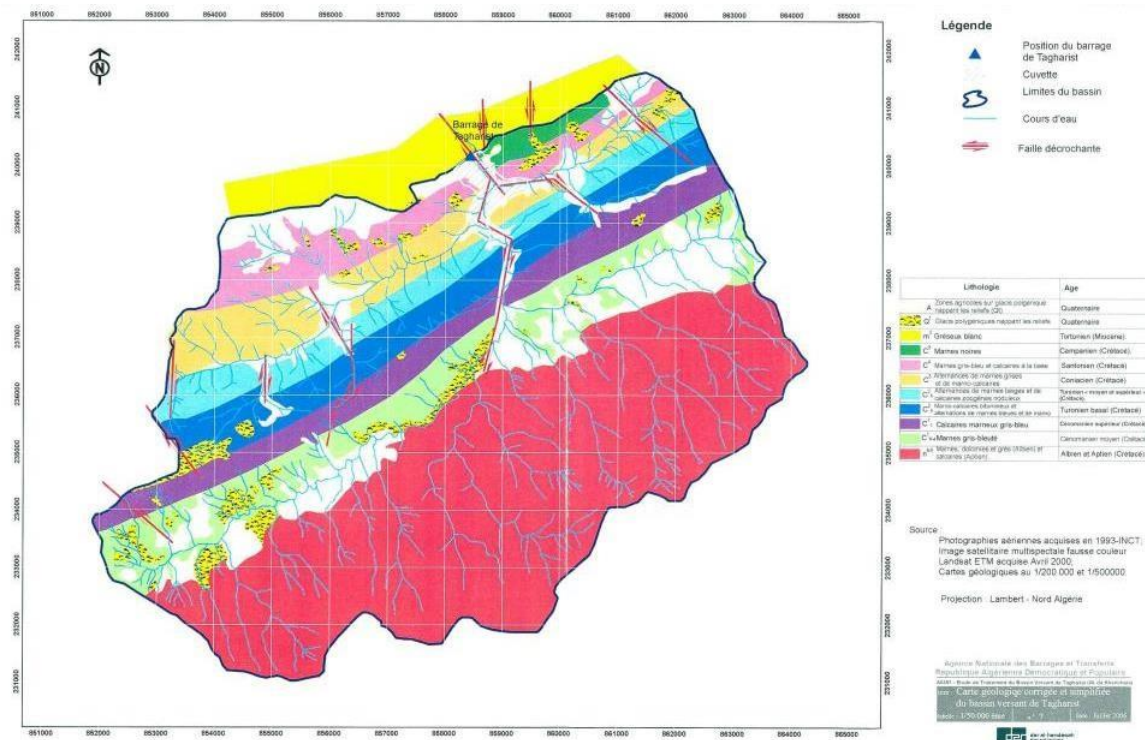


Figure 5: carte géologique du BV de Tagharist (DHWK, 2006).

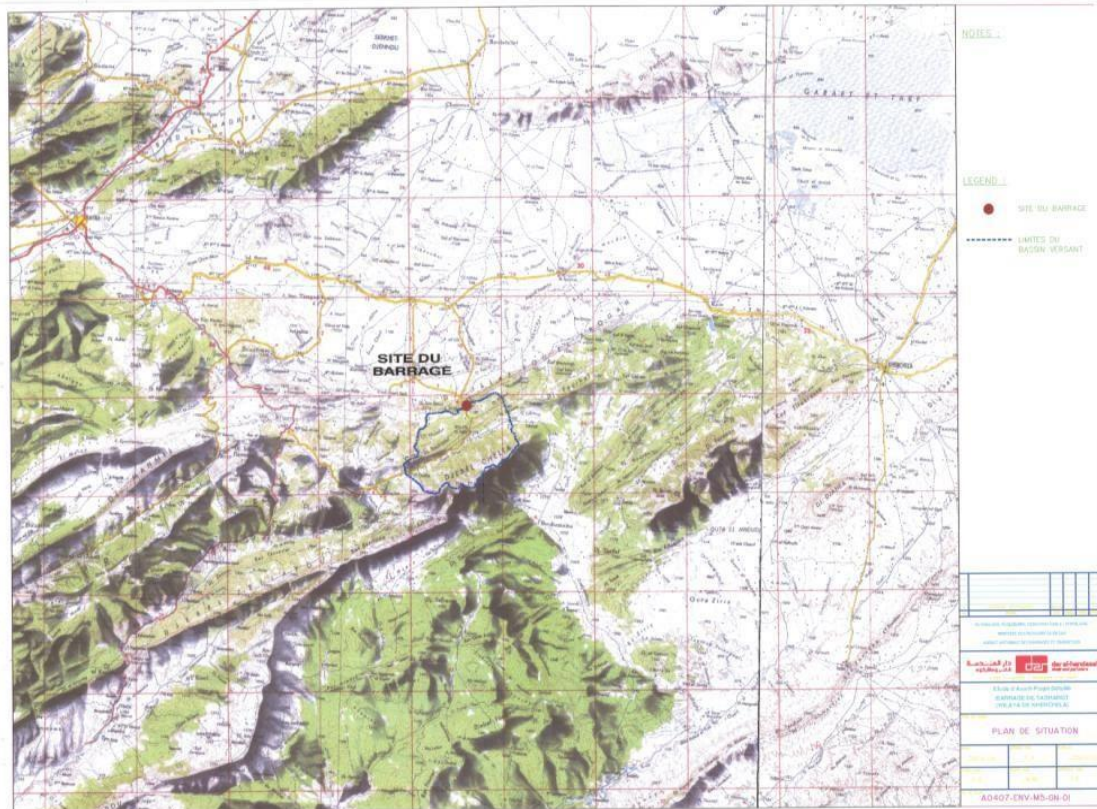


Figure 6: délimitation de sous bassin versant de Tagharist sur la carte géologique de W.khenchela (DHWK, 2006).

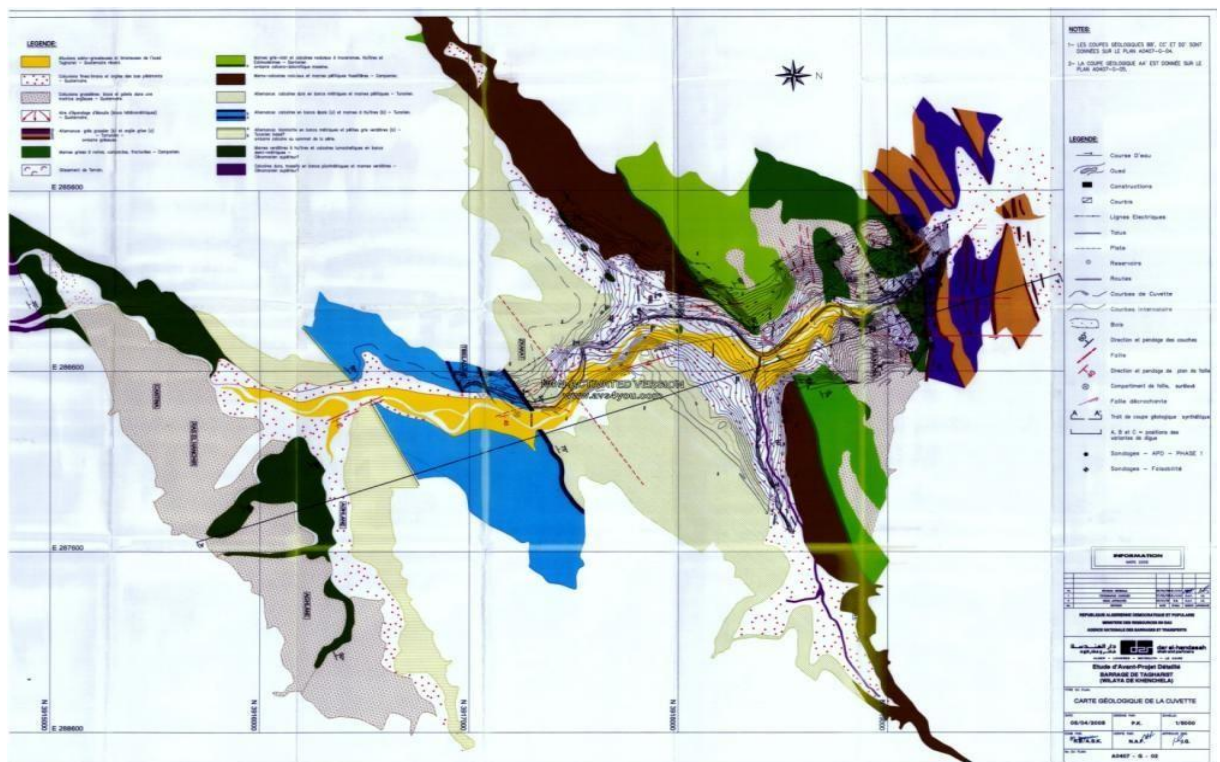


Figure 7: Carte géologique de la cuvette de l'oued Tagharist (DHWK, 2006).

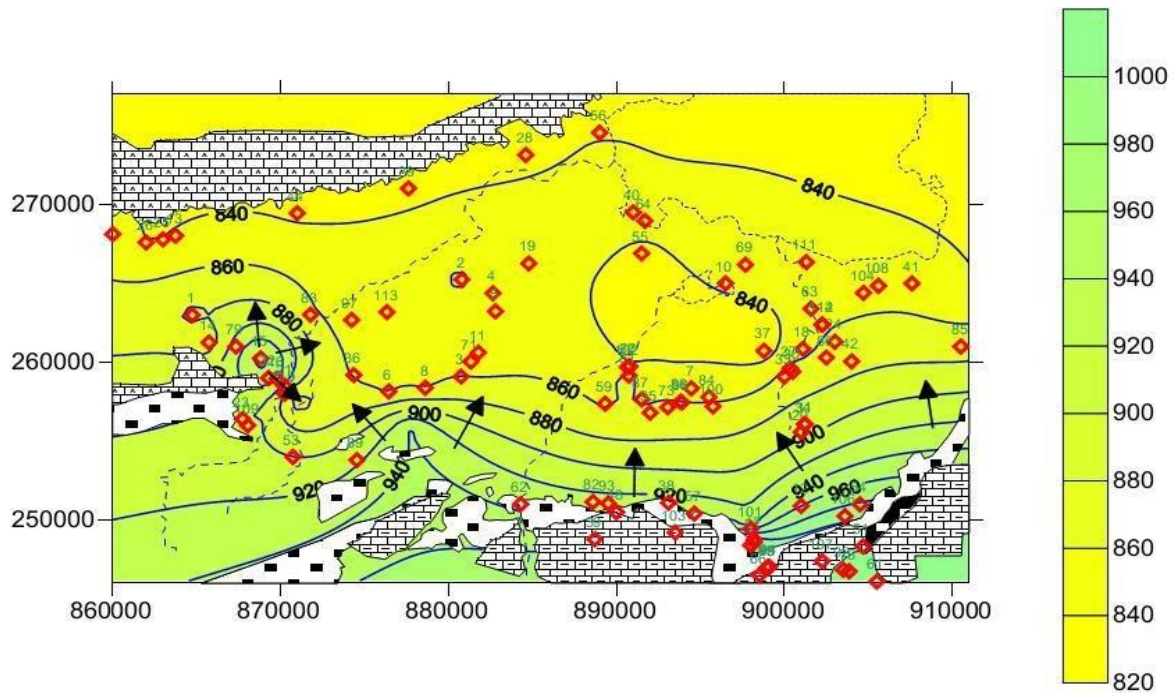


Figure 9: Carte piézométrique d'après (Houha, 2007)

Conclusion

Sur le secteur étudié, le Crétacé inférieur s'est déposé sous forme de calcaires marneux, de marnes, de calcaires gréseux et de calcaires compacts. L'Aptien et l'Albien affleurent dans le massif des Aurès. L'Albien existe dans les anticlinaux des Aurès ; il présente souvent un faciès gréseux, marneux et dolomitique, devenant franchement marneux à la base.

Le Tertiaire est constitué d'argiles rouges gypseuses et repose directement, en discordance, sur le Crétacé. Cette formation est composée de marnes gréseuses et de grès reposant directement sur le conglomérat de base. Il convient de préciser que ces formations miocènes, fréquemment classées sous le terme de « grès », ne comportent en réalité que quelques bancs de grès noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses. Ce qui fait que ces marnes gréseuses constituent la majeure partie de la formation miocène étudiée.

CHAPITRE II :
CARACTERISTIQUE CLIMATOLOGIQUE

Introduction

La climatologie est cruciale pour comprendre l'évolution des précipitations. Elle se base sur l'analyse des données climatiques mesurées sur une période donnée, ce qui permet d'estimer les différents composants du bilan hydrique. Ce bilan est essentiel pour appréhender le fonctionnement d'un système hydraulique de surface et nécessite la connaissance des paramètres suivants : précipitations, température, évapotranspiration, infiltration et ruissellement (Reminiéras, 1986).

Le climat et le cycle de l'eau souterraine sont fortement liés, surtout dans les zones arides et semi-arides. Les variations climatiques impactent significativement les aquifères et le niveau des nappes phréatiques, qui dépendent de l'infiltration pour leur alimentation et de l'évapotranspiration pour leur décharge. Les zones concernées voient leur régime hydrologique fortement influencé par les précipitations, un élément crucial de la composition climatique (OMM 2021).

L'Algérie, avec sa vaste superficie, présente une diversité climatique notable. Le nord du pays bénéficie d'un climat méditerranéen, tandis que la majeure partie du territoire est dominée par un climat désertique. Entre ces deux principaux types de climats, on trouve des zones de transition, notamment un climat semi-aride caractérisé par une sécheresse s'étendant au-delà de la saison estivale pour englober une grande partie de l'année, ainsi qu'un climat méditerranéen aux influences montagnardes, légèrement plus continental.

L'est de l'Algérie connaît des conditions hydro-climatiques défavorables, se manifestant par :

- Des précipitations irrégulières avec des variations significatives d'une année à l'autre.
- Une grande irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements (Aouidane, 2017).

L'analyse des données climatiques permet d'examiner les facteurs déterminant le climat de la région étudiée et fournit des informations sur :

- Le type de climat.
- Le comportement hydro-climatique.
- Le bilan hydrologique.

Ces paramètres peuvent être mesurés directement sur le terrain (précipitations, températures, évaporation) ou calculés à partir de formules spécifiques (Évapotranspiration Potentielle - ETP, Évapotranspiration Réelle - ETR, Ruissellement - R, Indice d'humidité - I).

1. Données climatiques

La région, connue pour son climat semi-aride, se distingue par des étés chauds et secs ainsi que des hivers froids, pluvieux et humides. Ce climat présente également une grande amplitude thermique et une variation significative des précipitations d'une année sur l'autre (D.H.W., 1987).

Pour étudier le climat de la zone étudiée, nous avons utilisé les données climatiques collectées à la station météorologique d'El-Hamma (Khenchela). Les coordonnées de cette station sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Les coordonnées géographiques de la station d'Al Hamma.

coordonnées	Longitude	altitude	latitude	Période d'observation
D'El Hamma	7°05'E	35°28'N	928.5 m	1998-2018

(Station météorologique d'El Hamma, 2018)

1.1 Les précipitations

Les précipitations jouent un rôle crucial dans la caractérisation du climat d'une région. Elles influencent de manière significative le comportement hydraulique des cours d'eau et contribuent à la recharge des nappes souterraines.

1.1.1 Précipitations moyennes mensuelles

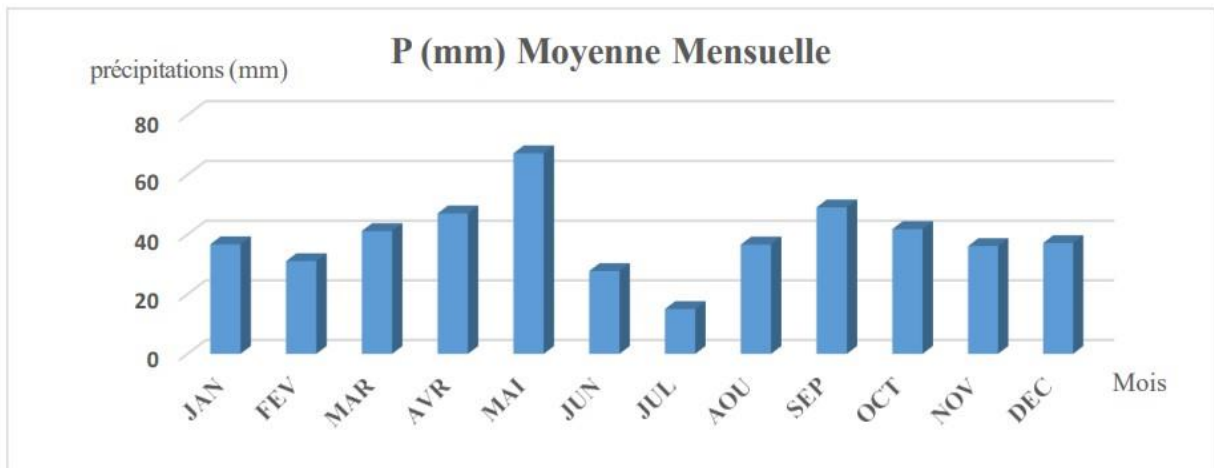


Figure 10 : Moyennes mensuelles des précipitations sur une période de 21 ans (1998-2018).

Les données pluviométriques présentées dans la figure 10 montrent une moyenne mensuelle d'environ 41,80 mm de précipitations. Juillet est le mois le moins pluvieux, avec seulement 15,02 mm de précipitations. En revanche, mai est le mois le plus pluvieux, avec une moyenne de 67,16 mm de précipitations. Ces informations mettent en évidence une variation significative des précipitations mensuelles tout au long de l'année.

1.1.2 Les Précipitations annuelles et leurs variabilités

Les Précipitations annuelles et leurs variabilités sont représentées dans la figure 8.

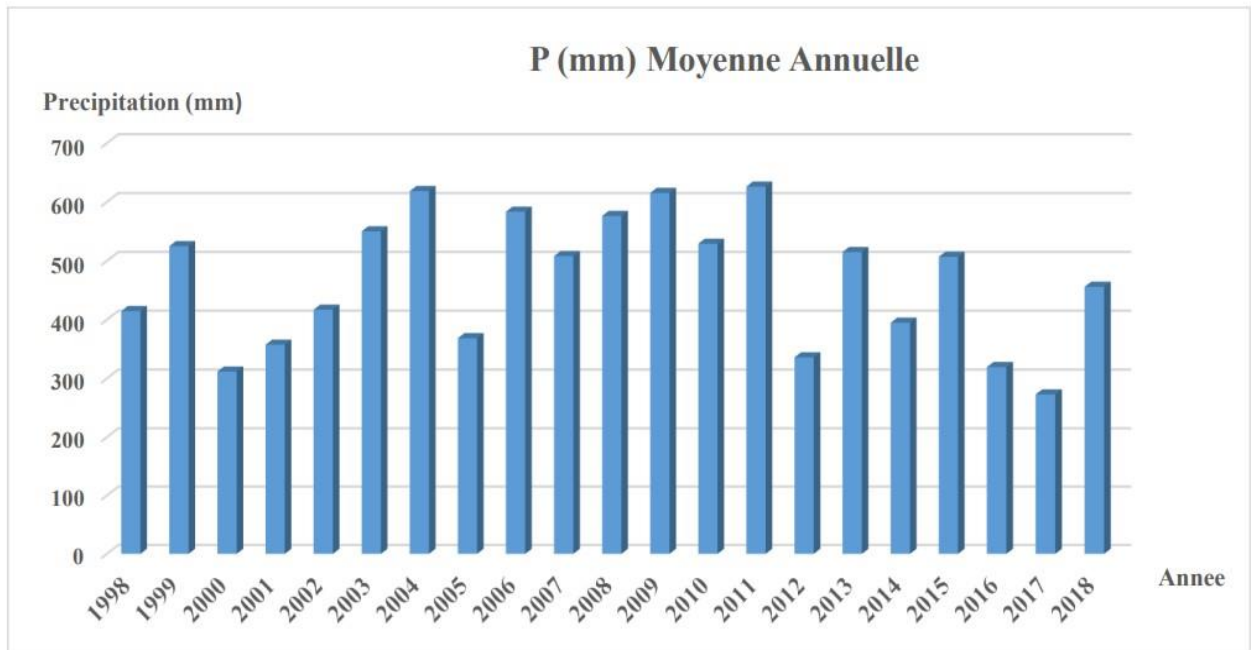


Figure11: Les précipitations moyennes annuelles pour période de 21 ans (1998-2018)

Nous remarquons que les cumules annuelles des précipitations durant la période d'étude varient d'une année à une autre avec un maximum de 626 mm atteints en 2011 et un minimum de 273 mm atteints en 2017. Ceci va sûrement influencer sur le régime hydrologique.

1.2 Les températures

L'étude des températures est d'une importance majeure, car elle permet de quantifier l'évaporation, et donc d'évaluer les conditions des aquifères profonds ainsi que la concentration des sels dissous dans leurs eaux. Elle contribue également à définir les limites de la thermalité.

La température est également un facteur clé caractérisant le climat d'une région. Les données concernant les températures entre 1998 et 2018 sont détaillées dans des histogrammes qui montrent les variations des moyennes mensuelles et annuelles.

1.2.1 Variations des températures moyennes mensuelles

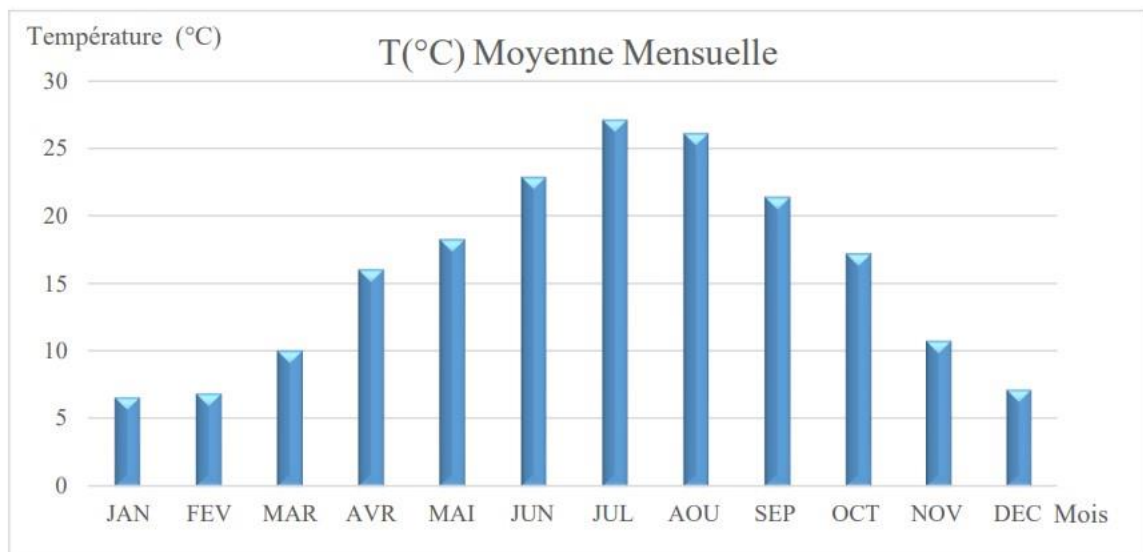


Figure12 : Températures moyennes mensuelles à la station d’Al Hamma (1998-2018).

Les températures moyennes mensuelles présentent de fortes variations saisonnières. Elles atteignent leur minimum en janvier avec 6,6 °C, qui est le mois le plus froid de l'année. En revanche, juillet est le mois le plus chaud, avec une température moyenne mensuelle maximale de 27,1 °C.

1.2.2 Variations des températures moyennes annuelles

L'histogramme représentant la variation annuelle de la température montre que l'année la plus chaude est 2017, avec une moyenne annuelle de 20,1°C, tandis que l'année la plus froide est 2016, avec une moyenne de 15,2°C. Il convient de noter que la température moyenne interannuelle est d'environ 16°C.

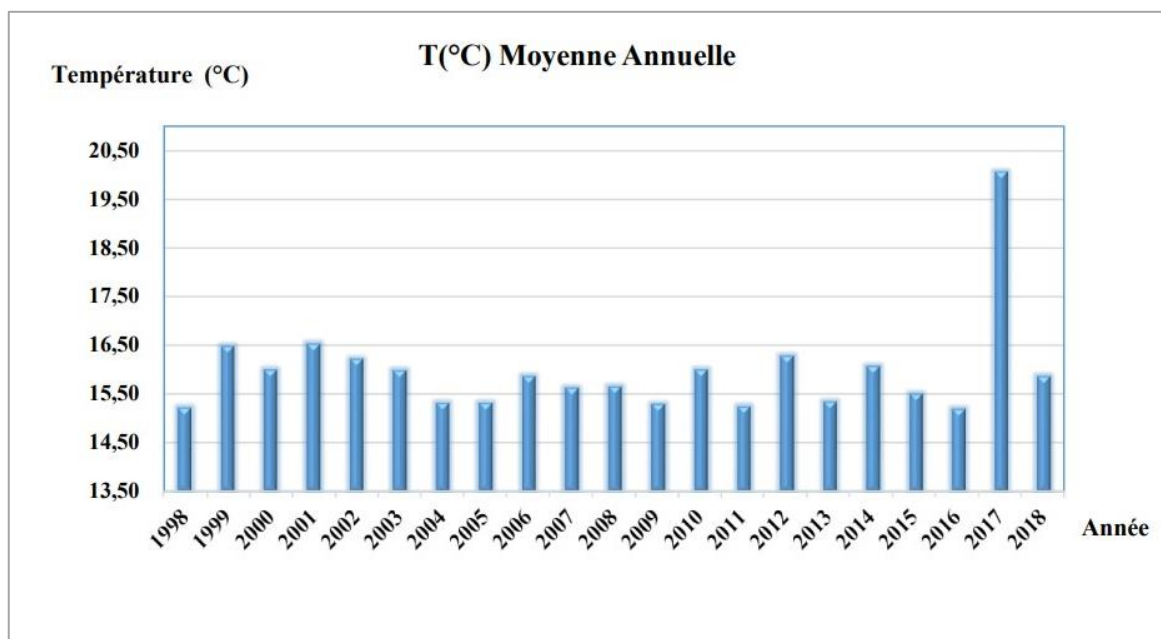


Figure 13 : Températures moyennes annuelle à la station d’Al Hamma (1998-2018).

2.Caractérisation du climat

La combinaison de deux principaux facteurs climatiques, la température et les précipitations, permet de définir avec précision les périodes sèches et humides d'une région donnée en utilisant le diagramme pluviothermique (ANRH, 2002).

2.1 Diagramme pluviothermique

Le diagramme pluviothermique de Bagnouls et Gausсен met en évidence les saisons humides et sèches. Selon ce diagramme, une saison est considérée comme sèche si le total des précipitations (en millimètres) est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P \leq 2T^\circ$).

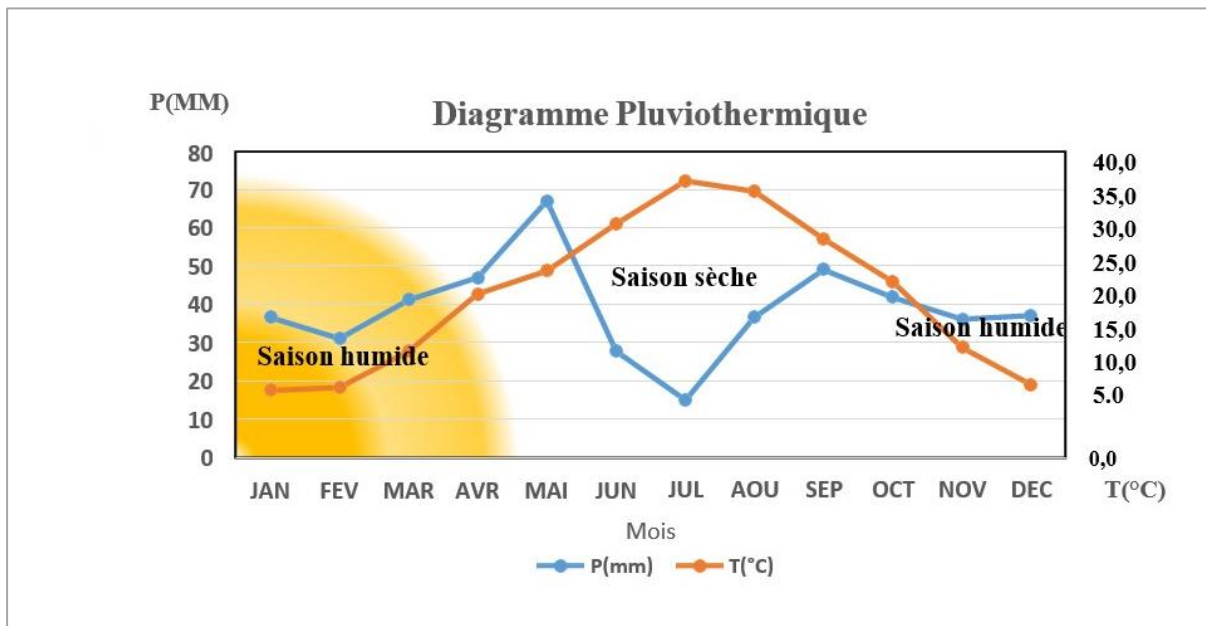


Figure 14: Courbe pluviothermique (1998-2018).

Nous observons que la saison sèche est constituée de plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme ombrothermique de Gausсен permet de mettre en évidence une saison humide débutant en septembre et se terminant en mai, ainsi qu'une saison sèche s'étendant de juin à août.

2.2 Indice de Martonne

En 1925 Emmanuel De Martonne a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité (I a). Cet indice est fonction de la température (T en °C) et des précipitations (P en mm) et permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude. (ANRH, 2002).

Cet indice est calculé par la relation suivante : $I = \frac{P}{T+10}$ (Martonne, 1925).

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

Application :

P : 466,7862 mm. T : 15.88 °C.

Ce qui donne : I = 18.03.

Suivant les valeurs de (I) De Martonne a établi la classification suivante :

- $I < 5$: climat hyperaride
- $5 < I < 7,5$: climat désertique
- $7,5 < I < 10$: climat steppique
- $10 < I < 20$: climat semi-aride
- $I < 30$: climat tempéré.

La zone d'étude bénéficie d'un climat semi-aride à tendance tempérée.

3. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique est le suivi de l'ensemble des entrées et des sorties d'un système donné(lac, réservoir) (Anctil et al., 2012). L'équation générale d'un tel bilan peut s'écrire : **$P=ETR+R+I$** .

Avec :

- **P** : Précipitation annuelle en mm ;
- **ETR** : Evapotranspiration réelle annuelle en mm ;
- **R** : Ruissellement en mm ;
- **I** : Infiltration annuelle en mm (Kergreis et Claude, 1991).

3.1 Estimation de l'évapotranspiration

Par définition, le terme évapotranspiration désigne la quantité d'eau rejetée dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau par évaporation directe à partir du sol et par transpiration des organes aériens des plantes (Jacob et al 2002).

3.1.1 Évapotranspiration potentielle (ETP)

Thornthwaite, en est le premier à introduire le concept d'évapotranspiration potentielle, dans un contexte de classification du climat : « Il y a une distinction entre le volume d'eau qui est effectivement évapotranspiré et celui qui pourrait être évapotranspiré, s'il était disponible. Lorsque la disponibilité en eau augmente, l'évapotranspiration atteint un maximum qui dépend uniquement du climat.

Calcul l'ETP selon Thornthwaite

La formule utilisée est :

ETP (mm/mois) = 16(10T/I)^a (Lambert, 1996). Où :

- **T** : La température moyenne mensuelle en °C ;
- **I** : indice thermique annuelle, somme des 12 indices mensuels i ; et **$I = \sum i$ et $i = (t/5)^{1,514}$** (Bouchagoural, 2003);
- **a** : Coefficient constant pour un même lieu et ne dépendant que de i ; $a = 0.016 I + 0,5$

$$ETP_c = ETP \times K$$

Où :

- **ETP_c** : l'évapotranspiration potentielle corrigée (mm)
- **K** : le facteur de correction en fonction de la durée d'ensoleillement.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau n : avec $I = 73.44$ et $a = 1.67$

3.1.2 L'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle c'est la quantité d'eau réellement évaporée. Elle représente la quantité de vapeur d'eau relativement dégagée vers l'atmosphère par les sols et les végétaux. Des méthodes peuvent être proposées :

- La méthode de Turc.
- La formule de Coutagne.
- La méthode de Thornthwaite

Formule de L.TURC annuelle (Boutaleb et Lhoussaine, 2006)

$$ETR = P / \sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}$$

- **ETR** : L'évapotranspiration réelle, en (mm) ;
- **P** : La précipitation annuelle, en (mm) ;
- **T** : La température moyenne annuelle en °C ;
- **L** : Un paramètre calculé en fonction de la température selon la formule :

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \text{ (Lambert, 1996).}$$

Application numérique :

$$P = 466,7862 \text{ mm}$$

$$T = 15,88 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ ce qui nous donne } L = 879,23.$$

3.2 Le bilan hydrologique selon Thornthwaite

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Il tient aussi compte de la effectués par les précipitations.

Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration des plantes, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration. Le bilan est évidemment positif lorsque la différence est positive ou que le rapport est supérieur à un. On choisit l'un ou l'autre expression en fonction de commodités ou de diverses. L'écoulement à partir d'une unité de surface sera compté dans les pertes. L'infiltration est considérée comme une mise en réserve sous forme de nappes souterraines ou d'eau capillaire dans le sol.

La détermination de l'ETR en fonction de L'ETP et de la quantité d'eau disponible (pluie+RFU).

ETR peut être évalué par l'établissement du bilan comme par l'application de certaines formules empiriques .ce paramètre peut être calculé d'après Thornthwaite en utilisant les conditions suivantes :

- Si : $ETP = P$; il y a existence d'une évapotranspiration réelle ETR, la réserve RFU ne se modifie pas et aucune infiltration est produite en direction de nappe. $RFU = 0$.
- Si : $ETP > P$; on a $ETR = P + RFU$.un déficit apparait une partie de l'RFU sera sollicitée jusqu'à la compensation de l'ETR .l'évapotranspiration agit donc sur le sol.
- Si : $ETP < P$; alors $ETR = ETP$.RFU pourra atteindre son maximum au-delà duquel, il y aura une infiltration vers la nappe.

L'application de la méthode de Thornthwaite pour l'année moyenne, l'année la plus humide et l'année la plus sèche a donné les résultats qui sont consignés dans le tableau suivants :

Tableau4 : Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de kenchela par méthode dethornthwaite

	Sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avr	mai	jun	jlt	Aou	total
P	49,10	41,82	36,13	37,15	36,71	31,08	41,17	47,06	67,16	27,76	15,01	36,64	466,79
T	21,40	17,20	10,80	7,20	6,60	6,90	10,10	16,00	18,30	22,90	27,10	26,10	190,60
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	
ETP	98,94	64,65	26,32	13,05	11,68	12,30	28,18	64,38	89,46	130,17	175,37	155,31	869,82
P-ETP	- 49,84	- 22,83	9,81	24,10	25,03	18,78	12,99	- 17,32	- 22,30	-102,41	-160,36	-118,67	
RFU	-	-	9,81	25,00	25,00	25,00	12,99	-	-	-	-	-	97,80
ETR	49,10	41,82	45,94	62,15	61,71	56,08	54,16	47,06	67,16	27,76	15,01	36,64	564,58

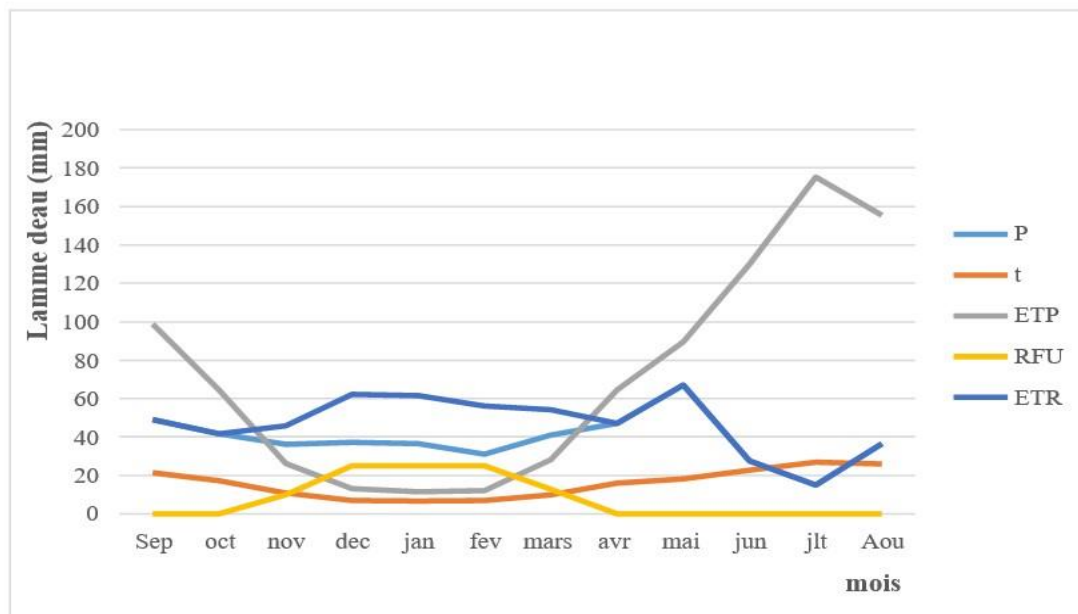


Figure 15: Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de kenchela par la méthode de thornthwaite.

3.3 Interprétation du bilan hydrique

L'observation du bilan hydrologique du graphe du bilan hydrologique nous permet de dire qu'il existe deux périodes :

- **La première** est déficitaire ou l ETP est importante à partir de mois d'avril jusqu' au mois d'octobre, avec des valeurs atteignant les 175,37mm au mois de juillet ; dans cette période les sols sont sec leur niveau de réserve hydrique est nul, rendant la nécessité de l'irrigation
- **La deuxième** période est humide qui commence à partir du mois d'octobre ou les précipitations couvrent les besoins de l'évapotranspiration potentielle et permettent la reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum (25mm) entre les mois décembre et février.

Toute la pluie non retenue par la couche superficielle du sol, s'infiltrer et rejoint la zone saturée. Au-delà de cette période, la réserve commence à diminuer jusqu'à l'épuisement de stock

Le bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des précipitations entre les différents composants de ce bilan, l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration.

Le bilan est établi selon la formule suivante : $P = ETR + R + I$ ou :

- **P** : la précipitation moyenne annuelle en (mm).
- **ETR** : l'évapotranspiration réelle en (mm)
- **R** : ruissellement en (mm)
- **I** : l'infiltration en (mm)

4. ruissellement superficiel et l'infiltration

Il est estimé à partir de la formule de **TIXERONT - BERKALOFF** qui est la suivante :

$$R = \frac{P^3}{3(ETP_c)^2}$$

L'application numérique donne le résultat suivant : 44.81 mm

L'infiltration est le passage de l'eau à travers la surface du sol, il est exprimé par la formule suivante : $P = ETR + R + I \rightarrow I = P - (ETR + R)$ est égale - 10.22 mm

On constate que l'infiltration directe à partir du sol est pratiquement nulle pour la station étudiée.

Conclusion :

La région étudiée est soumise à un climat semi-aride, caractérisé par environ six mois secs. Elle présente un hiver froid et pluvieux ainsi qu'un été chaud et sec.

Les précipitations moyennes annuelles, sur une période de 21 ans (1998-2018), sont estimées à 466,78 mm. La température moyenne annuelle est de 16°C. La répartition mensuelle des précipitations montre deux grandes saisons bien distinctes : une saison humide s'étendant de novembre à mai, et une saison sèche couvrant les mois de juin à août.

L'évapotranspiration potentielle est de 869,82 mm, tandis que l'évapotranspiration réelle est de 432,2 mm. Le ruissellement s'élève à 44,81 mm et l'infiltration est de -10,22 mm. L'excédent en eau est de 34,58 mm. Les précipitations sont généralement insuffisantes, irrégulières et inégalement réparties dans le temps, ce qui ne respecte pas l'effet de saisonnalité. Le déficit agricole est de 437,52 mm, indiquant que le bilan hydrique de la zone d'étude est déficitaire.

CHAPITRE III
GEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES

Introduction

Dans ce chapitre, nous procéderons à une caractérisation chimique détaillée des eaux souterraines de la zone d'étude. Cela inclut l'identification de leurs faciès chimiques et la détermination des origines des éléments présents dans ces eaux. De plus, le calcul des indices de saturation par rapport à certains minéraux sera utilisé comme méthode complémentaire pour analyser les origines possibles de la minéralisation.

1. Méthodes et stratégie de travail

1.1. Échantillonnage

Les 8 échantillons destinés aux analyses physico-chimiques sont collectés dans des flacons en plastique spécialement préparés (Figure 16). Les échantillons ont été prélevés le 3 avril, Avant chaque prélèvement, les flacons sont soigneusement rincés à l'eau distillée pour éliminer toute trace de contaminants résiduels, puis égouttés. Ensuite, les flacons sont de nouveau rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser afin de garantir une propreté optimale.

Avant de remplir les flacons, il est essentiel de laisser l'eau couler pendant quelques minutes afin d'éliminer toute eau stagnante dans les tuyaux. Cette étape garantit que l'échantillon prélevé reflète les conditions actuelles de la source d'eau et n'est pas influencé par l'eau qui a pu stagner dans les conduites.

Une fois remplis, les flacons sont hermétiquement fermés pour prévenir toute contamination durant le transport vers le laboratoire. Chaque flacon est étiqueté avec des informations détaillées telles que la date et l'heure du prélèvement, ainsi que le lieu exact de collecte, afin de faciliter la traçabilité et l'interprétation des résultats. Les échantillons sont gardés à l'abri de la lumière.

Cette méthodologie rigoureuse, du prélèvement à la conservation des échantillons, est indispensable pour obtenir des résultats d'analyse précis et fiables.



Figure 16: les échantillons dans des flacons en plastiques.

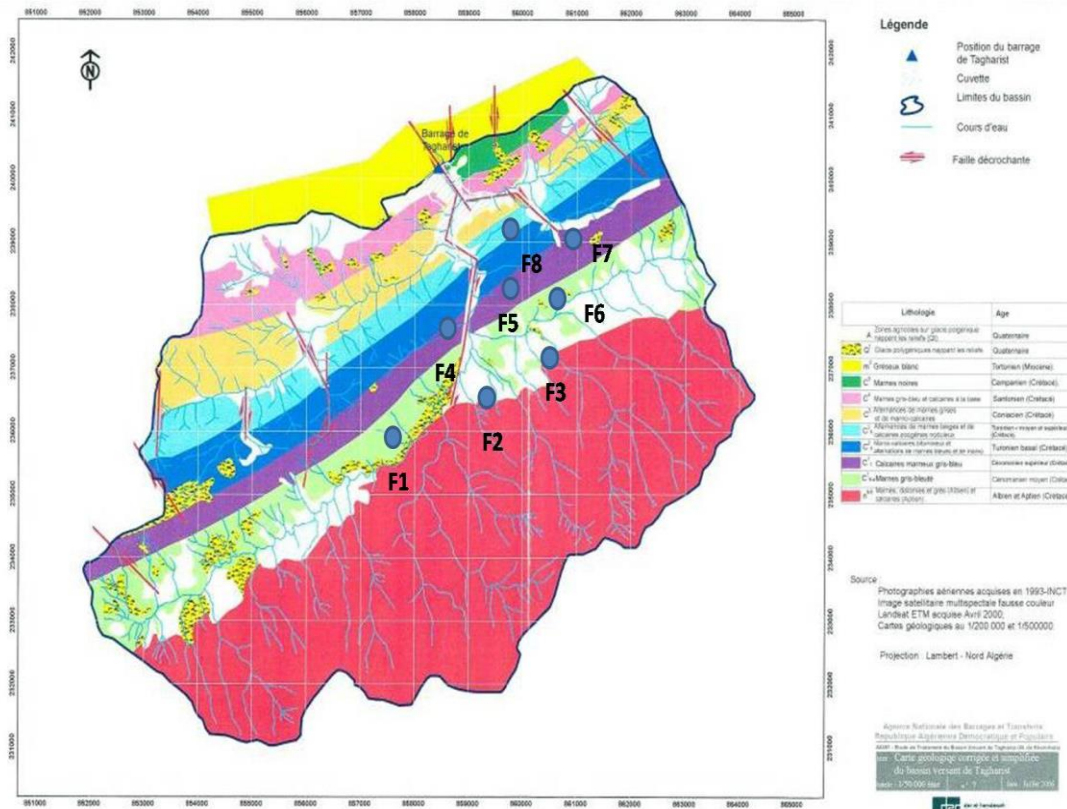


Figure 17 : Carte d'inventaire des points de prélèvements de la zone d'étude.

1.2. Analyse physico-chimique

Les différentes analyses des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région d'étude ont été effectuées au laboratoire d'Elhamma.

1.2.1. Mesures in situ

Trois paramètres physico-chimiques sont mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon, à l'aide d'un appareil multiparamètre de type CONSORT 926 : le pH, la conductivité électrique (CE) et la température (T°).

La mesure in situ est essentielle car elle garantit la précision des données en évitant les modifications des échantillons pendant le transport et le stockage.

L'appareil est étalonné avant chaque série de prélèvements pour assurer la précision des mesures, avec une précision de ± 0.01 unité pour le pH, de $\pm 2\%$ pour la CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$, et de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ pour la température.

1.2.2. Analyse des éléments chimiques

1.2.2.1. Les bicarbonates (HCO_3^-)

Les dosages ont été effectués par potentiométrie et par volumétrie. La potentiométrie permet de suivre les variations du potentiel électrique d'une solution pour déterminer le point d'équivalence, tandis que la volumétrie, ou titrage volumétrique, consiste à mesurer le volume de réactif nécessaire pour réagir complètement avec l'analyte.

Appareil utilisé :

- **Appareil de titrage automatique** : Cet appareil assure une précision et une répétabilité accrues lors des mesures. Il est équipé d'une électrode pour mesurer le potentiel électrique de la solution et d'une burette automatique pour délivrer le réactif avec une grande précision.

Réactifs :

- **H_2SO_4 à 0,02N (acide sulfurique normalisé)** : Utilisé pour les titrations acide-base, cet acide fort permet de déterminer la concentration d'une base dans la solution.
- **Solution tampon** : Utilisée pour stabiliser le pH de la solution, elle assure des conditions constantes pendant le titrage. Les solutions tampons sont essentielles pour obtenir des résultats précis, car elles minimisent les fluctuations du pH qui pourraient fausser les mesures.

Procédure :

- **Préparation de la solution** : La solution de l'échantillon est préparée et placée dans un bécher.
- **Calibration de l'appareil** : L'appareil de titrage automatique est calibré en utilisant des solutions standards pour assurer des mesures précises.
- **Titration potentiométrique** : L'électrode de l'appareil est immergée dans la solution de l'échantillon. Le réactif (H_2SO_4 à 0,02N) est ajouté progressivement à l'aide de la burette automatique jusqu'à ce que le point d'équivalence soit atteint, détecté par un changement significatif du potentiel électrique.
- **Titration volumétrique** : Le réactif est ajouté à la solution de l'échantillon jusqu'à ce que la réaction soit complète. Le volume de réactif utilisé est mesuré pour déterminer la concentration de l'analyte dans la solution.

1.2.2.2. La dureté totale TH ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)

La mesure de la dureté totale (TH) de l'eau, attribuée aux ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), a été effectuée par titrage complexométrique.

Réactifs :

- **Sel disodique de l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) 0,02 N :** L'EDTA est un agent complexant qui forme des complexes stables avec les ions calcium et magnésium, permettant de les quantifier.
- **Noir d'Ériochrome T :** Un indicateur coloré qui forme un complexe avec les ions métalliques présents dans la solution. En présence d'ions calcium et magnésium, la solution prend une couleur rouge vineuse. Lorsque tous les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont complexés par l'EDTA, l'indicateur change de couleur (généralement à un bleu pur), signalant la fin du titrage.
- **Solution tampon pH 10 :** Utilisée pour maintenir le pH de la solution à environ 10, ce qui est optimal pour la complexation des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} avec l'EDTA. Un pH approprié est crucial car la complexation est pH-dépendante.

Procédure :

Préparation de l'échantillon :

- Prendre un volume précis de l'échantillon d'eau à analyser et le placer dans un bécher.
- Ajouter la solution tampon pH 10 pour stabiliser le pH à environ 10.

Ajout de l'indicateur :

- Ajouter quelques gouttes de la solution de noir d'Ériochrome T à l'échantillon. La solution devient rouge vineuse en présence des ions calcium et magnésium.

Titrage avec l'EDTA :

- Remplir une burette avec la solution d'EDTA 0,02 N.
- Ajouter lentement l'EDTA à l'échantillon tout en agitant constamment le bécher.
- Observer le changement de couleur de la solution. Le point d'équivalence est atteint lorsque la couleur de la solution passe de rouge vineuse à bleu pur.

1.2.2.3. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+)

Les concentrations de sodium et de potassium ont été déterminées par spectrophotomètre à flamme.

Appareil : Un spectrophotomètre à flamme de type (SPF CORNING).

Étalons : Les solutions utilisées pour la calibration de l'appareil étaient du NaCl à une concentration de 0,1 mg/L et du KCl à une concentration de 0,1 mg/L.

Principe de la spectrophotométrie à flamme :

La spectrophotométrie à flamme est une technique analytique utilisée pour mesurer la concentration de certains ions métalliques, tels que le sodium et le potassium, dans une solution. Lorsque la solution est introduite dans la flamme, les ions métalliques sont excités et émettent de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. L'intensité de cette lumière est proportionnelle à la concentration des ions dans la solution.

1.2.2.4. Les chlorures (Cl⁻) : ont été déterminés par colorimétrie

Appareil : appareil de titrage (burette et bûcher graduée)

Réactifs : chromate de potassium, nitrates d'argent AgNO₃, 0.02 N, Solution Étalon : NaCl 0.1g/l.

Préparation de l'échantillon :

- Prélever un échantillon d'eau.
- Ajouter quelques gouttes de chromate de potassium comme indicateur.

Titration :

Titrer avec la solution de nitrate d'argent (AgNO₃) 0,02 N jusqu'à ce que la solution passe du jaune au rouge brique, indiquant la fin de la titration.

Calcul :

- La concentration de chlorures est déterminée en fonction du volume de nitrate d'argent utilisé.

Le principe repose sur la précipitation des ions chlorure avec les ions argent pour former du chlorure d'argent (AgCl), un précipité blanc. Lorsque tous les ions chlorure ont réagi, l'excès de nitrate d'argent réagit avec le chromate de potassium pour former du chromate d'argent (Ag₂CrO₄), un précipité rouge brique, signalant la fin de la titration.

1.2.2.5. Sulfates (SO₄²⁻)

Les sulfates ont été déterminés par spectrométrie.

Appareil : Spectromètre de type (HACH DR/2010).

Réactifs : Gélule de NitraVer 5.

Réaction chimique :

- Ajouter une gélule de NitraVer 5 à l'échantillon d'eau.
- Agiter la solution jusqu'à dissolution complète de la gélule.

Mesure :

- Verser la solution dans une cuve pour le spectromètre.
- Mesurer l'absorbance à la longueur d'onde spécifique pour les sulfates.

Calcul :

Convertir l'absorbance mesurée en concentration de sulfates en utilisant une courbe d'étalonnage.

Principe de la spectrophotométrie à flamme :

La spectrométrie est utilisée pour déterminer la concentration des ions sulfates dans l'échantillon. Le réactif NitraVer 5 réagit avec les ions sulfates pour former un complexe coloré, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration des sulfates. Cette intensité est mesurée par le spectromètre, permettant de quantifier les sulfates présents dans l'échantillon.

Tableau 5 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux échantillonnées .

Point	CE ($\mu\text{S/cm}$)	pH	T (C°)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
F1	1811	7.6	17	158.3	14.55	75.4	7.2	360.0	98.31	171.3
F2	3948	7.31	17	396.6	16.37	165.7	11.5	796.3	233.4	366.8
F3	896	7.70	18	88.54	4.55	43.5	2.8	128.5	48.34	102.2
F4	983	7.57	19	91.27	4.98	29.8	3.6	145.7	52.47	106.5
F5	967	7.37	18	91.77	5.05	28.4	4.6	141.4	49.66	99.03
F6	923	7.51	18	85.44	7.64	40.3	5	139.9	47.38	98.13
F7	1355	7.82	17	115.3	11.65	71.2	5.3	285.2	66.54	122.4
F8	1770	7.70	18	142.5	13.25	88.3	6.5	354.3	92.33	167.8

2 Variation spatiale des paramètres physico- chimiques

2.1. Paramètres physiques

Ces paramètres sont cruciaux car ils influencent fortement la solubilité des substances dans l'eau et aident à déterminer son origine et sa qualité. Pour cela, nous allons étudier trois paramètres principaux : la température, le pH et la conductivité électrique.

2.1.1 La Température

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. Elle varie en fonction de la température extérieure (de l'air), des saisons et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. (Gouiadia L 2008)

Les résultats des mesures de la température des eaux souterraines de la région étudiée montrent une valeur maximale de 19°C aux forages F4 et une température minimale de 17°C aux forages F1, F2 et F7, avec une moyenne autour de 18°C.

L'examen du diagramme des températures des eaux (figure 18), montre que la température de ces eaux est en équilibre avec la température annuelle moyenne de l'air (17 à 23°C) représentées par des échantillons prélevés dans les niveaux superficiels, qui reflètent les conditions thermiques locales.

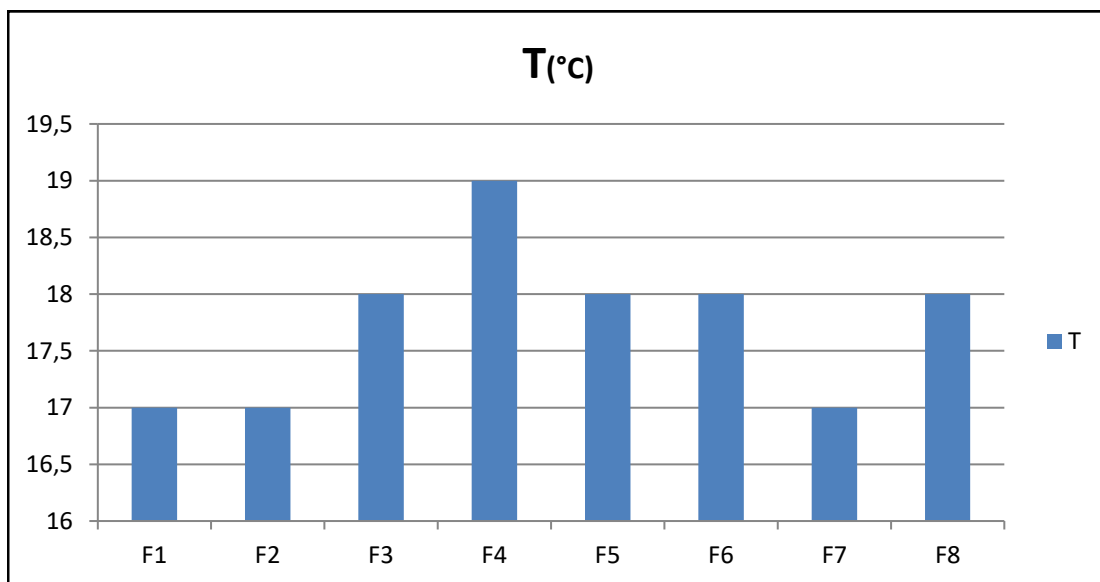


Figure 18. Répartition des températures (°C) des eaux de la zone d'étude.

2.1.2. Le potentiel hydrogène (Ph)

Le potentiel hydrogène est principalement lié à la nature lithologique des terrains traversés. Il représente la concentration en ions H⁺ d'une solution, c'est-à-dire l'alcalinité ou l'acidité du chimisme du milieu. Il est exprimé par le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ions H⁺ :

$$- \text{pH} = \log 1/ [\text{H}^+].$$

L'échelle du pH varie de 0 à 14 en fonction de la force ionique :

- Si $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] \rightarrow$ Le pH = 7, donc l'eau est neutre.
- Si $[\text{H}^+] > [\text{OH}^-] \rightarrow$ Le pH < 7, donc l'eau est acide.

- Si $[H^+] < [OH^-]$ → Le pH > 7, donc l'eau est basique.

Le pH des eaux de la zone d'étude varie entre 7,3 (F2) et 7,8 (F7) (figure 19). La moyenne est de l'ordre de 7,5. En général, les eaux sont neutres à alcalines. Ceci est lié à la nature des roches présentes dans la région et qui sont essentiellement constituées de roches sédimentaires à composante carbonatée importante.

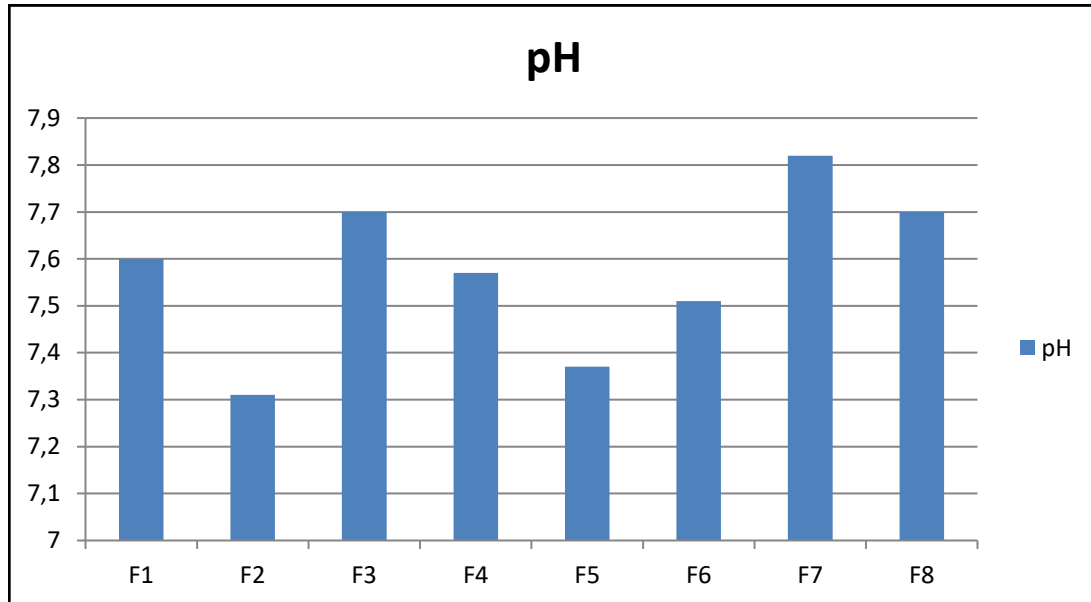


Figure 19 Répartition des Ph des eaux de la zone d'étude.

2.1.3. Conductivité électrique

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines de la zone d'étude ont été mesurées sur terrain et sont exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La conductivité électrique est un moyen important d'investigation en hydrogéologie. Sa mesure est précise et rapide. Sa variation est liée à la nature des sels dissous et de leur concentration. (Cherchali M.E.H (2008))

Les valeurs de la conductivité des eaux de la région d'étude varient entre 923 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (F4) et 3948 (F2) $\mu\text{S}/\text{cm}$.

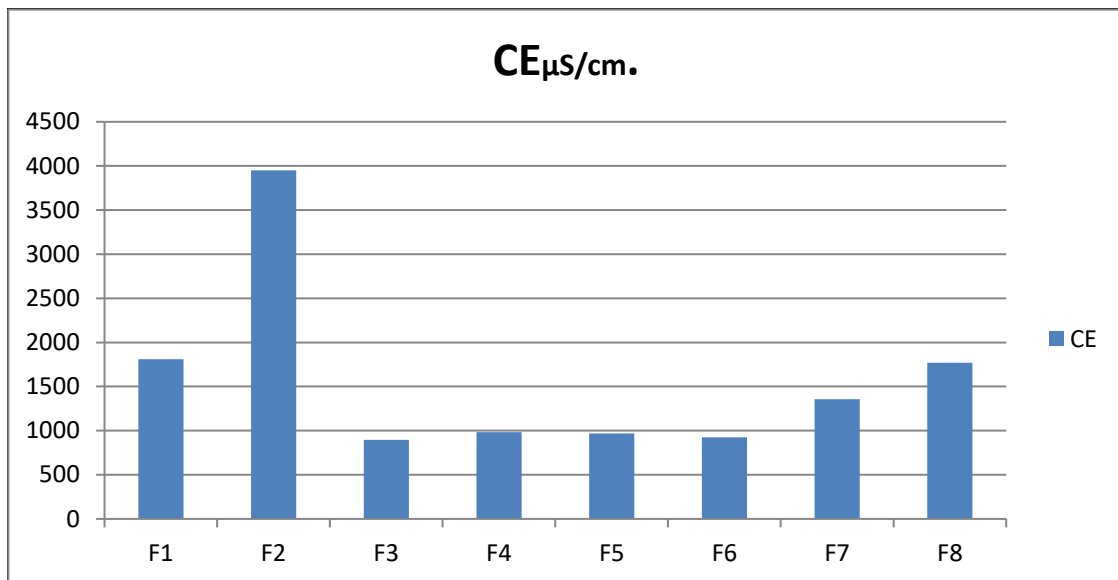


Figure.20. Répartition des conductivités (c25°C).

2.2 Evaluation spatiale des éléments chimiques majeurs

2.2.1. Le calcium (Ca⁺⁺)

Les ions de calcium existants dans l'eau proviennent de la dissolution des carbonates et de roches gypseuses. Pour les roches carbonatées, l'apparition du calcium résulte de la dissolution des formations (CaCO₃) par l'attaque chimique des eaux en présence du gaz carbonique (CO₂).



Les concentrations des ions de calcium oscillent entre 85,44 mg/l (F6) et 396,6 mg/l(F2). Les fortes teneurs apparaissent au forage (F2) on pense qu'elles résultent de la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃) et les dépôts évaporitiques provenant de Djebel Chelia. (El Achheb A 2002)

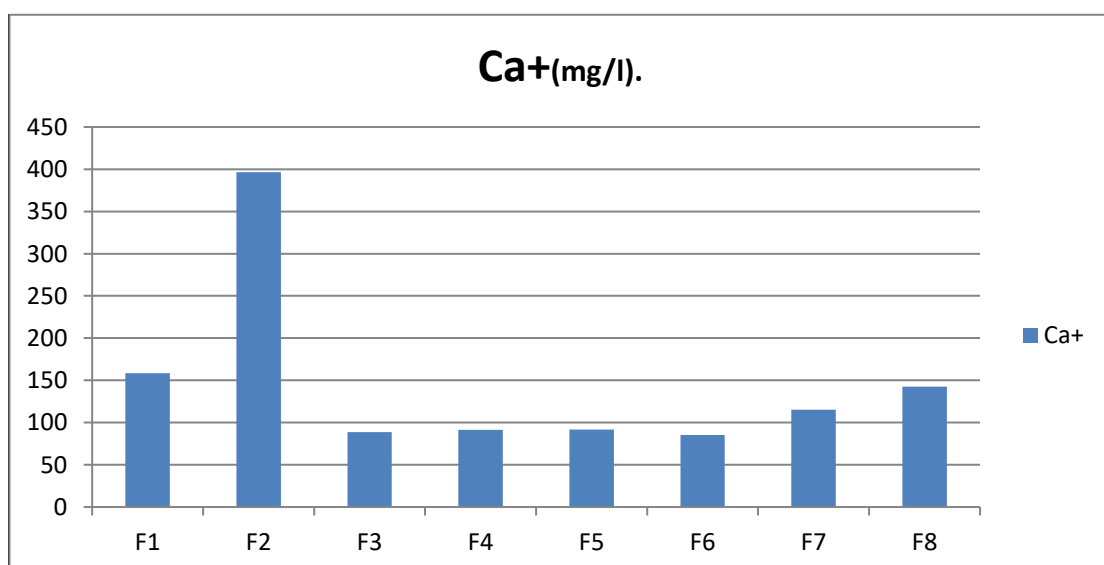


Figure 21. Répartition des concentrations de Ca (mg/l).

2. 2.2. Le Magnésium (Mg⁺⁺)

La présence de magnésium dans les eaux résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations dolomitiques, c'est-à-dire la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, ou bien par les formations salifères riches en magnésium comme le MgSO₄. La réaction chimique est accentuée par la présence de l'acide carbonique dans l'eau (Vallès, 1985).

L'examen du diagramme (figure 21) montre que les concentrations en magnésium varient entre 4,55 mg/l (F3) et 16,37 mg/l (F2). Les sources de magnésium sont similaires à celles du calcium, car elles proviennent de la dissolution de formations carbonatées à haute teneur en magnésium, telles que la magnésite et la dolomite, présentes dans le Djebel Chelia. (Gouaidia, L., 2008)

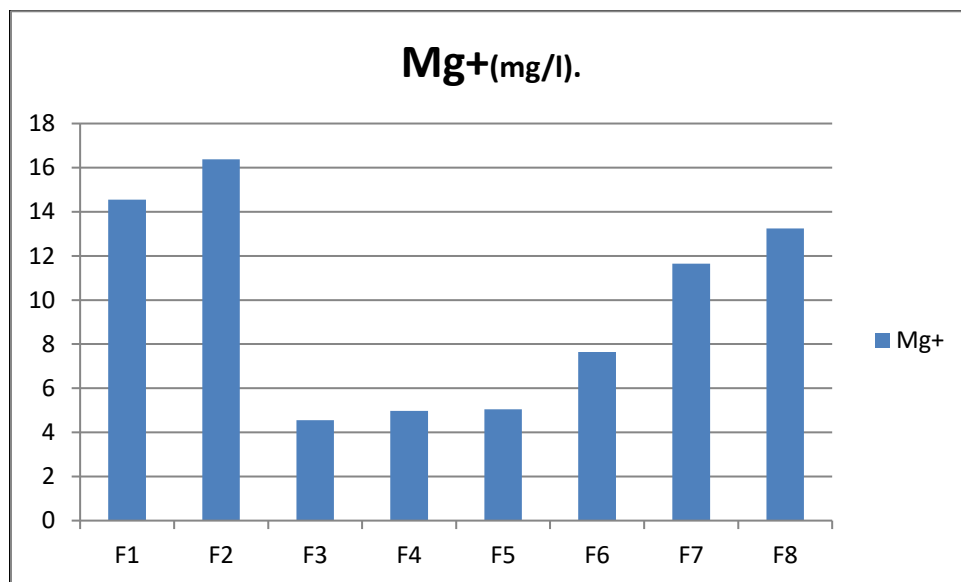


Figure22. Répartition des concentrations de Mg (mg/l).

2.2.3. Le Sodium Na⁺ et le potassium K⁺

Le sodium (Na⁺) est toujours présent dans les eaux naturelles en proportions très variables. Il provient essentiellement du lessivage des formations géologiques riches en chlorure de sodium (NaCl). Le potassium (K⁺), bien que présent, est beaucoup moins abondant que le sodium dans les eaux naturelles. (Houha, 2007).

Les concentrations combinées de sodium et de potassium (Na⁺ + K⁺) varient entre 45 mg/l (F6) et 177 mg/l (F2). Les formations évaporitiques du Trias du Djebel Chelia sont la principale source de sodium dans cette région.

Le potassium provient généralement de l'altération des formations silicatées, telles que le gneiss et le schiste, ainsi que des argiles potassiques. De plus, la dissolution des engrais chimiques

(NPK) contribue également à la présence de potassium dans les eaux naturelles. (Seghir et Khérici, 2006 ;Seghir et Khérici, 2008 ; Seghir, 2008).

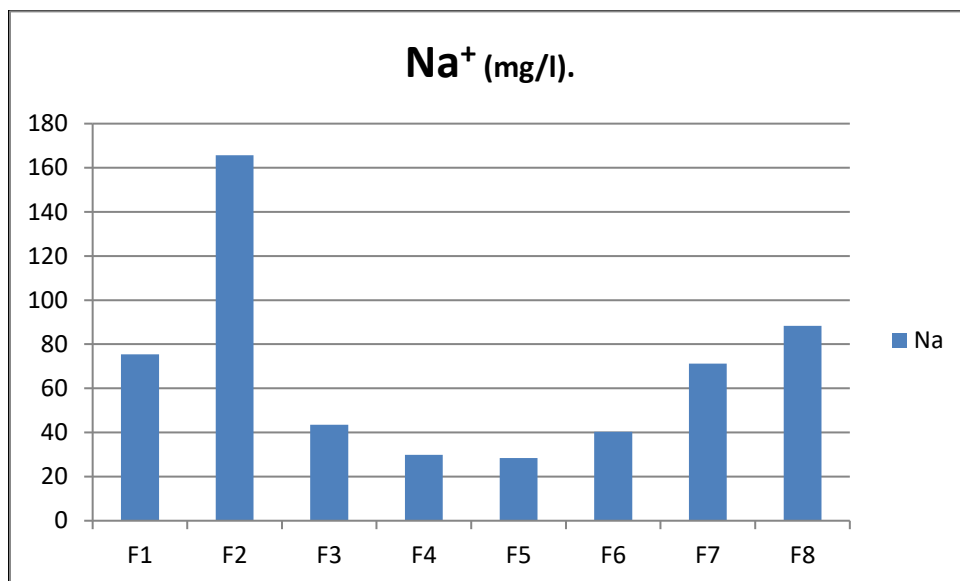


Figure 23. Répartition des concentrations de Na (mg/l).

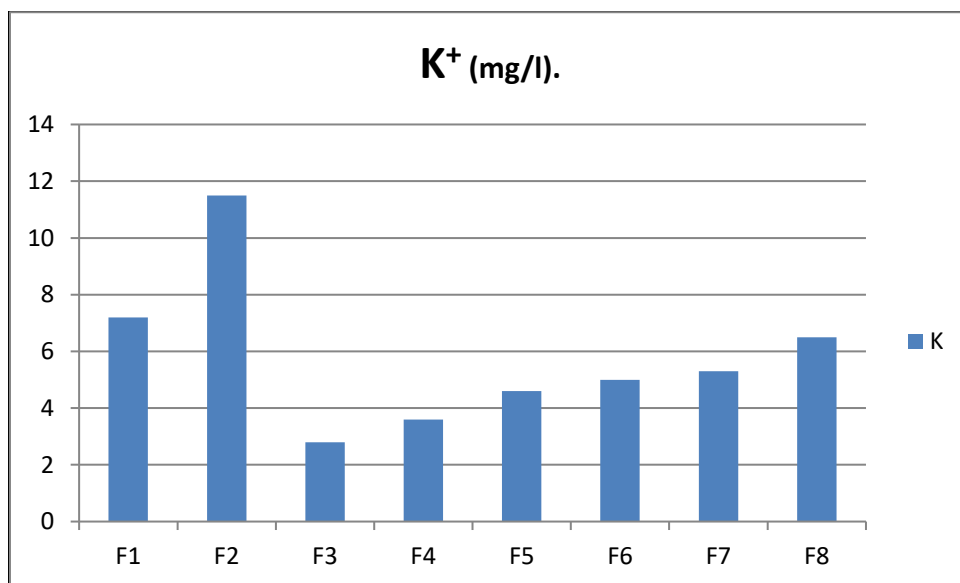
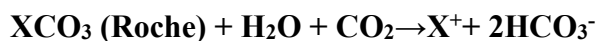


Figure24. Répartition des concentrations de K (mg/l).

2.2.4. Bicarbonates (HCO₃⁻)

Les ions bicarbonatés résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon la relation suivante :



Avec :

X : désigne un élément chimique de la roche.

En d'autres termes, la teneur en (HCO_3^-) dans l'eau dépend d'un certains nombres de paramètres physico-chimiques à savoir :

- la température de l'eau.
- la concentration du (CO_2) dissous.
- la concentration de l'eau en sels ainsi que la nature lithologique des terrains traversés.

Les concentrations en ions bicarbonatés sont varient entre 128,5mg/l (F3) à 796 mg/l (F2). Les valeurs maximales sont rencontrées au niveau des bordures de Djebel Chelia ce qui est dû à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la à la dissolution des formations gypseuses Ca Mg (CO_3). (Daoud D 1995)

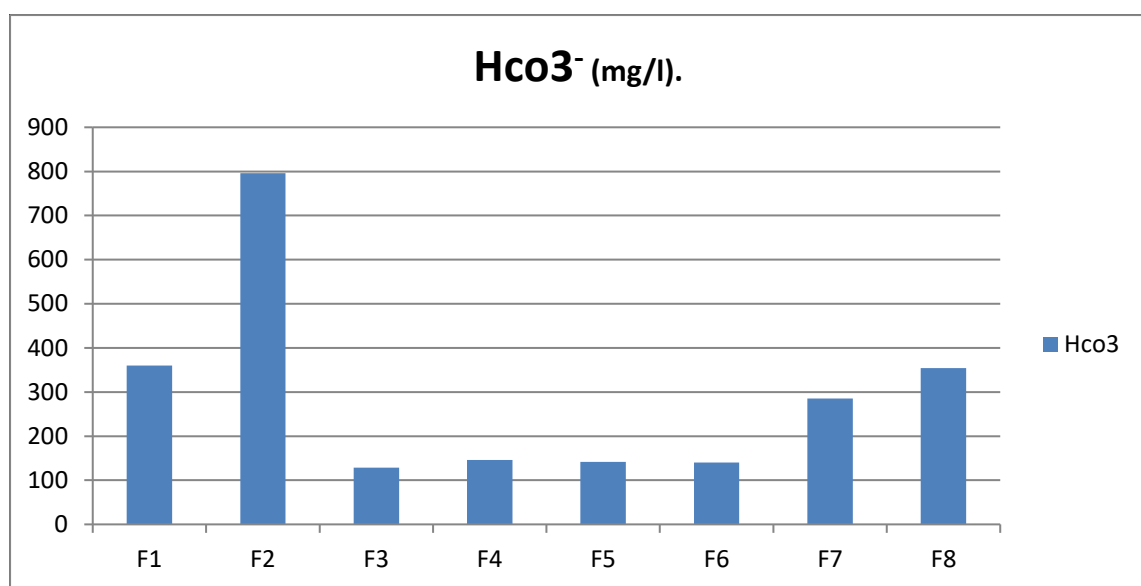


Figure25. Répartition des concentrations de HCO_3^- (mg/l).

2.2.5. Les chlorures (Cl^-)

Les chlorures sont des éléments conservés en solution .il ne subissent aucune interaction eau-roche et ne sont pas dégradés en solution. Ils ont pour origines :

- La dissolution des sols naturels et le lessivage des terrains salifères ;
- Les engrais chimiques et les pesticides utilisés en agriculture ;
- Les rejets des eaux usées d'origines domestique et industrielle.

L'observation du diagramme des chlorures (figure 26) montre que les teneurs varient entre 47 mg/l(F6) et 233 mg/l(F2).. Les argiles et les alluvions du dépôt de remplissage Mio-Plio-Quaternaire et les dépôts salifères, provenant de l'érosion des formations gypsifères de Djebel Chelia constituent l'origine de ces chlorures. Une deuxième origine serait attachée à l'activité anthropique liée à l'agriculture utilisant dans la région (Houha, 2007).

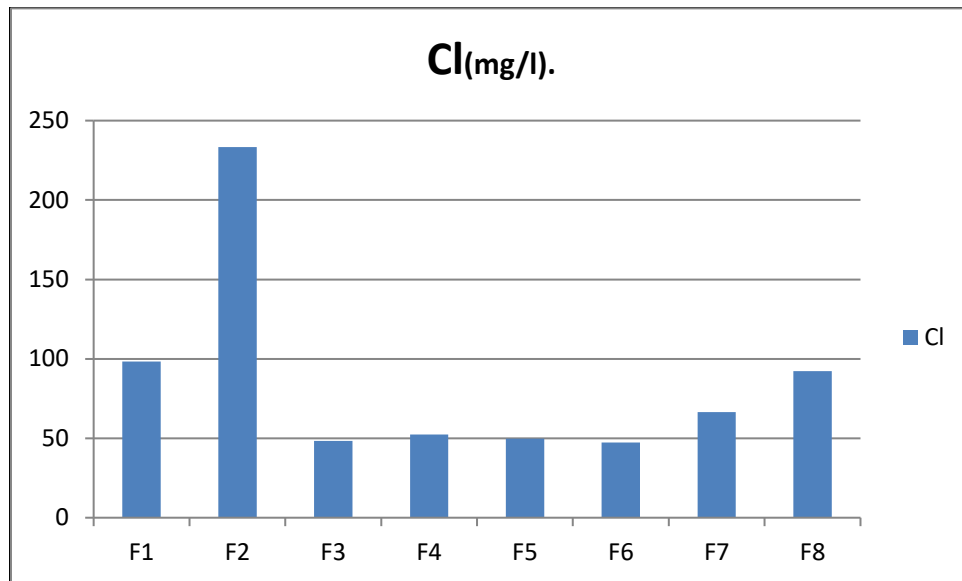


Figure 26. Répartition des concentrations de Cl (mg/l).

2.2.6. Les sulfates (SO_4^{2-})

La concentration en sulfates des eaux naturelles des terrains à faibles teneurs en minéraux sulfatés est généralement inférieure à 50 mg/l (soit 1,04 méq/l) (Rodier et al, 1984).

L'augmentation des sulfates peut provenir en grande partie de la dissolution des minéraux évaporitiques, de l'oxydation du soufre des roches sédimentaires et/ou de pollution urbaine, industrielle et agricole. (Berkani, 2017)

Le diagramme représentant les teneurs des sulfates (figur. 27), montre que les valeurs varient de 98 mg/l(F6) à 366,8 mg/l(F2). Les fortes concentrations sont dues, d'une part, à la dissolution des gypses qui sont contenus dans les marnes emschériennes, et d'autre part au lessivage des dépôts évaporitiques, provenant de Djebel Chelia. Une deuxième origine serait attachée à l'activité anthropique liée à l'agriculture utilisant dans la région des produits chimiques riches en sulfates. (Belkoun 2017)

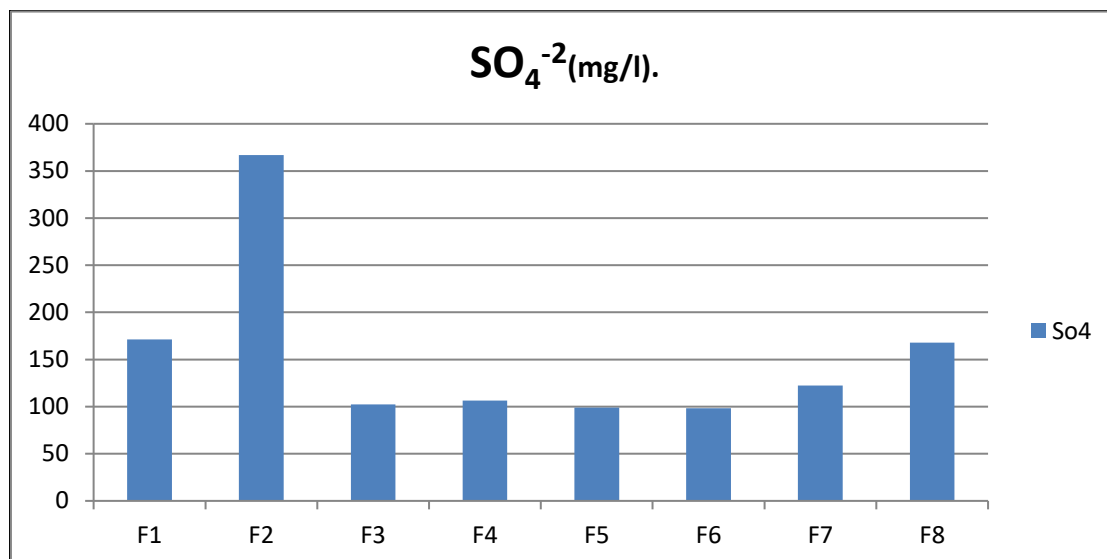


Figure 27. Répartition des concentrations de SO_4 (mg/l).

2.3. Le faciès chimique des eaux échantillonnées

Les faciès hydrochimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité de permettre une comparaison aisée voire de classer les eaux naturelles selon les échantillons analysés a induit l'utilisation de représentation graphique. De ce fait, plusieurs représentations sont utilisées parmi lesquelles on peut citer, le diagramme à coordonnées rayonnantes, le diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff et le diagramme de Piper. Ce sont ces deux dernières représentations graphiques qui ont été retenues et utilisées dans ce travail.

2. 3.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux. Il est composé de deux triangles équilatéraux à la base surmontés d'un losange au milieu permettant de représenter le faciès hydro-chimiques des eaux par rapport à la concentration relatives des cations et des anions. Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons.

Le diagramme de Piper appliqué aux eaux échantillons (figure.28) montre une évolution du faciès chimique des eaux depuis le pôle bicarbonatée calcique vers un faciès de type sulfatée calcique.

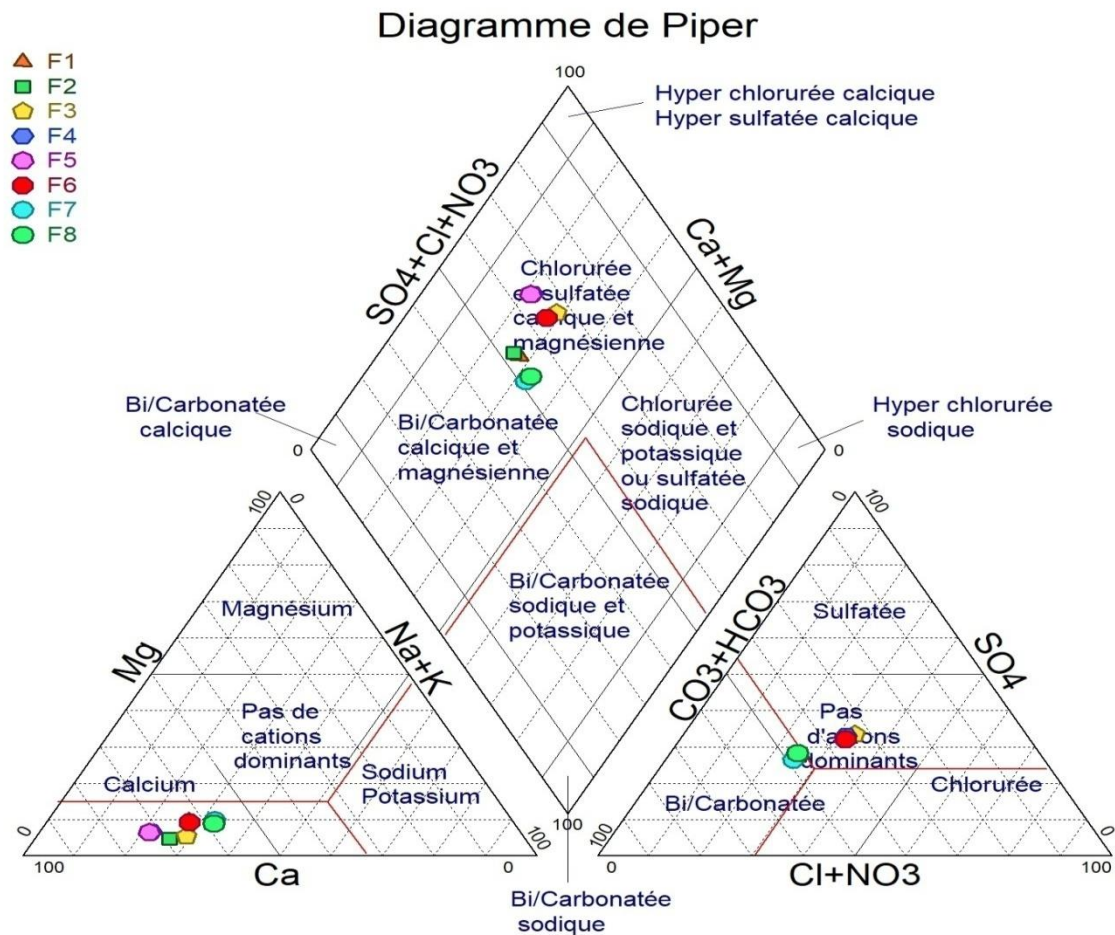


Figure 28 : Diagramme de Piper.

2.3.2. Diagramme de Schoëller et Berkalov

Le diagramme de SchoëllerBerkalov permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. (Houha, B., 2015)

Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. (Gouiadia, 2008)

Il est ainsi possible de visualiser le faciès chimique, comme pour le diagramme de Piper, mais aussi la minéralisation de l'eau (sa charge dissoute), ce qui est appréciable. Toutefois, la visualisation du faciès est moins aisée qu'avec le diagramme de Piper.

La représentation graphique des résultats des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (figure 29), montre que les eaux sont issues d'un même aquifère.

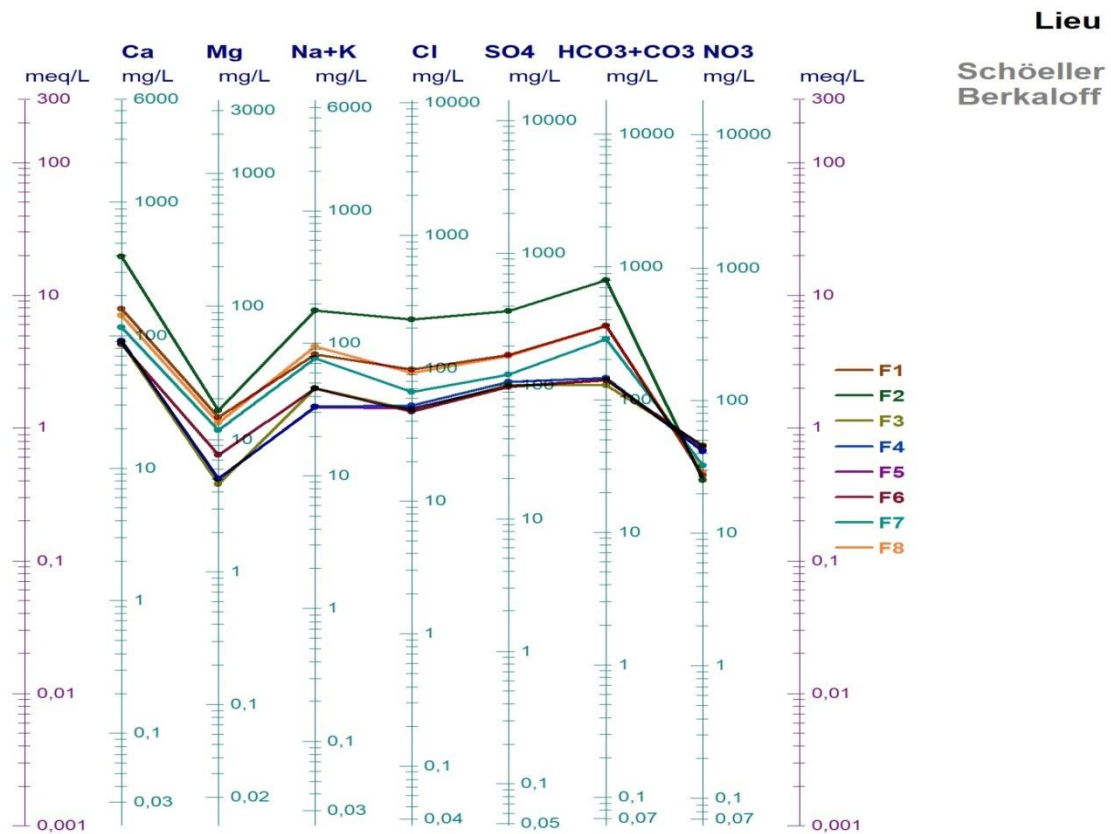


Figure 29 : Diagramme de Schoëller et Berkaloïf .

2.4 Acquisition de la minéralisation des eaux souterraines

Pour mieux discriminer les processus de salinisation des eaux souterraines, nous avons utilisé les diagrammes croisés des concentrations des éléments majeurs avec l'ion chlore (figure.30). Ce dernier est un élément conservé, ne participe pas aux interactions eau-roche, caractérise l'origine de la salinité des eaux et constitue un traceur de mélange (Fidelibuset al, 1996). La disposition des différents points d'eaux analysés par rapport à la ligne de mélange eau douce-eau salée (eau de pluie-eau de mer) peut être de grande utilité pour identifier d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange (Fidelibuset al, 1996). La relation entre Na^+ et Cl^- (fig. 33) montre que tous les points se trouvent au dessous de la droite de mélange. Etant donné que la teneur en Na devrait équilibrer la teneur en Cl^- , le déficit en Na est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère et se traduisant par une adsorption de Na^+ et une libération de Ca^+ . Le graphe Ca^+ contre Cl^- illustre bien ceci en montrant que les points sont au dessus de la droite de mélange eau douce-eau salée.

La relation entre Mg^+ et Cl^- montre que tous des points se trouvent au dessous de la droite de mélange, le déficit en Mg est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère. (Bouderbala, 2014)

Le graphique SO_4^{2-} et Cl^- montre que tous les points se trouvent au dessus de la droite de mélange eau douce - eau salée. L'enrichissement en sulfates serait apporté par la dissolution du gypse et le lessivage d'évaporites et par l'infiltration des eaux d'irrigation, chargées en sels et en fertilisants (Hamed et al, 2014 ;Touhari et al, 2014); facilitée par la faible profondeur de la nappe et la bonne perméabilité des terrains aquifères (Fidelibuset al, 1996 et El Achheb et al, 2002). La relation entre K^+ et Cl^- souligne que la majorité des points se trouve au-dessus montrant que l'origine la plus probable est plutôt la pollution sous l'effet des engrais NPK et/ou à l'argile rouge, très abondante dans la région.

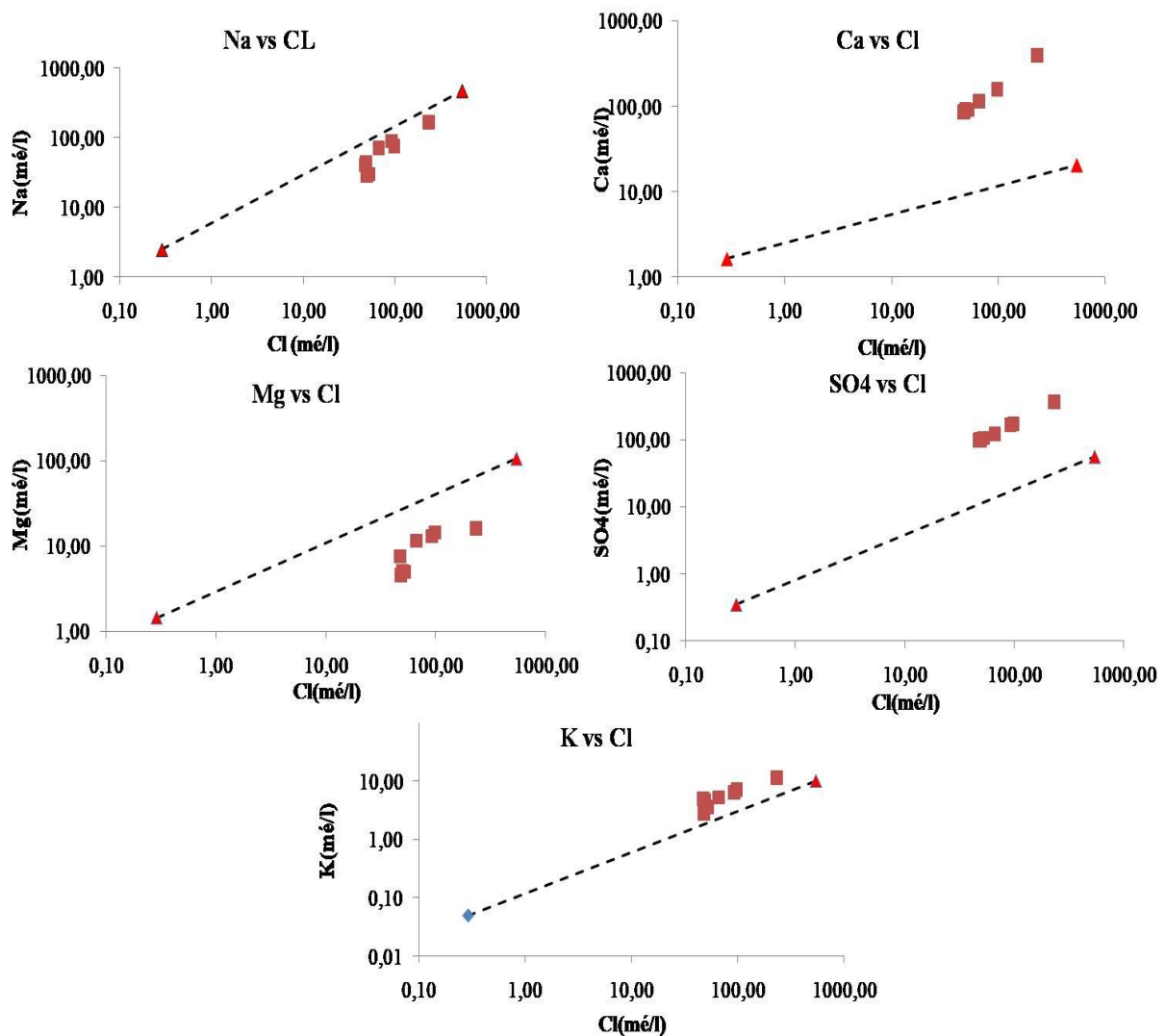


Figure.30. Relation entre les éléments majeurs et les chlorures.

2.5. Géochimie thermodynamique

2.5.1. Equilibre solution minéraux

Dans l'étude thermodynamique des équilibres solution-minéral, on utilise souvent l'activité ionique (a_i) comme expression de la concentration. L'étude des équilibres chimiques des eaux souterraines et leur saturation vis-à-vis des différentes phases minérales se base sur le calcul de ce paramètre. L'activité ionique est liée aux concentrations molaires par la formule de Debye Hückel. Elle tient principalement compte de l'attraction électrostatique entre les ions. Pour une solution idéale (pure), l'activité ionique est égale à la concentration ($a_i = m_i$). Mais pour les solutions réelles, il existe un coefficient de déviation appelé "coefficient d'activité", (λ_i) qui mesure la déviation par rapport à l'état idéal ($a_i = \lambda_i \cdot m_i$). Les indices de saturation permettent de savoir ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de se précipiter dans l'aquifère. La dissolution de ces minéraux se fait de manière congruente ou incongruente. Si un minéral (D) dans le milieu se dissout de façon congruente pour produire ($U^+ + V^-$) alors l'indice de saturation (IS) peut s'écrire :

$$IS = \log \frac{(PAI)}{K_s} \text{ (Plummer et al, 1984).}$$

où K_s (constante d'équilibre) est le produit de $[U^+] \times [V^-]$, et PAI Produit d'Activité Ionique.

Si $K_s = PAI$ alors $IS = 0$: l'eau est dite saturée vis-à-vis du minéral D considéré,

Si $K_s < PAI$ alors $IS < 0$: l'eau est dite sous-saturée vis-à-vis du minéral D,

Si $K_s > PAI$ alors $IS > 0$: l'eau est dite sur-saturée vis-à-vis du minéral D.

L'utilisation du programme géochimique de PHREEQ, intégré dans le programme Diagramme des calculs hydrochimiques (Smiler. 2005) nous a permis de calculer l'indice de saturation de l'anhydrite, de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite, du gypse et de l'halite.

Les résultats significatifs de tous les échantillons d'eau souterraine analysés (tableau.6), montrent que ces eaux sont saturées vis-à-vis de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite et sous-saturées vis-à-vis de l'halite, de l'anhydrite et du gypse. Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, notamment sous la forme de calcite et de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques (gypse et halite) tendent à la dissolution. (Plummer et al, 1984).

Tableau 6 : Indice de saturation des eaux échantillonnés.

Indice de saturation					
Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Halite
-1.62	-0.17	-0.02	-0.7	-1.4	-6.92
-1.44	-0.02	0.13	-0.43	-1.22	-6.69
-1.4	0.03	0.17	-0.34	-1.18	-6.74
-0.9	0.64	0.79	0.54	-0.68	-6.06
-1.73	-0.58	-0.44	-1.83	-1.51	-7.26
-1.7	-0.52	-0.38	-1.67	-1.48	-7.39
-1.73	-0.53	-0.38	-1.68	-1.51	-7.43
-1.76	-0.56	-0.42	-1.54	-1.54	-7.3

Conclusion

Les eaux souterraines de la zone d'étude présentent d'importantes variations chimiques induites par l'aridité du climat, dissolution minérale et l'activité anthropique. Le diagramme de Piper appliqué aux eaux échantillons montre une évolution du faciès chimique des eaux depuis le pôle bicarbonatée calcique vers un faciès de type sulfatée calcique. Ces faciès chimiques sont déterminés par l'interaction eau-roches, la dissolution et les précipitations minérales, à travers les échanges cationiques tout au long de l'écoulement de l'eau vers son exutoire. L'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels et fertilisants dans les périmètres irrigués est un processus secondaire de minéralisation des eaux souterraine.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter, notamment sous la forme de calcite et de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques (gypse et halite) tendent à la dissolution.

Conclusion générale

Cette étude a permis d'établir un portrait détaillé de la qualité des eaux souterraines dans la région de Kantina à Khenchela, soulignant les défis pour une gestion durable de ces ressources. Les analyses physico-chimiques ont révélé des variations significatives affectant la salinité et, par conséquent, la qualité de l'eau. Les paramètres physiques, tels que la température, le pH et la conductivité électrique, ainsi que les paramètres chimiques, incluant les concentrations de calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, chlorures et sulfates, ont fourni des informations essentielles sur les interactions entre les eaux souterraines, la géologie locale et le climat.

Dans la région étudiée, le Crétacé inférieur se caractérise par des dépôts de calcaires marneux, de marnes, de calcaires gréseux et de calcaires compacts. Les formations de l'Aptien et de l'Albien sont visibles dans le massif des Aurès. L'Albien, présent dans les anticlinaux des Aurès, affiche souvent un faciès gréseux, marneux et dolomitique, devenant nettement marneux à la base.

La région étudiée est soumise à un climat semi-aride, caractérisé par environ six mois de sécheresse. Les hivers sont froids et pluvieux, tandis que les étés sont chauds et secs. Les précipitations annuelles moyennes, mesurées sur une période de 21 ans (1998-2018), sont de 466,78 mm. La température moyenne annuelle est de 16°C. La répartition mensuelle des précipitations met en évidence deux grandes saisons distinctes : une saison humide de novembre à mai et une saison sèche de juin à août.

Paramètres Physiques des Eaux Souterraines :

- La température des eaux souterraines varie entre 17°C et 19°C, en équilibre avec la température annuelle moyenne de l'air.
- Le pH des eaux oscille entre 7,3 et 7,8, indiquant des eaux neutres à légèrement alcalines, attribuées à la présence de roches sédimentaires carbonatées.
- La conductivité électrique varie de 923 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 3948 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflétant la concentration des sels dissous.

Les Paramètres Chimiques :

- Les concentrations en calcium varient de 85,44 mg/l à 396,6 mg/l, principalement dues à la dissolution des formations carbonatées et des dépôts évaporitiques.
- Les concentrations en magnésium se situent entre 4,55 mg/l et 16,37 mg/l, provenant de la dissolution des formations dolomitiques et magnésiennes.
- Les concentrations combinées de sodium et de potassium varient de 45 mg/l à 177 mg/l, issues du lessivage des formations géologiques et des engrais chimiques.

- Les bicarbonates vont de 128,5 mg/l à 796 mg/l, liés à la dissolution des formations carbonatées et gypseuses.
- Les teneurs en chlorures varient entre 47 mg/l et 233 mg/l, provenant de l'érosion des formations gypsifères et de l'activité agricole.
- Les concentrations en sulfates varient de 98 mg/l à 366,8 mg/l, dues principalement à la dissolution des gypses et à l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en fertilisants.

Le diagramme de Piper appliqué aux eaux échantillons montre une évolution du faciès chimique des eaux depuis le pôle bicarbonatée calcique vers un faciès de type sulfatée calcique. Ces faciès chimiques sont déterminés par l'interaction eau-roches, la dissolution et les précipitations minérales, à travers les échanges cationiques tout au long de l'écoulement de l'eau vers son exutoire. L'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels et fertilisants dans les périmètres irrigués est un processus secondaire de minéralisation des eaux souterraine.

Le diagramme de Schoëller-Berkaloff a également été utilisé pour représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eau, montrant que les eaux proviennent d'un même aquifère.

Les indices de saturation calculés montrent que les eaux souterraines sont saturées en calcite, aragonite et dolomite, mais sous-saturées en halite, anhydrite et gypse. Cela indique une tendance à la précipitation des minéraux carbonatés, tandis que les minéraux évaporitiques tendent à se dissoudre.

En conclusion, cette étude a permis de caractériser précisément la qualité des eaux souterraines de Kantina à Khenchela, tout en mettant en évidence les défis pour une gestion durable de ces ressources aquifères. Les résultats montrent clairement la nécessité d'une gestion intégrée des eaux souterraines, prenant en compte à la fois les aspects géologiques et les impacts anthropiques, afin de préserver la qualité de l'eau face aux défis de l'exploitation excessive et des changements climatiques. En définitive, cette recherche fournit des éléments cruciaux pour une prise de décision éclairée en matière de politiques de l'eau et offre une base solide pour des études futures visant à la protection et à la gestion durable des aquifères de la région.

Les résultats de cette étude mettent en évidence la nécessité d'une gestion intégrée des eaux souterraines, prenant en compte les aspects géologiques et les impacts anthropiques. Voici quelques recommandations clés :

- Surveillance Continue : Mettre en place un programme de surveillance continue des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines pour détecter rapidement les variations de qualité.
- Protection des Zones de Recharge : Identifier et protéger les zones de recharge des aquifères pour garantir la pérennité des ressources en eau.
- Gestion des Activités Agricoles : Adopter des pratiques agricoles durables pour minimiser l'impact des engrais et des produits chimiques sur les eaux souterraines.
- Sensibilisation et Formation : Sensibiliser les agriculteurs et la population locale à l'importance de la préservation des ressources en eau et les former aux meilleures pratiques de gestion.
- Mettre en œuvre des systèmes de gestion des déchets solides et liquides efficaces pour prévenir la contamination des eaux souterraines par les déchets domestiques, industriels et agricoles.
- Encourager la recherche et l'innovation dans le domaine de la gestion des eaux souterraines pour développer de nouvelles technologies et méthodes de préservation des ressources.

Références bibliographiques :

- Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N. (2012). Hydrogéologie (2ème éd., pp. 1-24). Presses internationales polytechnique.
- ANRH. (2002). Synthèse hydrogéologique et actualisation des données relatives de la plaine Rémila-Khenchela.
- Aouidane, L. (2017). Origines de la salinisation des eaux et des sols d'une zone à climat semi-aride : Cas de Remila (W. Khenchela) (Doctoral dissertation, Université de Biskra).
- Belkoum, N. (2017). L'apport de l'hydrochimie et des isotopes de la molécule d'eau dans l'étude de l'impact des eaux de barrage sur la qualité des eaux souterraines dans les bassins endoréiques. Cas du bassin de Chemora. Algérie-Orientale (Thèse de doctorat). Université Abbes Laghrour, Khenchela, Algérie.
- Berkani, C., & Houha, B. (2017). Physico-chemical and therapeutic characteristics of the thermo-mineral waters of Khenchela.
- Bouchagoura, L. (2003). Mise en évidence des diverses pollutions dans la nappe alluviale de Tebessa (Mémoire de Magister). Université d'Annaba, Annaba, Algérie.
- Bouderbala, A. (2015). Groundwater salinisation in semi-arid zones: An example from Nador plain (Tipaza, Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 5479-5496.
- Boutaleb, S., & Bouchaou, L. (2006). Étude de faisabilité de la recharge artificielle des formations calcaires en zone semi-aride. Cas de l'oued Tagmoute, (Anti-Atlas occidental, Maroc). In N. Goldscheider, J. Mudry, L. Savoy, & F. Zwahlen (Eds.), *Actes du 8e colloque d'hydrogéologie en pays calcaire* (pp. 268). Presses universitaires de Franche-Comté. ISBN 2-84867-143-2.
- Cherchali, M. E. H. (2008). Caractérisation hydrogéo-chimique et isotopique des eaux souterraines des nappes d'infero-flux et du socle fissuré du Hoggar central (Sahara Central) (Mémoire de Magister en sciences de la terre). Université Houari Boumediene, Alger, Algérie.

- Compagnie générale de géophysique (CGG). (1970). Étude géophysique de la plaine de Rémila.
- Daoud, D. (1995). Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines et estimation du taux d'évaporation dans le bassin du Chott Chergui (zone semi-aride).
- Direction hydraulique de la wilaya de Khenchela. (2006, March). Etude d'avant projet détaillé du barrage de Tagharist : Mission 3.
- El Achheb, A. (2002). Contribution à l'étude de la minéralisation et identification des sources de contamination des eaux souterraines. Application au système aquifère du bassin Sahel-Doukkala (Maroc) (Doctoral thesis). University of Chouaïb Doukkali, Morocco.
- Fidelibus, M. D., & Tulipano, L. (1996). Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy). In Proceedings of the 14th Salt Water Intrusion Meeting (Rapporter och meddelanden No. 87, pp. 230-241).
- Gouaidia, L. (2008). Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est Algérien (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar-Annaba, Annaba, Algérie.
- Hamed, A., Baali, B., Hadji, R., Zerrouki, H., Besser, H., Mokadem, N., Legrioui, R., & Hamed, Y. (2018). Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian transboundary basin). Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 3(7).
- Hamed, Y., Dassi, L., Tarki, M., Ahmadi, R., Mehdi, K., & Ben Dhia, H. (2010). Groundwater origins and mixing pattern in the multilayer aquifer system of the Gafsa-south mining district: A chemical and isotopic approach. Environmental Earth Sciences.
- Houha, B. (2007). Etude du fonctionnement hydrogéochimique et salin d'un bassin semi-aride : Remila-Khenchela (Doctoral dissertation, University of Annaba, Algeria).

- Houha, B. (2015). Using contribution of stable isotopes (^{18}O and ^2H) in the estimation of recharging altitudes of thermal sources in Aures massif. Algeria (Dissertation, University of Constantine).
- Jacob, F., Olioso, A., Gu, X. F., Su, Z., & Seguin, B. (2002). Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model. *Agronomie*, 22, 669-680.
- Kergreis, A., & Clande, J. (1991). Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. John Libbey Eurotext.
- Lambert, R. (1996). Géographie du cycle de l'eau. Presses universitaires du Mirail.
- Legube, B. (1996). Le traitement des eaux de surface pour la production d'eau potable. Guide technique de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne.
- Plummer, L. N., Jones, B. F., & Truesdell, A. H. (1976). WATEQ-A fortran IV version of WATEQ: A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters (Revised 1978, 1984). Washington, D.C.: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations, Report No. 76-13.
- Remenieras, G. (1986). Hydrologie de l'ingénieur. Paris: Eyrolles.
- Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). L'Analyse de l'Eau. DUNOD.
- Sekkiou, S. E. (2020). Caractérisation physico-chimiques des eaux du massif de Chelia-Aurès-Khenchela (Doctoral dissertation, Université Khenchela).
- Simler, R. (2004). Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon.
- Station météorologique d'El Hamma. (1998-2018). Données météorologiques de 1998 à 2018.
- Seghir, K., & Khérici, N. (2008). Impact de la sécheresse sur les ressources hydriques dans une région semi-aride. Caractérisation hydrogéologique, hydrochimique, bactériologique: Cas de la nappe alluviale Ain chabro-Hammamet (Nord Est Algérien). Réunion des Sciences de la Terre, du 21-24 Avril 2008, Nancy, France.

- Santé Canada. (1992). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Document technique – Le sodium. Retrieved from <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/recommandations-pour-qualite-eau-potable-canada-document-technique-sodium.html>
- Vila, J. M. (1977). Carte géologique de l'Algérie et notices explicatives.

Résumé :

Les eaux souterraines de Kantina présentent d'importantes variations chimiques induites par l'aridité du climat, la dissolution minérale et l'activité agricole. L'utilisation des techniques géochimiques a identifié que l'évolution des faciès chimiques se fait depuis le pôle bicarbonaté calcique vers un faciès majeur de type sulfaté calcique. Ces faciès chimiques sont déterminés par l'interaction eau-roches, la dissolution et les précipitations minérales, à travers les échanges cationiques tout au long de l'écoulement de l'eau vers son exutoire et l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en sels et en fertilisants dans les périmètres irrigués. Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, notamment sous la forme de calcite et de dolomite. Par contre, les minéraux évaporitiques (gypse et halite) tendent à la dissolution.

Mots clés : Kantina, eaux souterraines, faciès chimique, irrigation, fertilisants.

Abstract:

The groundwater of Kantina exhibits significant chemical variations induced by the aridity of the climate, mineral dissolution, and agricultural activity. Geochemical techniques have revealed that the evolution of the chemical facies progresses from a calcium bicarbonate base towards a predominant calcium sulfate facies. These chemical facies are shaped by water-rock interactions, dissolution, and mineral precipitation, through cationic exchanges occurring as water flows towards its outlet and as irrigation waters laden with salts and fertilizers infiltrate the irrigated areas. The calculation of the mineral saturation index in the water shows that only carbonate minerals tend to precipitate, specifically in the forms of calcite and dolomite. Conversely, evaporitic minerals (gypsum and halite) tend to dissolve.

Keywords: Kantina, Groundwater, Chemical Facies, Irrigation, Fertilizers.

المخلص:

تظهر المياه الجوفية في كانتينا تغيرات كيميائية هامة ناجمة عن جفاف المناخ، وذوبان المعادن، والنشاط الزراعي. كشفت التقنيات الجيوكيميائية أن تطور الأوجه الكيميائية يتقدم من قاعدة البيكربونات الكالسيومية إلى الوجه الكبريتاتي الكالسيومي السائد. تتشكل هذه الأوجه الكيميائية نتيجة تفاعلات الماء مع الصخور وذوبان المعادن وترسيبها، من خلال التبادل الكاتيوني الحاصل أثناء تدفق المياه نحو مخرجها وتسرب مياه الري المحملة بالأملاح والمسمدات في المناطق المرورية. يظهر حساب مؤشر التشبع بالمعادن في المياه أن المعادن الكربوناتية فقط هي التي تميل إلى الترسيب، وخصوصًا في أشكال الكالسيت والدولوميت، بينما تميل المعادن البخارية (الجبس والملح) إلى الذوبان.

الكلمات المفتاحية: كانتينا، المياه الجوفية، الأوجه الكيميائية، السقي، المسمدات.