



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Popular Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry Of High Education and Scientific Research
جامعة عباس لغرور خنشلة
Abbes Laghrouj University, Khenchela
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculty of Natural and Life Sciences
قسم البيئة والمحيط
Department Of Ecology and Environment



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Écologie et Environnement

Option : Protection des Écosystème

THEME

*Étude comparative entre les eaux thermales de hammam
Essalhine et hammam Djaarir -KHENCHELA-*

Présenté par:

Ghenimi Ilyes charaf eddine & Feradi Akrem dhaia eddine

Jury de soutenance:

Présidente: Mme. BERAKNI Cherifa

MCA Univ - Khenchela

Encadrant: Dr. BELKOUM Noureddine

MCB Univ - Khenchela

Examinatrice: Mme. MEZHOUD Amel

MAA Univ - Khenchela

2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Dieu merci pour la santé, la volonté, la passion et la détermination qui nous ont accompagnés durant la période de préparation de cette mémoire de Master et qui nous ont permis de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur, le **Dr. BELKOUM NOUREDDINE** pour sa présence, ses précieux conseils et orientations, son travail acharné, et sa grande contribution à l'aboutissement de ce travail. On le remercie pour nous avoir donné la chance de vivre cette expérience.

Nous remercions également le **Dr. Abbabssa**, qui nous a dirigés durant cette période de recherche et pour ses conseils.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux honorables membres du jury **MEZHOUD AMEL ET BERKANI CHERIFA** pour leur approbation d'examiner notre modeste travail.

Sans oublier de remercier tous les enseignants du primaire au stade universitaire qui ont contribué à nous fournir des fournitures scientifiques tout au long de la période de notre étude.

Un spécial merci à **madame SOUAD** pour sa précieuse aide lors de notre passage au laboratoire.

Finalement nos remerciements sont dressés plus particulièrement à nos familles et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

DEDICASE

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

Que dieu vous garder pour nous, longue vie Inchaallah.

À toute la famille GHENIMI.

À mes cher (e) s ami (e) s et tous mes camarades.

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

ILYES CHARAF EDDINE

DEDICASE

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents qui m'ont tout donné pour que je devienne ce que je suis

Mes frères et tous les membres de ma grande famille

Mes collègues et mes copains

Mes amis et Tous ceux qui m'ont encouragé, Soutenu et aidé de près ou de loin. Tous ceux qui croient que'

« Il n'est jamais trop tard pour mieux faire »

AKREM

Résumé

Notre étude est réalisée sur les eaux thermo minérales de la région de Khenchela – Hammam Essalhine et Hammam Djaarir – Nord-Est de l'Algérie. Le but de cette étude est de déterminer l'origine physico-chimique et géothermique de la source thermique (température, pH, conductivité électrique, anion et cation). Les températures des échantillons d'eau thermique étudiés variaient de 37 à 65°C ; cette variation est donc directement liée aux conditions climatiques et/ou à la combinaison de l'eau provenant de diverses sources dans la formation de la source thermique. De plus, la valeur du pH de la source étudiée est de qualité neutre à légèrement alcaline, tandis que ses conductivités électriques sont élevées, allant de 1848 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ à 2620 $\mu\text{S}/\text{Cm}$. Le diagramme de Piper présentait la domination des faciès chlorure de sodium (Na-Cl). Ces faciès indiquent la composition minérale des eaux thermales, produit du réservoir par les formations géologiques du sous-sol. Ceci est une raison plausible des changements chimiques observés dans les fluides et peut très bien être associé à la forte influence de l'interaction eau-roche, c'est-à-dire de la formation d'eau de bicarbonate de sodium à la formation d'eau chlorée de sodium, où elle est liée à l'effet de dissolution et de salinité dans la formation de la salive trouvés dans les régions aux conditions climatiques semi-arides. Les eaux des sources Essalhinee et Djaarir ne peuvent pas être destinées à la consommation humaine, on peut utiliser les eaux de Djaarir pour l'irrigation mais pas les eaux de la source Essalhinee. Elles peuvent être utilisées uniquement pour la baignade.

Mots-clés: Hammam Essalhinee, Hammam Djaarir, eaux thermo minérales, faciès chimique, irrigation.

Abstract

Summary: Our study is carried out on the thermomineral waters of the region of Khenchela – Hammam Essalhine and Hammam Djaarir – North-East of Algeria. The aim of this study is to determine the physico-chemical and geothermal origin of the thermal spring (temperature, pH, electrical conductivity, anion and cation). The temperatures of the thermal water samples studied varied from 37 to 65°C; This variation is therefore directly linked to climatic conditions and/or the combination of water from various sources in the formation of the thermal spring. Furthermore, the pH value of the studied source is of neutral to slightly alkaline quality, while its electrical conductivities are high, ranging from 1848 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ to 2620 $\mu\text{S}/\text{Cm}$. The Piper diagrams showed the dominance of sodium chloride (Na-Cl) facies. These facies indicate the mineral composition of the thermal waters, produced from the reservoir by the geological formations of the subsoil. This is a plausible reason for the chemical changes observed in the fluids and may well be associated with the

strong influence of water-rock interaction, i.e., from the formation of sodium bicarbonate water to the formation of sodium chlorinated water, where it is linked to the effects of dissolution and salinity in the formation of saliva found in regions with semi-arid climatic conditions. The waters of the Essalhinee and Djaarir springs cannot be intended for human consumption; the waters of Djaarir can be used for irrigation but not the waters of the Essalhinee spring. They can only be used for swimming.

Keywords: Hammam Essalhinee, Hammam Djaarir, thermomineral waters, chemical facies, irrigation.

ملخص

أجريت دراستنا على المياه المعدنية الحرارية لمنطقة خنشلة – حمام الصالحين وحمام جعير – شمال شرق الجزائر. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد الأصل الفيزيائي والكيميائي والطاقة الحرارية الأرضية للينابيع الحرارية (درجة الحرارة ودرجة الحموضة والتوصيل الكهربائي والأيونات والكاتيونات). وتراوحت درجات حرارة عينات المياه الحرارية التي تمت دراستها من 37 إلى 65 درجة مئوية؛ ولذلك يرتبط هذا الاختلاف ارتباطاً مباشراً بالظروف المناخية و/أو مزيج المياه من مصادر مختلفة في تكوين الينابيع الحرارية. علاوة على ذلك، فإن قيمة الرقم الهيدروجيني للمصدر المدروس هي ذات جودة محايدة إلى قاعدية قليلاً، في حين أن موصليته الكهربائية عالية، حيث تتراوح من 1848 ميكرو سيميز/سم إلى 2620 ميكرو سيميز/سم. أظهرت مخططات بايير سيادة شحنة كلوريد الصوديوم (Na-Cl). وتشير هذه الشحنات إلى التركيب المعدني للمياه الحرارية، التي تنتج من الخزان عن طريق التكوينات الجيولوجية لباطن الأرض. وهذا سبب معقول للتغيرات الكيميائية الملحوظة في السوائل وقد يكون مرتبطاً بالتأثير القوي للتفاعل بين الماء والصخر، أي من تكوين ماء بيكربونات الصوديوم إلى تكوين الماء الكلور الصوديوم، حيث يرتبط بالمركب. آثار الذوبان والملوحة في تكوين اللعاب توجد في المناطق ذات الظروف المناخية شبه القاحلة. لا يمكن أن تكون مياه ينابيع الصالحين وجعير مخصصة للاستهلاك البشري؛ يمكن استخدام مياه جعير للري ولكن ليس مياه نبع الصالحين. لا يمكن استخدامها إلا للسباحة.

الكلمات المفتاحية: حمام الصالحين، حمام جعير، المياه المعدنية الحرارية، الشحنات الكيميائية، الري.

Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 1

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LES EAUX THERMALES

Introduction..... 3

1.1 Historique 3

1.2 Définition de la thermalité..... 3

1.3 Eau thermale..... 4

1.3.1 Étymologies 4

1.3.2 Définitions..... 4

1.4 Classification des eaux thermales..... 5

1.4.1 Selon la température d'émergence..... 5

1.4.2 Selon la minéralisation..... 6

1.5 Les principales propriétés de l'eau thermale..... 7

1.6 Les bienfaits des eaux thermales 8

1.7 L'hydrothermalisme 8

1.7.1 L'hydrothermalisme et le magmatisme..... 8

1.7.2 L'hydrothermalisme et la géothermie 9

1.8 Les causes de la thermalité..... 9

1.8.1 Les réactions chimiques exothermiques 10

1.8.2 La désintégration des minéraux radioactifs 10

1.8.3 Le gradient géothermique 10

1.8.4 Les mouvements de l'écorce terrestre..... 11

CHAPITRE 2: PRESENTATION DU SECTEUR ET CONTEXTE GEOLOGIQUE

Introduction..... 12

2.1	Présentation générale.....	12
2.1.1	Description générale et localisation de la wilaya de Khenchela.....	12
2.2	Caractères géomorphologiques, géologiques et pédologiques.....	13
2.2.1	Caractères géomorphologiques.....	13
2.3	Géologie.....	15
2.3.1	Lithostratigraphie.....	15
2.4	Caractères pédologiques.....	20
2.5	Caractères hydrographiques.....	22
2.6	Conclusion.....	23

CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUE CLIMATOLOGIQUE

	Introduction.....	24
3.1	Données climatiques.....	24
3.1.1	Les précipitations:.....	25
3.1.2	Les températures.....	26
3.2	Caractérisation du climat.....	27
3.2.1	Diagramme pluviothermique.....	27
3.2.2	Indice de Martonne.....	28
3.3	Le bilan hydrique.....	28
3.3.1	Interprétation du bilan hydrique.....	31
3.4	Ruissellement superficiel et l'infiltration.....	32
3.5	Conclusion.....	32

CHAPITRE 4 : GEOCHIMIE DES EAUX THERMALES

	Introduction.....	33
4.1	Méthodes et stratégie de travail.....	33
4.1.1	Échantillonnage.....	33
4.2	Analyse physico-chimique.....	34
4.2.1	Mesures in situ.....	34
4.2.2	Analyse des éléments chimiques.....	34

4.2.2.1	Les bicarbonates (HCO_3^-)	34
4.2.2.2	La dureté totale TH ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)	34
4.2.2.3	Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+)	34
4.2.2.4	Les chlorures (Cl^-)	34
4.2.2.5	Sulfates (SO_4^-)	34
4.3	Variation spatiale des paramètres physico- chimiques.....	35
4.3.1	Paramètres physiques.....	35
4.3.1.1	La Température.....	35
4.3.1.2	Le potentiel hydrogène (pH).....	36
4.3.1.3	Conductivité électrique.....	36
4.3.2	Evaluation spatiale des éléments chimiques majeurs	37
4.3.2.1	Le calcium (Ca^{2+})	37
4.3.2.2	Le Magnésium (Mg^{2+})	38
4.3.2.3	Le Sodium Na^+ et le potassium K^+	38
4.3.2.4	Bicarbonates (HCO_3^-)	39
4.3.2.5	Les chlorures (Cl^-)	40
4.3.2.6	Les sulfates (SO_4^{-2}).....	41
4.3.2.7	Paramètre organoleptique odeur	41
4.3.3	Le faciès chimique des eaux échantillonnées	42
4.3.3.1	Diagramme de Piper	42
4.3.3.2	Diagramme de Schoëller et Berkalov	43
4.3.3.3	Diagramme de Stabler	44
4.3.3.4	Qualité des eaux pour l'irrigation selon Wilcox.....	44
4.4	Conclusion.....	45
	Conclusion générale.....	46
	Références bibliographiques	47
	Annexe	50

Liste des figures

Figure1 : Source thermale.	5
Figure2 : Modèle de circulation des fluides au sein d'un système hydrothermal d'un volcan.	9
Figure3: Situation de la wilaya de Khenchela.	13
Figure4 : Carte de relief de la wilaya de Khenchela	14
Figure5 : carte géologique de khenchela.....	20
Figure6 : Carte des classes des sols de la wilaya de Khenchela.	21
Figure7 : Carte hydrologique de la wilaya de Khenchela.	22
Figure8 : Les précipitations moyennes mensuelles pour période de 21 ans (1998-2018).	25
Figure9 : Les précipitations moyennes annuelles pour période de 21 ans (1998-2018).	25
Figure10 : Températures moyennes mensuelles à la station d'Al Hamma (1998-2018).	26
Figure11 : Températures moyennes annuelle à la station d'Al Hamma (1998-2018).	27
Figure12: Courbe pluviothermique (1998-2018).	27
Figure13 : Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de khenchela par la méthode de thornthwaite.	31
Figure14 : Les échantillons dans des flacons en plastiques.	33
Figure15 : Présentation des sites d'échantillonnage.....	33
Figure16 : Répartition des températures (°C) des eaux de la zone d'étude.	35
Figure17 : Répartition des pH des eaux de la zone d'étude.	36
Figure18 : Répartition des conductivités (à 25°C).	37
Figure19 : Répartition des concentrations de Ca ²⁺ (mg/l).	37
Figure20 : Répartition des concentrations de Mg ²⁺ (mg/l).	38
Figure21 : Répartition des concentrations de Na ⁺ (mg/l).	39
Figure22 : Répartition des concentrations de K ⁺ (mg/l).	39
Figure23 : Répartition des concentrations de HCO ₃ ⁻ (mg/l).	40
Figure24 : Répartition des concentrations de Cl ⁻ (mg/l).	41
Figure25 : Répartition des concentrations de SO ₄ ²⁻ (mg/l).	41
Figure26 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Piper.	42
Figure27 : Représentation des sources sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff.	43
Figure28 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Stabler.	44
Figure29 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Wilcox.	45

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des eaux thermales en fonction de leur minéralisation.	6
Tableau 2: Les coordonnées géographiques de la station d'Al Hamma.	25
Tableau 3: Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de kenchela par méthode de thornthwaite.	31
Tableau 4: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux échantillonnés.	35
Tableau 5: Classification des eaux à l'irrigation selon Wilcox.	44

Liste des abréviations

- °C: degré Celsius.
- $\mu\text{s/cm}$: Microsiemens par centimètre.
- CE: Conductivité électrique.
- mg/l: Milligramme par litre.
- pH: potentiel d'hydrogène.
- T: Température.

Introduction générale

Introduction générale

Les eaux thermales sont définies comme celles dont la température est supérieure à la température de l'air de leur environnement. Généralement, par le concept de source chaude, on représente un rejet émergent d'eau de la surface de la terre, sous forme de vapeur ou de liquide chauffé par des processus géothermiques. Le phénomène se manifeste non seulement sur les continents terrestres mais également sous le fond des océans (Espinosa & Garcia, 2004).

L'eau qui s'infiltré en profondeur subit un réchauffement par circulation convective et processus de gradient géothermique. Ils identifient des réservoirs de comportement, la circulation des eaux souterraines et des phénomènes thermiques. ressources en eau. Cela signifie que les systèmes géothermiques intéressent les chercheurs depuis des temps immémoriaux, comme en témoignent les travaux de (Elster et al., 2022. et Déri et al., 2015). Dans les pays du Maghreb, de nombreux des études sur l'hydro environnement et le potentiel des ressources en eau géothermiques ont été menées : l'Afrique du Nord a connu des études pertinentes sur les questions hydrothermales, comme l'indiquent (Barkaoui et al., 2014 ; Jilali et al., 2018). s'est penché sur la caractérisation du potentiel des réservoirs hydrothermaux, même si certains aspects de leur émergence ont été négligés (Berkani et Houha, 2017 ; Chenaker et al., 2018 ; Benmarce et al., 2023). De nombreuses études menées en Tunisie par divers chercheurs ont exploré comme celle explorée par (Trabelsi et al., 2015 et Bouroubi et al., 2021). L'Algérie dispose d'un potentiel thermique important, avec 282 sources thermales et 100 sites disponibles pour de nouveaux projets, dont 60 % sont concentrés dans les régions du nord du pays, tandis que les 40 % restants sont situés dans les régions du sud. (Lakrout et al., 2022) Compte tenu de son immunité à la saisonnalité, le tourisme thermal pourrait constituer un instrument solide pour le développement socio-économique du pays. Avec une lignée historique remontant à l'époque romaine, les thermes tels que aquae Chibilita, aqua Mauretaniae et aquae Sirenes continuent de prospérer à l'époque moderne, notamment sur des sites comme Hammam Guergour, Hammam Ouled Ali et Hammam Essalehine (Kifouche et al., 2023).). Réparties sur tout le territoire algérien, ces sources thermales affichent des températures d'émergence allant de 19°C à Hammam Benharoun à 98°C à Hammam Meskoutine. Les conditions des dépôts sont étroitement liées à divers contextes hydrologiques et morphostructuraux. Les études isotopiques classent les eaux hyperthermales de Guergour au troisième rang mondial, après les bains de Brembach (Allemagne) et de Jachimov (Tchécoslovaquie), avec un niveau de radioactivité de 122 millimicrons-curies/l. Leur composition chimique correspond à celle de l'eau sulfate-calcium et chlorure de sodium (Benmarce et al., 2021).

Issu du vaste patrimoine thermo-minéral algérien, regroupant plus de 200 sources ou sources thermales répertoriées, ce travail se concentre sur trois sources thermales situées dans la région de Khenchela. Plus précisément, les Stations Thermales de Hammam Essalihine (35.4401, 7.0845) et

Introduction générale

Hamam Djaair (35.2795, 6.7893) font l'objet d'attention. L'objectif est de les aligner sur normes professionnelles dans le domaine, améliorant leur réputation, élevant la qualité des services et des soins offerts. Cet effort stratégique vise à positionner ces des stations thermales sur le marché mondial du thermalisme, les intégrer progressivement dans le commerce international canaux.

L'objectif de travail est d'approfondir les différents processus chimiques qui ont un impact sur les caractéristiques distinctives des eaux thermales en utilisant des techniques analytiques avancées d'analyse chimique. Grâce à cela, nous espérons découvrir des informations précieuses sur les origines, la composition et les propriétés géothermiques des eaux thermales, contribuant ainsi à une compréhension plus complète de leur développement géochimique, de leur source de chaleur.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les eaux thermales

Introduction

L'eau thermale est une eau minérale souterraine, naturellement chaude, enrichie en sels minéraux et en oligo-éléments. La majorité des établissements thermaux se situent en milieu montagnard, où l'eau thermale coule au milieu des roches. Ces eaux sont reconnues pour leurs caractéristiques uniques et leurs vertus. L'objectif de ce chapitre est de caractériser ces eaux.

Pour étudier les paramètres physico-chimie des eaux, il est nécessaire de faire:

- L'étude de la thermalité : Définition, Classification thermique, et Origine de la thermalité des eaux thermales .

1.1 Historique

L'homme porte un intérêt particulier aux sources thermo-minérales depuis des millénaires Les traces retrouvées dans les stations thermales remontent à l'époque romaine. (Osmani, 2012).

En effet les romains accordaient une importance très particulière aux sources thermales, très Souvent ils construisirent leurs sites autour de ces sources.

Dans les thermes il y a quatre sections : l'entrée, une pièce à l'eau tiède, une à l'eau chaud et l'autre à l'eau froide. Les sources thermales furent aussi bien exploitées par les arabes mais sans en faire un cadre de vie comme les romains.

Pendant l'époque coloniale les français construisirent des hôpitaux thermaux autour des sources pour y soigner les blessés et convalescents.

Dans les années 1960 à 1980, les études sur les sources thermales tentent de mettre en relation la nature de la source avec le contexte géologique.

Dans les années 1990, la nature et la répartition des sources thermales sont analysées à l'échelle de nombreux pays, en Espagne, En Slovaquie, au Canada, et en Russie Aujourd'hui comme dans le passé les stations thermales sont très sollicitées par les algériens pour divers traitements d'ordre rhumatologique, dermatologique et psychiatre (Ouali, 2008)

1.2 Définition de la thermalité

Différentes définitions ont été données pour une eau thermale:

- La définition de Schoeller: considère comme thermales les eaux dont la température à l'émergence est supérieure à la température moyenne annuelle de l'air de la région (plus de 4°C) (Schoeller, 1962).

CHAPITRE 1 : Généralités sur les eaux thermales

Il est important de signaler que la température mesurée à l'émergence n'est pas forcément représentative de la température réelle de la source, un refroidissement des eaux thermales se produit au cours de leur remontée vers la surface par dégazage, échanges thermiques avec les parois du circuit hydrothermal, ou par mélange avec les eaux froides en surface ou en profondeur (Athemena, 2006).

1.3 Eau thermale

1.3.1 Étymologies

Syntagme (nom + déterminant adj.) d'usage fréquent. L'adjectif thermal (dérivé de *thermae*, du grec *thermos*, chaud) est attesté en 1625 (Duchesne), d'après le Dict de Castany et Margat (p. 205).

Eaux thermales est attesté en 1735, dans la traduction française de la Géographie Physique de l'anglais Woodward, p.86. REM. Thermalité, 1832.

1.3.2 Définitions

Une eau thermale est tout d'abord une eau minérale naturelle, provenant d'une source profonde. Cette eau est extraite après plusieurs années de circulation entre les roches. C'est ainsi qu'elle se charge en sels minéraux et oligo-éléments, c'est-à-dire une eau possédant un ensemble de caractéristiques qui sont de nature à lui apporter des propriétés favorables à la santé. Elle contient des minéraux, sels et gaz susceptible d'agir efficacement sur la santé. L'eau minérale naturelle provient d'une nappe ou d'un gisement souterrain exploité à partir d'une ou plusieurs émergences naturelles ou forées, et témoigne.

Une eau thermale est, par définition, une eau minérale chaude. Dans le langage courant, on appelle « eau thermale » toute eau minérale dotée de propriétés thérapeutiques et utilisée au soin d'un établissement thermale (Geze, 2006 ; Amran, 2018).

- Les eaux thermales sont des eaux captées à partir d'une émergence naturelle ou d'un forage qui, en raison de la nature spéciale de leurs principes, de la stabilité de leurs caractéristiques physiques et de leur composition chimique, peuvent avoir des propriétés thérapeutiques .
- Les eaux marines qui, après traitement et apports, peuvent avoir des propriétés thérapeutiques sont considérées comme des eaux thermales et sont soumises aux dispositions du présent décret.
- Ne sont pas soumises aux dispositions du présent décret les autres eaux destinées à la consommation humaine.
- Est considéré comme établissement thermale tout établissement utilisant l'eau thermale et ses dérivés à des fins thérapeutiques et de remise en forme.
- Est considéré comme établissement de thalassothérapie tout établissement qui utilise l'eau de mer et les produits naturels extraits de la mer.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les eaux thermales

1.4 Classification des eaux thermales

L'eau thermale provient des profondeurs de la terre, ce qui explique sa thermalité naturelle et sa composition chimique particulière. En effet la nature des roches qui traversent par l'eau dans le processus souterrain rend l'eau plus ou moins puissante en cet élément chimique. La chaleur générée par l'échange eau /roche et le temps de contact entre l'eau et la roche sont également importants dans la minéralisation de l'eau thermale.

On classe les eaux minérales en fonction de:



Figure1 : Source thermale.

1.4.1 Selon la température d'émergence

On distingue les eaux thermales de basse température et les eaux thermales de haute température. D'après Issaâdi, les eaux thermales sont classées selon leur température d'émergence en quatre classes:

a) Eaux hypothermales

Ce sont des eaux dont la température à l'émergence est inférieure à celle de la partie supérieure de la zone d'homothermie ou à la température moyenne interannuelle du lieu d'émergence plus 4°C.

b) Eaux métriothermales

Ce sont des eaux dont la température à l'émergence est inférieure à 30°C mais supérieure à celle des eaux hypothermales.

c) Eaux mésothermales

Ce sont des eaux dont la température à l'émergence est entre 30°C et 50°C.

d) Eaux hyperthermales

Ce sont des eaux dont la température à l'émergence est supérieure à 50 °C et inférieure à 100°C. Ces températures élevées témoignent une origine profonde de ces eaux (Issaâdi, 1992).

CHAPITRE 1 : Généralités sur les eaux thermales

1.4.2 Selon la minéralisation

La minéralisation des eaux thermales est déterminée surtout par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elles traversent et, accessoirement, par la vitesse de Circulation souterraine. En se basant sur l'importance de tel ou tel sel minéralisateur, on distingue, des sources bicarbonatées, chlorurées sodiques, sulfatées, sulfurées, etc. Chaque type est connu par des vertus curatives particulières (Guigue, 1940).

Tableau 1: Classification des eaux thermales en fonction de leur minéralisation ; (schwenke, 2007).

Eau	Teneur en sels minéraux
Très faiblement minéralisé	< 50mg/l
Faiblement minéralisé = Oligo-minérale	50mg/l < (c) < 500mg/l
Moyennement minéralisée	500mg/l < (c) < 1000mg/l
Minéralisée	1000mg/l <(c)<1500mg/l
Fortement minéralisée	>1500 mg/l

a) Eaux bicarbonatées

Ce sont des eaux souterraines au pH acide et présentent une forte concentration en bicarbonates. On distingue:

- Les eaux bicarbonatées sodiques.
- Bicarbonatées calciques.

Ce type d'eaux facilite le traitement des différentes brûlures (exemple Hammam Abou Hanifa, Mascara) (Dib, 2008).

b) Eaux chlorurées sodiques

Les eaux thermales chlorurées contiennent du chlorure de sodium. Elles sont indiquées dans le traitement des troubles du développement, mais également en cas l'énurésie (exemple Hammam Essalhinee, Khenchela) (Houha, 1996).

Les stations thermales dont les eaux sont chlorurées, rendre dans le nord des Pyrénées, les Alpes, le jura et la Savoie.

c) Eaux sulfatées

Présentent une forte teneur en soufre associés avec principalement des ions calcium, magnésium ou sodium, Elles sont donc appelées eaux sulfatées calciques, les eaux sulfatées sodique et magnésiennes. Elles sont utilisées pour le traitement des affections rhumatismales chronique (exemple Hammam Belhachani et Hammam Ouled Ali, Guelma) (Dib, 2008). Elles s'avèrent très efficaces contre l'eczéma ainsi que pour soigner les cicatrices de brulures.

Lorsqu'elles contiennent uniquement du calcium, elles sont efficaces pour soigner certaines maladies métaboliques (Guide-piscine.fr).

d) Eaux sulfurées

L'élément soufre est l'anion majoritaire de ces eaux sous différentes formes, Celles qui contiennent de l'hydrogène sulfureux sont caractérisées par une odeur d'œufs pourris. Cependant, on diffère:

- Les eaux sulfurées sodiques : Elles sont faiblement minéralisées (extrait sec <400mg/L), chaudes (30°C – 65°C), alcalines (pH entre 8-10) et contiennent des sulfures, du sodium, de la silice et du fluor en grande quantité. (Froger, 2018).
- Les eaux sulfurées calciques : Qui sont prescrites pour le traitement des voies ORL (exemple Hammam Dbegh, Guelma) (Guigue, 1940).

Les stations thermales dont les eaux sont sulfurées se situent essentiellement dans la zone axiale des Pyrénées.

1.5 Les principales propriétés de l'eau thermale

L'eau thermale a des propriétés anti-inflammatoires, apaisantes, purifiantes et antioxydantes (selon ses origines) est peut-être utilisée en cosmétique et en dermatologie pour traiter les peaux sensibles, atopiques, et sèches. Mais son champ d'action ne se limite pas à l'épiderme. L'eau thermale est également utilisée depuis des milliers d'années pour soulager d'autres maladies. La sécurité sociale reconnaît douze domaines d'action:

- Rhumatologie
- Voies respiratoires
- Appareil digestif
- Phlébologie
- Dermatologie
- États psychosomatiques
- Maladies cardiovasculaires
- Appareils urinaire
- Neurologie
- Gynécologie
- Affections des muqueuses bucco-linguales
- Troubles du développement de l'enfant

1.6 Les bienfaits des eaux thermales

De manière générale, ces eaux pures et filtrées par la nature hydratent, apaisent et protègent l'épiderme. Utilisées seules ou ajoutées à un soin cosmétique, elles promettent d'accélérer le processus de réparation de la peau, de faciliter la cicatrisation et de diminuer les inflammations et les démangeaisons. Elles ont également des vertus décongestionnantes, calmantes et anti radicalaires.

L'eau d'Avène, faiblement minéralisée (avec un apport équilibré en calcium et en magnésium) et riche en silicates, se distingue par ses vertus anti-inflammatoires.

L'eau thermale d'Uriage, très minéralisée et isotonique (sa composition en minéraux est comparable à celle des autres liquides du corps humain), permet de renforcer la barrière cutanée.

L'eau des sources de la Roche-Posay, qui renferme du sélénium (un minéral protecteur du métabolisme cellulaire), offre de puissantes propriétés antioxydants. L'eau extraite des sources de vichy mise sur une concentration constante en 15 minéraux pour équilibrer le ph de la peau. Quant à biotherm, son plancton thermal, un micro-organisme gorgé de 35 nutriments, contribue à décupler les défenses naturelles de la peau (Goma, 2014).

1.7 L'hydrothermalisme

L'énergie hydrothermale : un vaste sujet, le terme hydrothermal recouvre tous les phénomènes qui relient la circulation de l'eau à son réchauffement. Bien qu'il n'y ait pas de définition précise, on peut considérer que cela inclut trois thèmes de recherche principaux : L'hydrothermie comme manifestation du magma, l'énergie géothermique et enfin les sources thermales exploitées par les thermes (Paulick et al., 2006).

1.7.1 L'hydrothermalisme et le magmatisme

Les études des phénomènes hydrothermaux au niveau des bords de l'océan se concentrent principalement sur les interactions roche-liquide au niveau des fumeurs noirs (Paulick et al., 2006) ou au fond du basaltique (Bodeï et al., 2006). Ces zones retiennent également l'attention en tant que site des premières formes de vie sur terre (Kusky, 2007).

La figure 2 montre un exemple du fonctionnement des systèmes thermiques dans le contexte de l'activité volcanique active (finizola, 2002).

En lien avec cette thématique, on peut citer l'étude des fentes ou veines minérales. En effet, les déformations tectoniques affectant les massifs cristallins mènent souvent au développement de circulations de fluides hydrothermaux anciens comme dans le massif du mont blanc (Rossi et al., 2005).

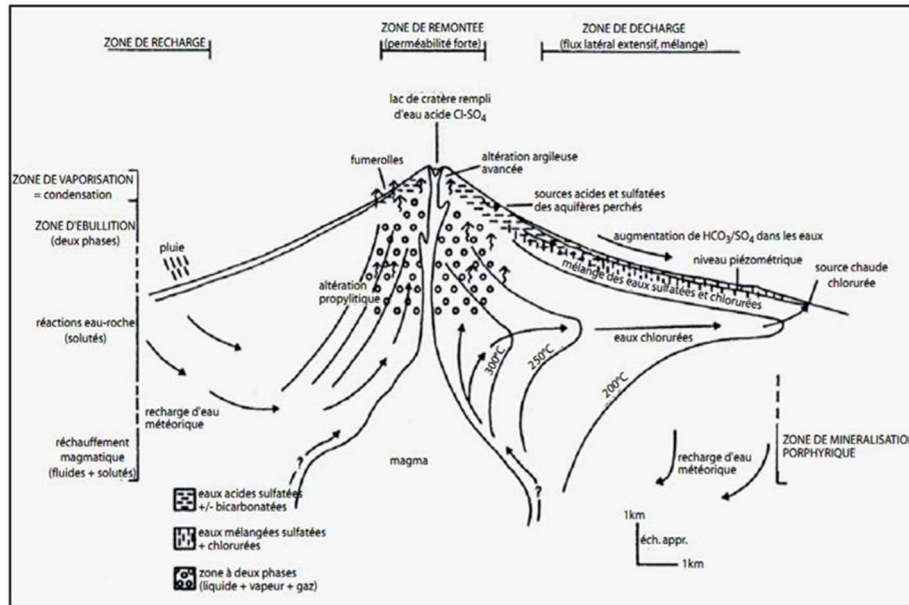


Figure2 : Modèle de circulation des fluides au sein d'un système hydrothermal d'un volcan.

1.7.2 L'hydrothermalisme et la géothermie

L'énergie géothermique apparait comme une part non négligeable de l'avenir énergétique de la planète. En simplifiant, l'exploitation de cette énergie consiste à injecter de l'eau dans un forage profond et à la récupérer chaude par un autre forage. L'implantation de telles infrastructures doit se dans les zones à fort gradient géothermique (Bertani, 2005). dresse un bilan des ressources géothermiques mondiales.

Les philippines apparaissent comme le plus gros producteur d'énergie géothermique avec 9253 GWh/an en 2003 soit 19,1 % de la production d'énergie nationale. La principale ressource d'énergie géothermique française est représentée par la zone géothermale de bouillante en Guadeloupe (Traineau et al., 1997) mais les recherches se tournent actuellement vers les ressources des autres départements d'outre-mer (Gentre, 2004). En métropole, le site de Soultz-Sous-Forêts sert de site atelier pour développer l'exploitation de ce type d'énergie (Gérard et al., 2006).

1.8 Les causes de la thermalité

La température parfois élevée de l'eau minérale thermique dépend de plusieurs facteurs successifs:

- *Les réactions chimiques exothermiques,
- *La désintégration des minéraux radioactifs,
- *Le gradient géothermique,
- *Les mouvements de l'écorce terrestre,

1.8.1 Les réactions chimiques exothermiques

- La définition

Une réaction exothermique est une réaction qui dégage de l'énergie ce qui, par conséquent, augmente le degré énergétique du milieu environnant.

Lorsqu'une réaction chimique dégage de la chaleur dans un milieu, la température de ce milieu augmente. La température finale de la réaction est donc plus élevée que la température initiale. (Reçois toutes les infos et astuces d'Allo prof par courriel).

Il y a 03 éléments nécessaires à une réaction exothermiques:

- * un combustible : est le matériau qui brûle (le bois par exemple).
- * un comburant : est un produit chimique, en générale l'oxygène, qui se combine au combustible en l'oxydant.
- * la chaleur (énergie d'activation).

1.8.2 La désintégration des minéraux radioactifs

La concentration de ces objets apparaît a priori plus importante dans les couches superficielles de ce flux de chaleur. Ce flux de chaleur est suffisant pour chauffer une grande partie du flux aquifère adjacent et doit être pris en compte pour l'interprétation de la chaleur. La désintégration des corps radioactifs dégage de la chaleur en permanence. Par exemple, un gramme de radium, en équilibre avec ses produits de décomposition dégage 137 calories/heure (Dib, 2008).

1.8.3 Le gradient géothermique

C'est la variation de température en fonction de la profondeur, En moyenne, la température en augmente. de 3°C tous les 100 mètres dans la croûte continentale mais la valeur du gradient géothermique varie beaucoup en fonction des zones terrestres .

Il est plus faible dans l'asthénosphère, le manteau inférieur et le noyau supérieur il est fort dans la lithosphère, la couche limite entre manteau et noyau ainsi que dans le noyau interne. Pour l'Algérie septentrionale, P.Verdeil admet pour le flux une valeur moyenne calculée par la formule:

$$F = (5,4428 \pm 0,4187) \cdot 10^6 \text{ - j/cm}^2/\text{s}$$

D'après Mme Dib on a:

- Dans la région du Hammam Meskhoutine le gradient géothermique est variable entre 1°C pour 16 m et 1°C pour 7 m.

CHAPITRE 1 : Généralités sur les eaux thermales

- La région de Guelma est sans doute une zone prometteuse sur le plan de l'énergie géothermique. (Dib, 2008).

1.8.4 Les mouvements de l'écorce terrestre

Dans la croûte terrestre, les mouvements sont multiples et multiformes, et les distorsions telles que les renflements et les failles soulèvent le magma entourant les couches sédimentaires, voire des circuits hydrothermaux.

Les volcans, entre autres, jouent un rôle important dans le réchauffement de l'eau, et le gradient géothermique dans les régions volcaniques est de 1° pour 10 m à 15 m. Ainsi, Certains circuits peuvent gagner une certaine température. Mais nous savons que les centres volcaniques actuels ou récents expirent de grandes quantités d'eaux extrêmement chaudes. Ainsi, on peut supposer que dans le cas de certaines sources à température élevées pour lesquelles l'explication du gradient est encore insuffisante ce sont ces eaux juvéniles qui, en les mélangeant avec de l'eau dosée par thermosiphon, conduit à une augmentation de la température de cette eau de la température de cette eau (origine mélangée) (Dib, 2008).

CHAPITRE 2:
Présentation du secteur et
contexte géologique

Introduction

De par sa position géographique, la wilaya de Khenchela fait partie du grand ensemble régional des hauts plateaux Est et se positionne aux portes des grandes villes sud du pays et non loin des villes métropolitaines de l'Algérie. C'est aussi une région qui, depuis les cinq dernières années, connaît un développement accéléré pour résorber les déficits enregistrés dans tous les secteurs, ce qui constituera un moteur pour la promotion des activités socio- économiques, particulièrement pour lancer les jalons de la petite et moyenne entreprise orientée vers l'agro-alimentaire.

Cependant, on enregistre une complexité topographique et une diversité biologique très importante, d'où la wilaya présente des tranches altitudinales très variables allant de 2328 m (ras Kaltoum), à moins de 26 m (chott Melghir) au-dessous du niveau de la mer.

Grâce aux diversités appréhendées, la wilaya jouit d'une vocation agro-sylvo-pastorale et saharienne édictant quatre zones agricoles : les montagnes, les plateaux, les plaines et les parcours steppiques (C.F., 2016).

2.1 Présentation générale

2.1.1 Description générale et localisation de la wilaya de Khenchela

La wilaya de Khenchela est située à l'Est du pays, au contrefort des monts des Aurès, dans l'aire géographique comprise entre 6° 32' et 7° 34' de longitude Est et entre 35° 7' et 35° 38' de latitude Nord son étendue territoriale couvre une superficie totale de 9715Km². Elle est limitée:

- Au Nord par la wilaya d'Oum El Bouaghi;
- Au Nord- ouest par la wilaya de Batna;
- Au Sud-ouest par la wilaya de Biskra;
- Au Sud, par la wilaya d'El Oued;
- A l'Est par la wilaya de Tébessa (C.F., 2016).

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

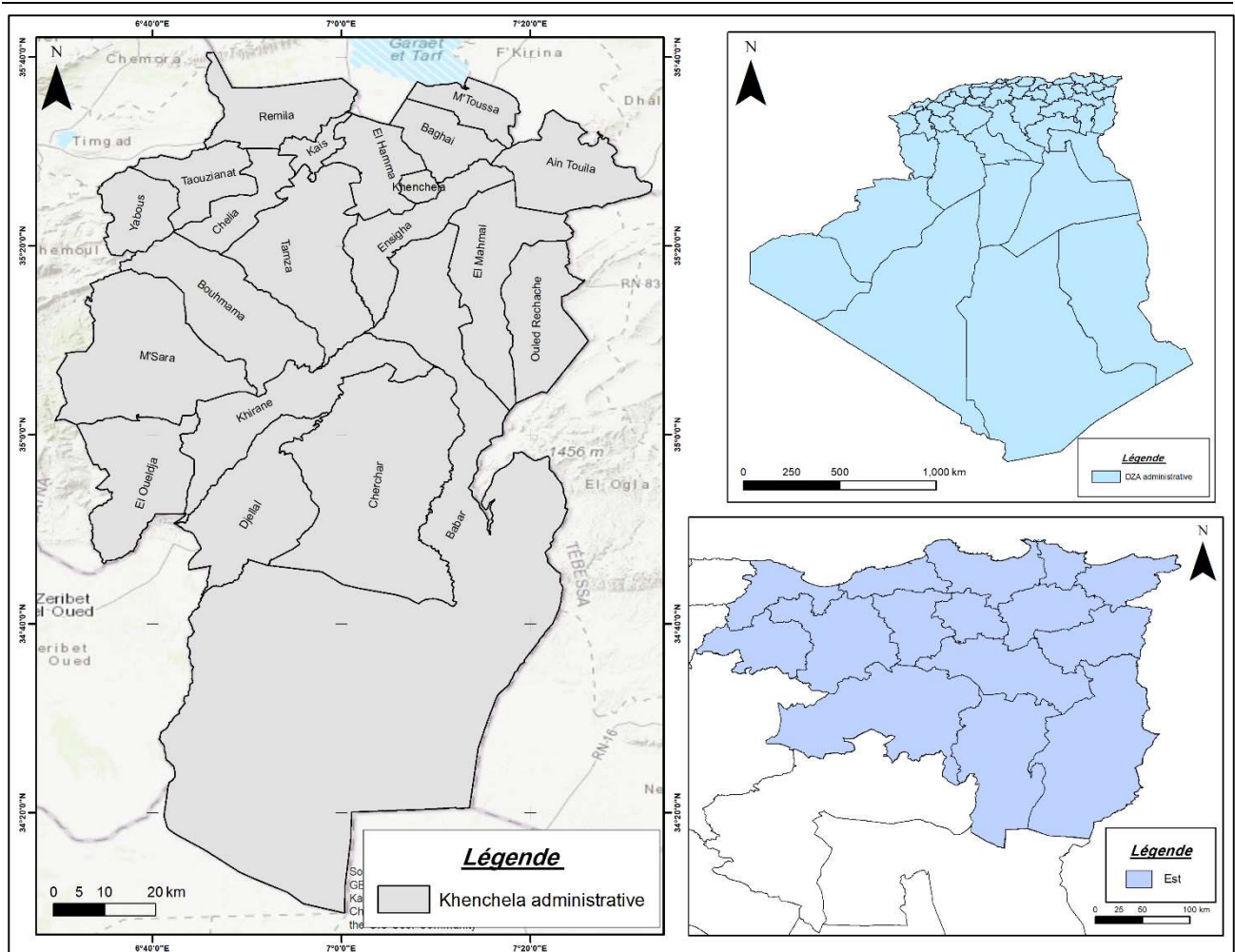


Figure 3: Situation de la wilaya de Khenchela (d'après nous).

2.2 Caractères géomorphologiques, géologiques et pédologiques

2.2.1 Caractères géomorphologiques

i. Relief

La structure physique de la Wilaya de Khenchela est très hétérogène (figure 4). Elle se caractérise par trois régions naturelles distinctes:

- **Les hautes plaines du nord** : constitués par le bassin de Tarf qui comprend les plaines de Remila Boudrehem et de M'toussa, ainsi que le plateau des Ouled Rechache (plaines de Mahmel et de Zoui) et la plaine de Khenchela;
- **La zone montagneuse** : occupe les parties centrale et ouest de la Wilaya. Elle est constituée de deux massifs importants: les Aurès et les monts de Nemamcha;
- **Le parcours steppique et saharien** : couvre la moitié sud de la wilaya (D.E., 2016).

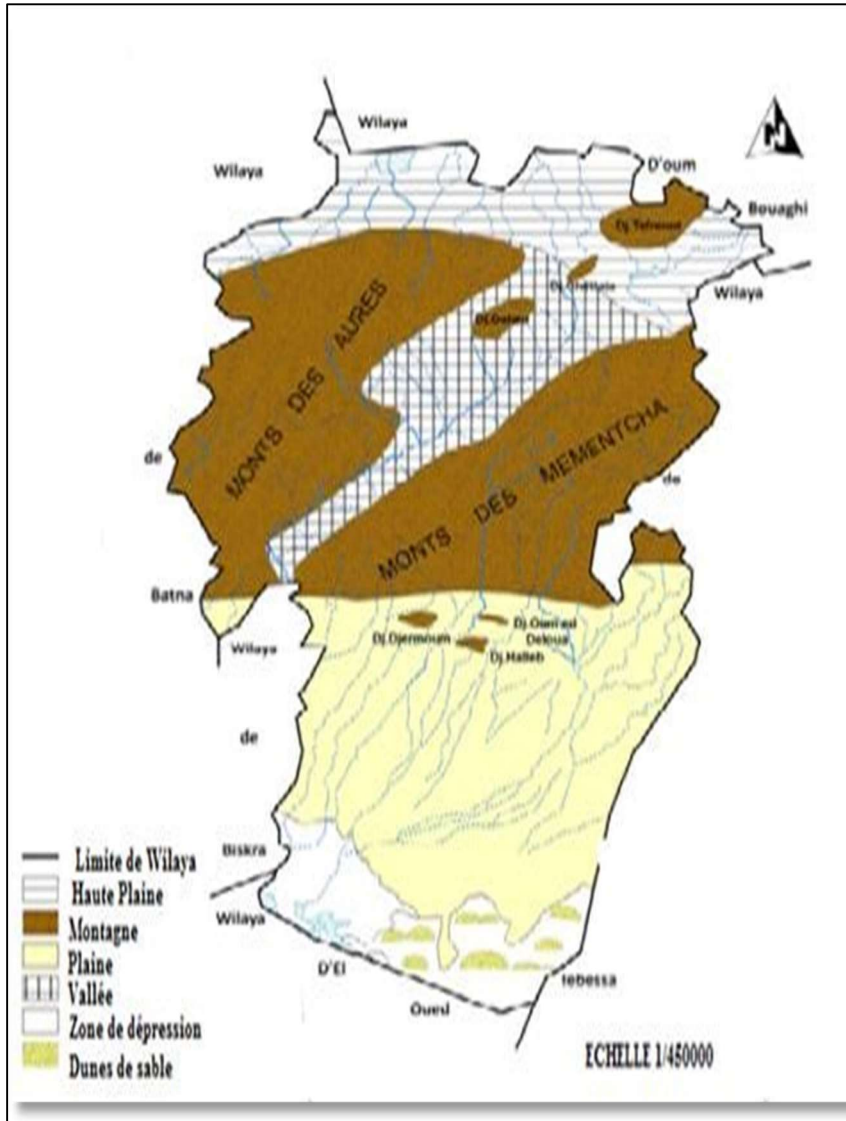


Figure4 : Carte de relief de la wilaya de Khenchela (D.S.P., 2016).

ii. Altitude

La wilaya de Khenchela se caractérise par une très forte dénivellation. En effet l'altitude oscille entre moins 26 mètres au-dessous du niveau de la mer (Chott Melghir au Sud-est de la wilaya) et 2169 mètres au-dessus du niveau de la mer (Djebel Chelia) sur les monts des Aurès au Nord-ouest de la wilaya (D.E., 2016).

iii. Pente

Une carte des classes de pentes caractérisant le territoire de la wilaya a été dressée, sur la base de la grille retenue par le M.A.T.E.T (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme) pour le classement des zones de montagnes. Cette grille, qui tient compte de l'utilisation souhaitable des terres, préconise 04 classes:

- Classe 1 : pente comprise entre 0 et 3,5% : Relativement favorable à l'intensification agricole (mécanisation et irrigation) et à la réalisation d'infrastructures techniques;

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

- Classe 2 : pente comprise entre 3 et 12,5% : elle est favorable au développement d'une agriculture intensive à semi intensive ;
- Classe 3 : pente comprise entre 12,5 et 25% : Favorable à l'arboriculture fruitière et autres cultures pérennes fixatrices du sol au détriment des cultures annuelles et notamment les grandes cultures;
- Classe 4 : pente supérieure à 25 % : constituant de ce fait une contrainte majeure pour la pratique des activités agricoles et un handicap pour la réalisation des infrastructures socioéconomiques. À ce titre, l'occupation du sol au niveau de cette classe doit privilégier la sylviculture (D.E., 2016)

2.3 Géologie

2.3.1 Lithostratigraphie

D'après l'inventaire stratigraphique dressé par plusieurs géologues et en particulier par R. Laffitte, les terrains les plus anciens sont attribués au Trias et les plus récents au Quaternaire (Figure 5).

1) Mésozoïque

a) Trias (Figure 5) : Le Trias affleure toujours en position anormale, il est formé de pointements diapiriques nombreux jalonnant les accidents tectoniques (Para-autochtone), les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisés à proximité de Khenchela, où il isole le Miocène du Crétacé, suivant une bande de 4 à 5 Km de long et 300 à 400m de large et sur Djebels el Krouma et Knif en contact anormal avec l'Albien, le Cénomaniens et le Cénonien. Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux (Laffitte, 1939 et Vila, 1977 cités par Boubelli, 2009).

L'abondance du sel caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela et Krouma, mais cela tient, non pas à un caractère original particulier au Trias de cette région, mais au fait que ce pointement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être dissous, tandis que dans les autres pointements, qui sont anti-miocènes, il a disparu depuis longtemps (Laffitte 1939 cité par Boubelli, 2009).

Les argiles et marnes bariolées, de couleur verdâtre, rougeâtre à violacée, constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement. Des passées calcaro-dolomitiques, de couleur gris à noirâtre, généralement bien stratifiés et présentant parfois quelques passées marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques.

b) Jurassique : La lithologie des formations Jurassiques dans l'Aurès se distingue par un large développement des faciès carbonatés (Calcaire dolomie) parfois argileux (Schistes argileux, et calcaire argileux, siliceux et béchiques). Elles renferment parfois des intercalations de

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

marnes jaunes et rouges dont l'épaisseur peut atteindre 400 mètres. L'épaisseur totale de ces dépôts dans la région peut être évaluée à 4000 voire 6000 mètres.

- b.1- Lias : Peu présent dans la région, il est localement représenté par des schistes tendres contenant parfois des ammonites pyriteuses.
 - b.2- Dogger : Le Jurassique moyen (Aalénien) est constitué par une série d'alternance; de dolomies, de calcaire et de marne avec des gypses.
 - b.3- Malm : Il est constitué par 15 mètres d'épaisseur d'une alternance des calcaires noduleux et des marnes.
- c) Crétacé** : Le Crétacé a été subdivisé par R. Laffite (1939) en Crétacé inférieur ou série gréseuse (Berriasien à l'Albien) et en Crétacé supérieur ou série marno-calcaires (Cénomaniens à Maestrichtien).
- c.1- Crétacé inférieur : Il couvre une grande partie des Anticlinaux du Djebel Chelia, Anticlinal de Khenchela, il affleure aussi au Kef Tifekressa, Ras Serdoun, Djebel Chenntgouma, Djebel Faraoun et Djebel Aidel. Laffite (1939) a soigneusement décrit la plupart des faciès à partir de ses descriptions, modifiés ou complétés en quelques points.
Le Crétacé inférieur peut être subdivisé en quatre ensembles lithologiques : Un ensemble inférieur 1000 m à dominance argileuse correspondant au Berriasien supérieur-Valanginien. On note que le Valanginien n'est seulement connu qu'au Djebel Azreg à Batna, presque au centre du massif montagneux. Un ensemble basal 1300 m à dominance carbonate avec des calcaires micritiques et bioclastiques en bancs métriques (Tithonien supérieur-Berriasien moyen). Un ensemble médian 1400 m à dominante grés-dolimitique appartenant à l'Hautrivien-Barrémien. Un ensemble supérieur 700 à 750 m, comprenant à la base des dolomies et une alternance de grés, de calcaire à Orbitolines, puis des grés à stratifications obliques, des marnes gréseuses, des calcaires marneux et des calcaires au sommet, est attribué à l'Aptien-albien.
 - c.2- Crétacé supérieur : Il occupe une grande superficie à l'affleurement dans l'Aurès et forme l'essentiel des affleurements Mésozoïques dès les confins de l'Aurès. Dans notre région d'étude il affleure au Djebel Aurès, Djebel Djahfa, El Krouma, Khenchela, El Khallel, Djebel Chettaia etc.
 - c.2.1- Cénomaniens : Il est présent dans tous les grands anticlinaux de l'Aurès. Il est essentiellement calcaire-marneux. La partie inférieure est surtout marneuse. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massifs mais peu épais. L'épaisseur de cette formation est très variable, elle peut atteindre 500 à 600 mètres au cœur de l'Aurès. Le Cénomaniens comporte une série de

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

marnes grises dans lesquelles s'intercalent des calcaires fins argileux, une partie médiane formée de marnes grises, verts ou ocres, contenant parfois du gypse diffus ainsi que des passées argileuses. Une série terminale constituée de marne et de calcaires formant une corniche.

- c.2.2- Turonien : Le Turonien occupe à l'affleurement les plus grandes surfaces de l'Aurès (pendage faible). Le Turonien comporte, en effet, au-dessus des marno-calcaires de base, un ensemble de marnes beiges et calcaires. Dans le Djebel de Amrane, le Turonien est schisteux à la base, calcaire dans la partie moyenne, et marno-calcaire au sommet. L'épaisseur du Turonien peut atteindre 800 mètres dans les faciès marno-calcaires du cœur de l'Aurès, mais varie de 1000 à 3000 mètres dans les calcaires.
- c.2.3- Sénonien : Le Sénonien est représenté dans tous les synclinaux de l'Aurès. Il est très épais 2000 mètres en moyenne. Dans notre région il affleure au Sud de la plaine de Remila, sur le flanc Nord de l'Anticlinal du Djebel Chelia avec un faciès principalement marneux. Son épaisseur peut être très importante et atteindre 1000 à 2000 mètres.
- c.2.4- Coniacien : Il présente un horizon de marne et de marno-calcaires. Le Coniacien est présent au niveau de Ras Tafer Kennfad et à l'entour du Djebel el Kharroub.
- c.2.5- Santonien:
 - c.2.5.1- Le Santonien C4 : Est constitué de faciès marneux, de marne gris-bleu et calcaire, il affleure à l'entour du Djebel el Kharroub et Djebel Aourès.
 - c.2.5.2- Le Santonien C4r : Faciès récifal des Djebels El Krouma et Knif.
- c.2.6- Campanien: Constitué de marne et calcaires crayeux, et affleuré au Djebel Chettaia, Djebel Aourès, à Douar Ouled Ensirha et à l'entour des Djebels Chettaia et El Krouma.
- c.2.7- Maestrichtien : Le Maestrichtien est assez différent; il est subdivisé en:
 - Maestrichtien inférieur à dominante marneuse.
 - Maestrichtien supérieur constitué par des calcaires à Inocérames. Il affleure à Ettarf, Djebel Chettaia et Argoub Mennsa. On se rapproche de la zone des hautes plaines constantinoises où le Maestrichtien semble ne pas exister, ce qui indique que, s'il est déposé dans cette

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

région, ce fut sous faible épaisseur et qu'il a ainsi été facilement enlevé par l'érosion.

2) Cénozoïque⁸⁸

a) Paléogène:

- a.1- Paléocène : Le paléogène marin, au Danien marin succède en concordance, des couches marines, marno-calcaires, dans lesquelles, latéralement, en certains points, s'intercalent des couches lacustres et des couches rouges d'origine lagunaire ou plutôt continentale, mais il s'agit là de conditions exceptionnelles de l'Eocène inférieur (Yprésien) et l'Eocène moyen (Lutétien) sont essentiellement marin.
- a.2- Eocène inférieur (Yprésien) : C'est dans le Sud-est de l'Aurès, que le Nummulitique est le plus développé; et peut être le seul affleurement existant dans le terrain est celui de A. Eguelmamène constitué par des calcaires à silex. Au début de l'Eocène, et pendant la période Paléocène, c'est-à-dire pendant le Montien et le Thanétien, la mer semble avoir recouvert l'Aurès d'une manière assez uniforme. Dans le Sud-est, on trouve, dès la base de la formation, une faune caractérisée par l'abondance des Turritelles.

b) Néogène : Dans les limites de la partie centrale des Aurès, les dépôts Néogènes sont représentés surtout par des conglomérats du Miocène qui remplacent vers le Sud par des formations marines normales (calcaire, marne...). Les dépôts de cette période se caractérisent par des changements fréquents des faciès suivants des directions différentes; la présence des conglomérats est liée à l'émersion.

Au cours de la période Lutétien, dans les limites de la partie Nord-ouest des Aurès, ces conglomérats et les assises calcaro-marneuse sont surmontés par des formations continentales qui soulignent une étape bien caractéristique du développement du relief et une phase intense du plissement.

À l'intérieur des zones synclinales, les conglomérats et les poudingues du Miocène sont concordants avec des roches sous-jacentes et marquent ainsi la fin de la sédimentation marine. Dans les zones anticlinales, ces dépôts, dont l'épaisseur varie de 250 à 300 mètres, reposent en discordance sur les formations sous-jacentes.

- i. b.1- Miocène : En 1862, Coquand signale pour la première fois dans les environs de Khenchela un gisement de Burdigalien à Pectens et l'âge exact des couches rouges du Sud de l'Aurès. Le Miocène dans la région d'étude peut subdiviser de la manière suivante:
 - b.1.1- Aquitano-burdigalien: Marqué par des conglomérats rouges. Il affleure à El Kelaa, Ras Khodalène et à l'entour de Ras Serdoun.

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

- b.1.2- Langhien-serravalien: Constitué par des marnes, biomicrites, biomicrosparite et grés blancs. Il est remarqué au niveau d'El Kelaa Djebel Knif et Ras Ychebrane.
 - b.1.3- Tortorien: Gréseux blanc, qui affleure à Tirkabine, Djebel Kharroub, Djebel Akar, El Mennchar et Douar Khenchela.
 - b.1.4- Tortorien supérieur: Continentale, ce sont des argiles silteuses beiges et rouges, grés. Le Tortorien supérieur n'apparaît qu'au niveau Draa El Ahmar.
- c) Le Quaternaire : Les formations récentes sont aussi largement répondues à la périphérie de l'Aurès qu'elles sont rares dans le centre du massif, représentées uniquement par des éboulis et des terrasses, tandis qu'elles forment en périphérie de larges et d'épaisses nappes alluviales. Les dépôts quaternaires recouvrent la majeure partie des plaines, ce sont des éboulis à blocs, alluvions récentes ou actuelles, terres arables, alluvions anciennes, glacis polygénique nappant les reliefs et des croûtes calcaires (Figure 5) (Laffitte, 1939 cités par Boubelli, 2009).

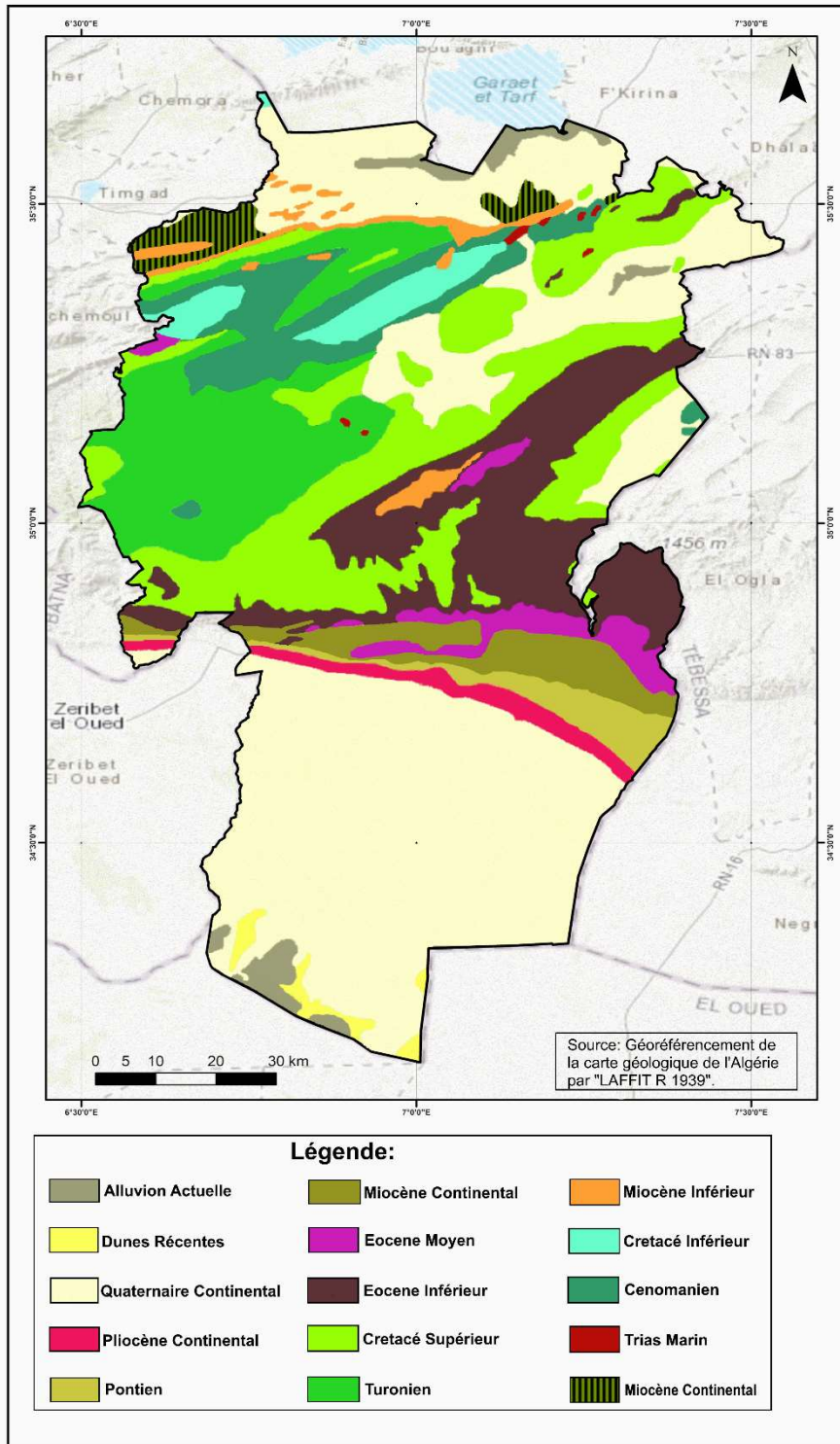


Figure5 : carte géologique de khenchela (géoréférencé d'après nous).

2.4 Caractères pédologiques

On a dénombré six classes de sols, auxquelles il convient d'ajouter la classe des sols minéraux bruts (affleurement de la roche mère) et la classe des sols halomorphes (sols salés):

- Les sols calcaires humifères : Ils sont rencontrés sur les monts et les piémonts de l'Aurès, à une altitude comprise entre 1000 et 1500 mètres;

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

- Les sols insaturés humifères : Ces sols sont rencontrés sur les reliefs les plus élevés (plus de 1500 mètres d'altitude) de l'Aurès. Ils sont occupés par des forêts;
- Les sols calciques : Ces sols sont rencontrés sur les bas piémonts, et sur les hautes plaines longeant la route qui mène de Khenchela à Faïa en passant par Kaïs et Remila. Ils s'étendent à l'Est jusqu'à Ain Touila et au Sud jusqu'à Babar en partant de Khenchela;
- Les roches mères : Ces roches, résultat d'une érosion intense due à une conjugaison de facteurs négatifs (relief montagneux, intensité des pluies, substratum tendre et à une absence de couvert végétal pérenne) affleurent notamment les monts des Nemenchas (C.F., 2016).

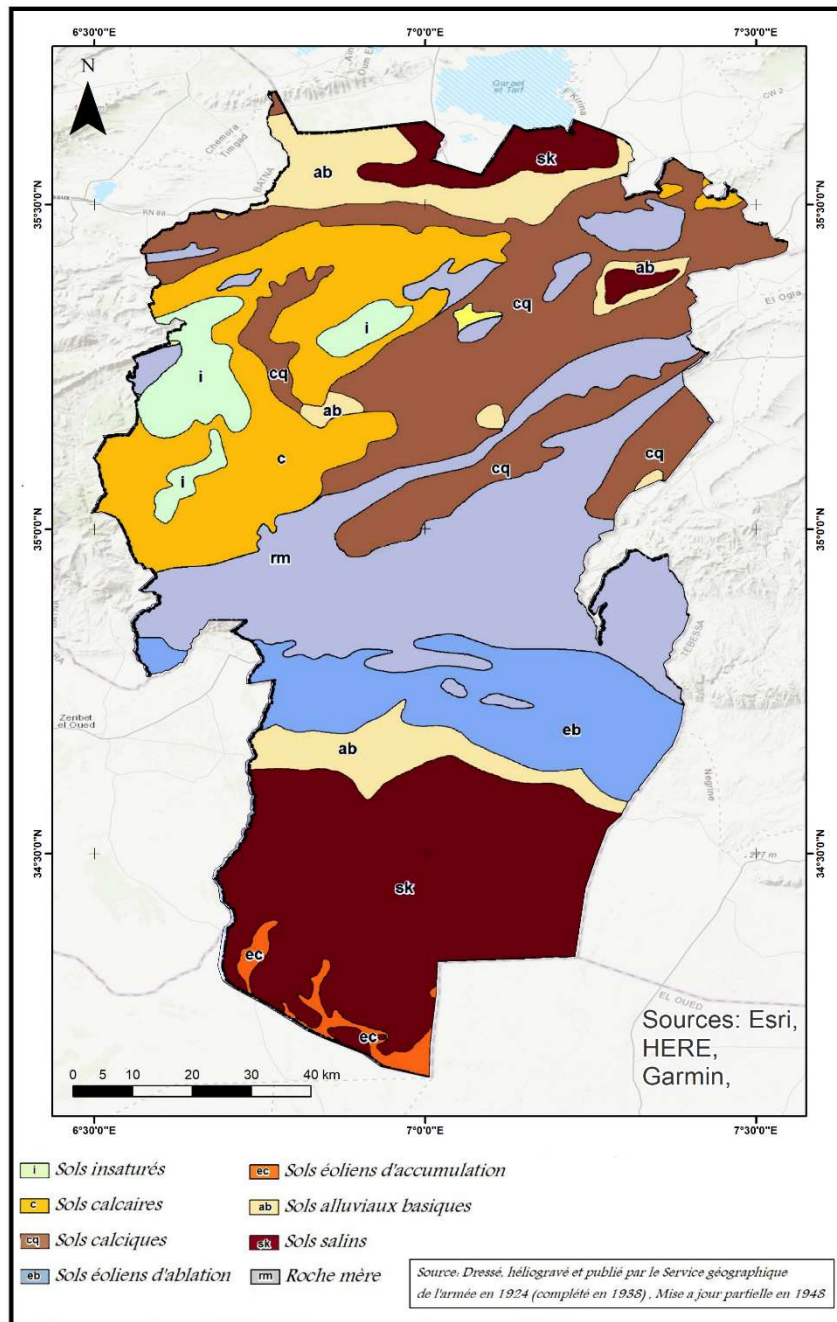


Figure6 : Carte des classes des sols de la wilaya de Khenchela (géoréférencé d'après nous).

CHAPITRE 2 :Présentation du secteur et contexte géologique

2.5 Caractères hydrographiques

La wilaya de Khenchela s'inscrit dans les limites géographiques de trois bassins versants (Figure 7):

- Le bassin versant des Hautes Plaines constantinoises: qui correspond à la partie nord de la wilaya (piémonts nord des Aurès et zone des dépressions);
- Le bassin versant de la Médjerdah: pour la partie nord-est correspondant aux versants sud des djebels: Chettaia, Tafrent et Bou Tokhma, et, aux versants nord des Djebels: Tadilist et Tadjinnart;
- Le bassin versant du Chott Melghir: pour les parties médianes et sud de la wilaya, correspondant au massif des Aurès, aux monts des Nemenchas, aux vallées des oueds El Arab et Mellagou, ainsi qu'aux plaines steppiques et présaharienne du sud (C.F ,2016).

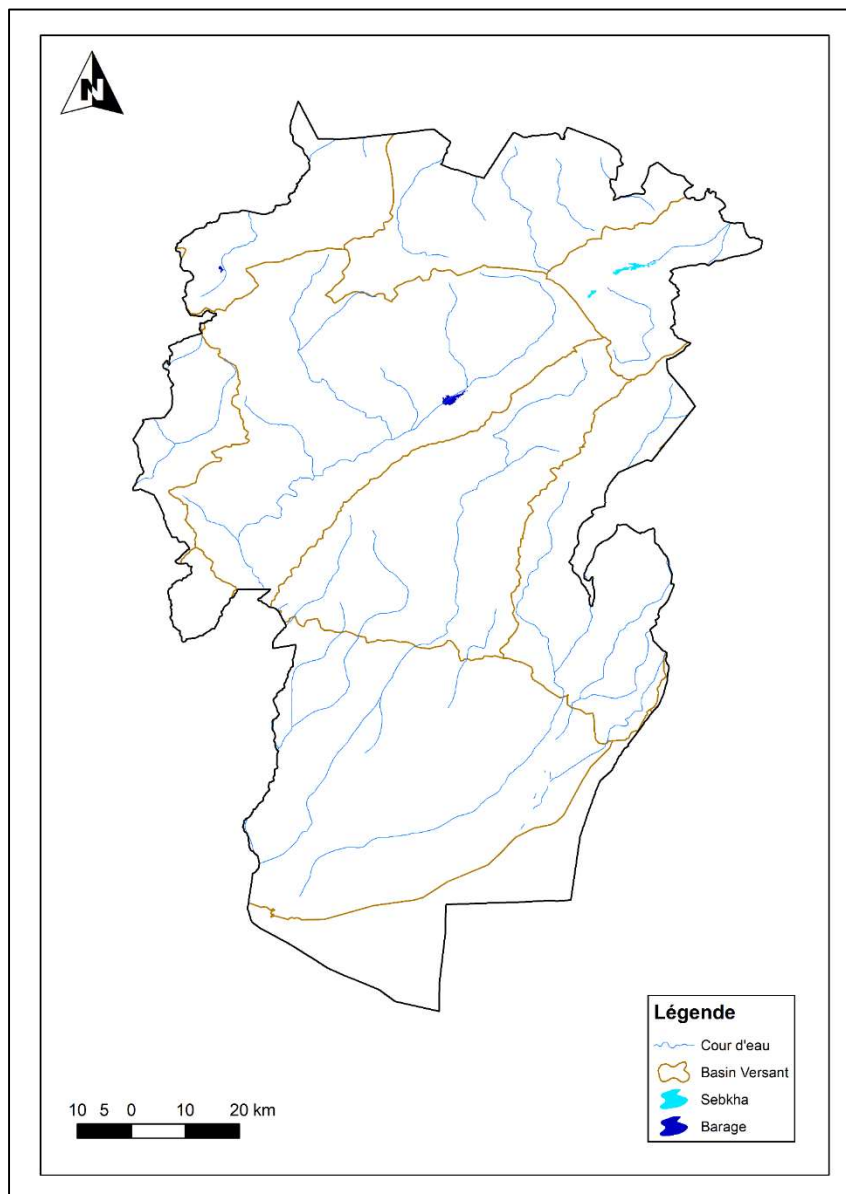


Figure7 : Carte hydrologique de la wilaya de Khenchela (d'après nous).

2.6 Conclusion

Sur le secteur étudié, le Crétacé inférieur s'est déposé sous forme de calcaires marneux, de marne, de calcaire gréseux et des 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 il devient franchement marneux à la base .

Au Sud du bassin, l'Albien est représenté sur la bordure de l'Anticlinal de Khenchela (Djebel Aidel) qui surplombe les sources thermales .

Le tertiaire est constitué d'argiles rouges gypseuses et repose directement, en discordance, sur le Crétacé. Cette formation est composée de marnes gréseuses et grès reposent directement sur le conglomérat de base. Il convient de préciser que ces formations Miocènes marines, classées fréquemment 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, paraissant très friables à l'affleurement, constituent en réalité une roche assez dure et probablement peu perméable. L'épaisseur de cette série marine semble varier de 200 à 400 m sur la bordure Sud de la plaine .

Les formations quaternaires sont particulièrement bien développées dans les régions comprises entre les reliefs crétacés des monts des Aurès au sud et la dépression centrale du bassin de Rémila, établie principalement sur le Néogène.

CHAPITRE 3 :
Caractéristique
climatologique

Introduction

La climatologie constitue un facteur important pour la connaissance du devenir de la précipitation. Elle repose sur l'interprétation des données des paramètres climatiques mesurés durant une période bien définie permettant ainsi d'estimer les différents composants du bilan hydrique, ce dernier est nécessaire pour comprendre le fonctionnement d'un système hydraulique de surface, impliquant la connaissance des paramètres suivants : (précipitation, température, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissèlement) qui conditionnent ce bilan (Reminiéras,1986).

Le cycle souterrain de l'eau et le climat sont étroitement liés. L'évolution du climat a une influence déterminante sur la variation de l'ensemble des réserves et les fluctuations des nappes d'eau souterraines qui s'alimentent par infiltration directe et se décharge par évaporation au cours de la saison en pays aride et semi-aride. Le climat intervient par sa composition hydrique (pluviométrie), qui régit fortement le régime des eaux souterraines et superficielles.

Le climat algérien est un climat de transition. Il varie du type méditerranéen et semi- aride dans le Nord au type désertique dans le Sahara. Du fait de son appartenance géographique à la zone aride et semi-aride, l'Algérie du Nord est soumise à des conditions hydro climatiques défavorables, caractérisées par:

- Des précipitations irrégulières avec des variations interannuelles importantes
- Une forte irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements (Aouidane, 2017).

L'étude des données climatiques permettant d'analyser les facteurs du climat de la région d'étude qui nous renseignera sur:

- Le type du climat
- Le comportement hydro climatologique
- Le bilan hydrologique.

Ces paramètres sont soit mesurés sur le terrain (précipitations, températures, évaporation) soit calculés par des formules (ETP, ETR, R, I)

3.1 Données climatiques

La Région caractérisée par un climat semi-aride avec un été chaud et sec et l'hiver pluvieux froid et humide se caractérise également par gamme thermique large, et une variation pluviale d'une année à l'autre (D.H.W., 1987).

Pour étudier le climat de la zone d'étude, nous avons exploité les données climatiques qui ont été recueillies au niveau de la station météorologique d'El-hamma (khenchela) les coordonnées de station sont représentées dans le tableau 2.

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

Tableau 2: Les coordonnées géographiques de la station d'Al Hamma (Source : Station Météorologique d'El Hamma).

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

3.1.1 Les précipitations:

La pluie est un facteur essentiel qui caractérise le climat d'une région, elle joue un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eau et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines.

- Précipitations moyennes mensuelles:

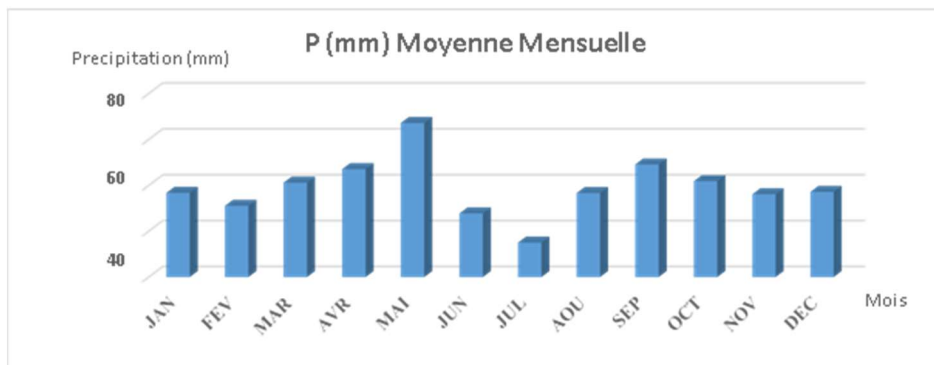


Figure8 : Les précipitations moyennes mensuelles pour période de 21 ans (1998-2018).

Les données pluviométriques mentionnées dans la figure 8, montrent que la moyenne mensuelle est environ 41,80 mm, le mois le moins pluvieux est Juillet avec 15,02 mm. Le mois le plus pluvieux est Mai avec 67,16 mm.

- Les Précipitations annuelles et leurs variabilités:

Les Précipitations annuelles et leurs variabilités sont représentées dans la figure 9.

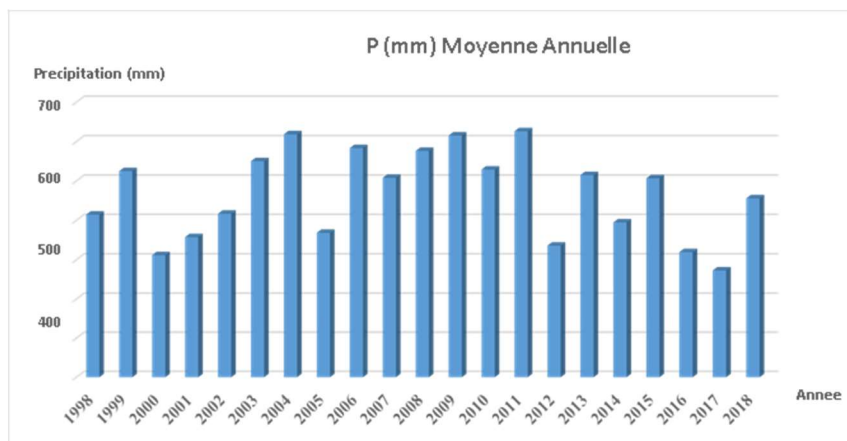


Figure9 : Les précipitations moyennes annuelles pour période de 21 ans (1998-2018).

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.

3.1.2 Les températures

L'étude des températures est d'un grand intérêt, car elle permet de quantifier l'évaporation et par conséquent les conditions des aquifères profonds et la concentration des sels dissous dans leurs eaux et de préciser les limites de la thermalité .

La température est l'un facteur aussi qui caractérisent le climat d'une région. Les données de la température durant la période (1998-2018) sont présentées sur les histogrammes de variation de la moyenne mensuelle et annuelle de température.

- Variations des températures moyennes mensuelles:

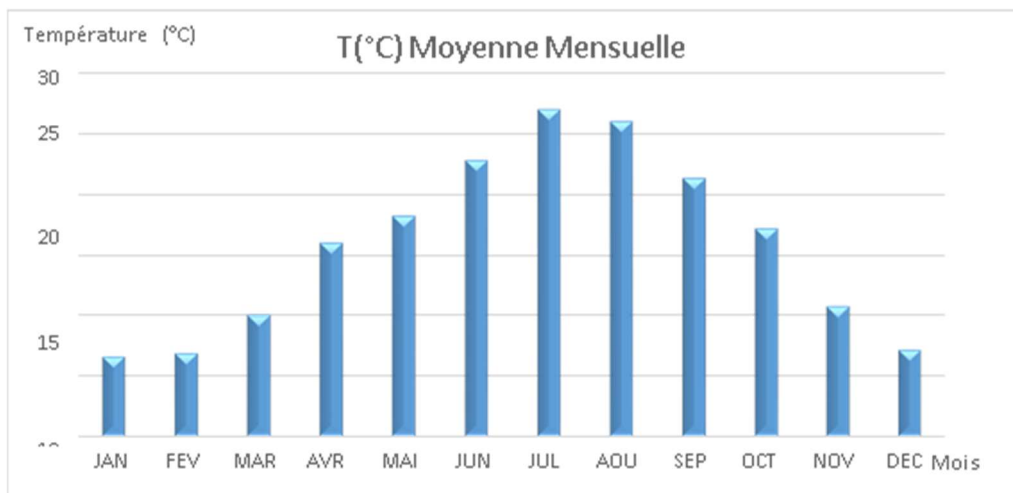


Figure10 : Températures moyennes mensuelles à la station d'Al Hamma (1998-2018).

Les températures moyennes mensuelles présentes de très variations saisonnières elle atteint leur minima au mois de janvier avec 6,6 °C qui est le mois le plus froid de l'année, par contre le mois de juillet est le plus chaud par une valeur maximale de la température moyenne mensuelle de 27,1 °C.

- Variations des températures moyennes annuelles:

Les histogrammes représentant la variation annuelle de la température , montre que l'année la plus chaude est l'année 2017 avec une moyenne annuelle de 20.1°C, et l'année la plus froide est l'année 2016 , avec une moyenne de 15,2°C. Signalons que la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 16 °C.

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

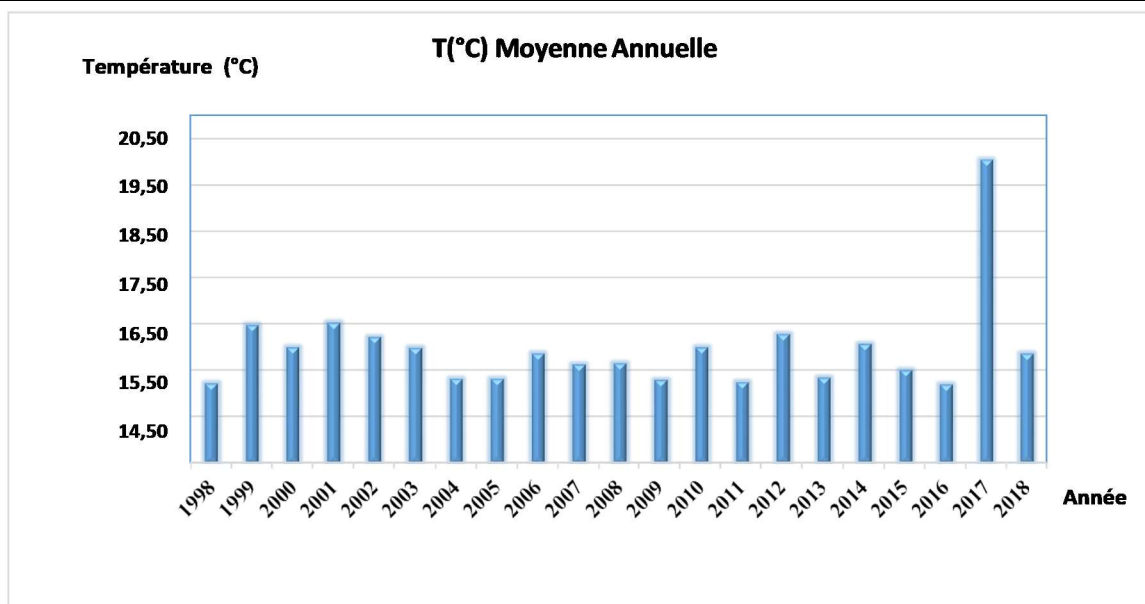


Figure 11 : Températures moyennes annuelle à la station d'Al Hamma (1998-2018).

3.2 Caractérisation du climat

La combinaison de deux principaux facteurs climatiques : la température et les précipitations permettent de déterminer les périodes sèches et humides bien définie d'une région donnée à l'aide du Diagramme pluviothermique (ANRH, 2002).

3.2.1 Diagramme pluviothermique

Le Diagramme pluviothermique de Bagnouls et Gausse met en évidence la notion des saisons humides et sèches, comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T^\circ$).

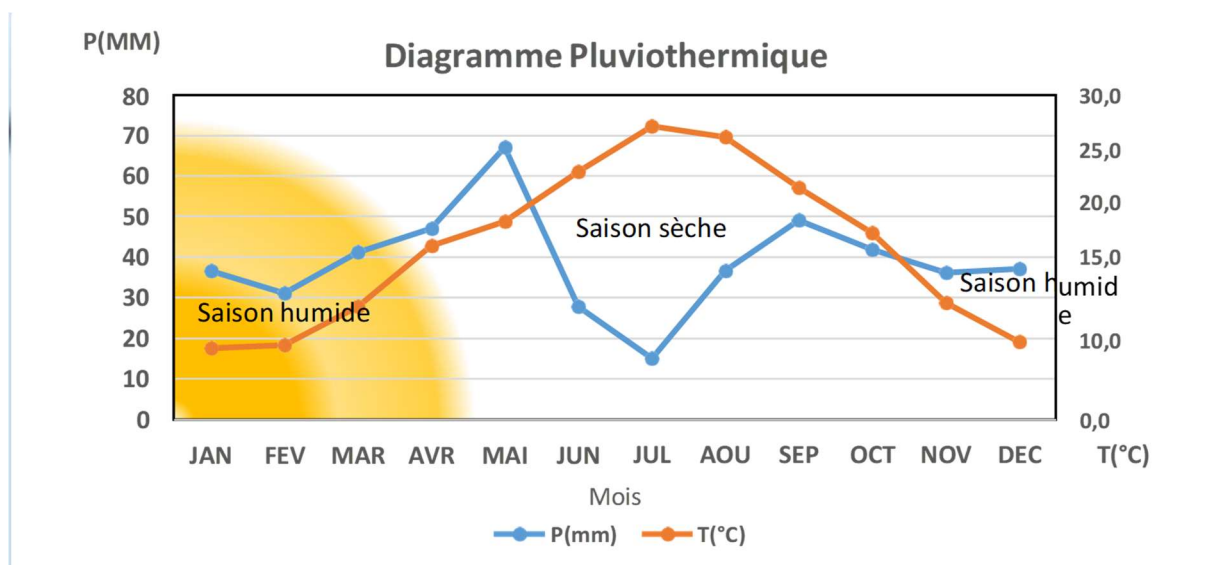


Figure 12: Courbe pluviothermique (1998-2018).

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

Nous constatons que la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de Gaussen permet de mettre en évidence une saison humide débutant au mois de septembre qui se termine au mois de mai, et une saison sèche qui s'étale du mois de juin jusqu'au mois d'aout.

3.2.2 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).

Où:

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.

3.3 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;

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

ETR : Évapotranspiration réelle annuelle en mm;

R : Ruissellement en mm;

I : Infiltration annuelle en mm (Kergreis et Claude, 1991).

- 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).

- 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: $ETP \text{ (mm/mois)} = 16(10T/I)^a$ (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 $i = (t/5)^{1,514}$;

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 $a = 1.67$

- 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.

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

La formule de Coutagne.

La méthode de Thornthwaite

Formule de L.TURC annuelle

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

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 = 466,7862mm ; T = 15,88 C° ce qui nous donne L = 879,23 .

- Le bilan hydrologique selon Thornthwaite:

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnée 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.

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

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 suivant :

Tableau 3: Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de kenchela par méthode de thornthwaite.

	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	-	-	9,81	24,10	25,03	18,78	12,99	-	-	-	-	-	
	49,84	22,83						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

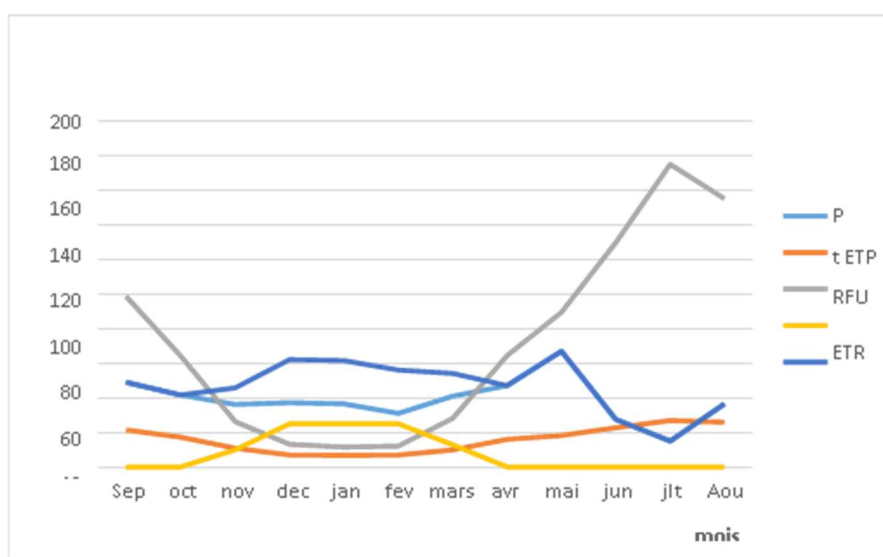


Figure13 : Bilan hydrologique moyen (1998-2018) de la station de kenchela par la méthode de thornthwaite.

3.3.1 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.

CHAPITRE 3 : Caractéristiques climatiques

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)

3.4 Ruissellement superficiel et l'infiltration

Il estime à partir de la formule de TIXERONT – BERKALOFF qui est la suivante:

$$R = P^3 / 3(ETP_c)^2$$

L'application numérique donne le résultat suivant : 44.81mm

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

3.5 Conclusion

La région d'étude est soumise à un climat semi-aride (environ de six mois secs), elle est caractérisée par un hiver froid et pluvieux et 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. Leurs répartitions mensuelles montrent deux grandes saisons bien distinctes, le premier est humide, qui s'étend du mois de Novembre à Mai. La deuxième est sèche, qui s'étale sur les mois de Juin et Août,

L'évapotranspiration potentielle et réelle est respectivement de 869,82 et 432.2mm. Le ruissellement est de 44.81mm et l'infiltration est de - 10.22mm. L'excédent en eau est de 34.58 mm. Les pluies sont généralement insuffisantes, irrégulières et inégalement réparties dans le temps, l'effet de saisonnalité n'est pas respecté. Le déficit agricole est de 437,52 mm, le bilan hydrique de la zone d'étude est déficitaire.

CHAPITRE 4 :
Géochimie des eaux
thermales

Introduction

Ce travail est consacré à l'étude de la qualité des deux sources thermales dans la wilaya de Khenchela; la première source Djaarir située à la commune de Bouhmama et la seconde, Essalihine localisée dans la commune d'Elhamma (Figure 15). Pour cela, des analyses physico-chimiques ont été nécessaires. Dans ce chapitre, nous allons présenter les prélèvements effectués et les différentes méthodes et matériels utilisés.

4.1 Méthodes et stratégie de travail

4.1.1 Échantillonnage

Les 02 échantillons destinés aux analyses physico-chimiques sont prélevés dans des flacons en plastiques (Figure 14), ces flacons sont rincés à l'eau distillée et égouttée avant d'être rincée plusieurs fois et remplie par l'eau à analyser.



Figure14 : les échantillons dans des flacons en plastiques.



Figure15 : Présentation des sites d'échantillonnage.

4.2 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.

4.2.1 Mesures in situ

Trois paramètres physico-chimiques sont mesurés in situ, immédiatement après prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un appareil multiparamètre de type CONSORT 926. Il s'agit pH, CE, T°.

4.2.2 Analyse des éléments chimiques

4.2.2.1 Les bicarbonates (HCO_3^-)

Les dosages ont été effectués par potentiomètre et par volumétrie .

- Appareil : appareil de titrage automatique
- Réactifs : H_2SO_4 à 0.02N, solution tampon .

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

La mesure a été effectuée par volumétrie complexométrie.

- Réactifs : Sel disodique de l'acide Éthylène Diamino Tétra Acétique (EDTA) 0.02 N. noir d'Eriochrome T (indicateur coloré, solution tampon pH = 10)

4.2.2.3 Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+)

Les paramètres ont été déterminés par spectrophotomètre à flamme

- Appareil : un spectrophotomètre à flamme type (SPF CORNING)
- Étalon : solution NaCl 0.1mg/l et KCl 0.1mg/l

4.2.2.4 Les chlorures (Cl^-)

ont été déterminés par colorimétrie :

- Appareil : appareil de titrage (burette et bêche graduée)
- Réactifs : chromate de potassium, nitrates d'argent AgNO_3 , 0.02 N, Étalon : solution NaCl 0.1g/l .

4.2.2.5 Sulfates (SO_4^-)

ont été déterminés par spectrométrie :

- Appareil : spectromètre type (HACH DR/2010)
- Réactifs : En gélule le NITRA VER5

CHAPITRE 4 : Géochimie des eaux thermales

Tableau 4: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux échantillonnées.

Point	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	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)
H. Essalhinee	2620	7.9	65	108.3	40.55	215.4	17.2	280.0	428.31	251.3
H. Djaarir	1848	7.8	37	140.6	44.37	365.7	13.5	226.3	533.4	366.8

4.3 Variation spatiale des paramètres physico- chimiques

4.3.1 Paramètres physiques

Ces paramètres sont très importants, car ils jouent un rôle majeur dans la solubilité de l'eau et aident à la détermination de son origine, pour cela, on va étudier trois paramètres, la température, le pH et la conductivité électrique.

4.3.1.1 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 (l'air), des saisons, et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol.

Les mesures de la température montrent que l'eau de la source de Essalhinee est plus chaude que celle de la source de Djaarir avec respectivement (65°C) pour la première source et (37°C) pour la seconde .

Ceci nous permet d'avancer que la température de l'eau de la source Essalhinee provient des profondeurs du sol, par contre, celle de la source Djaarir coule dans des couches plus superficielles (figure 16). Cette température enregistrée dans les deux sources permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, jouant un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz.

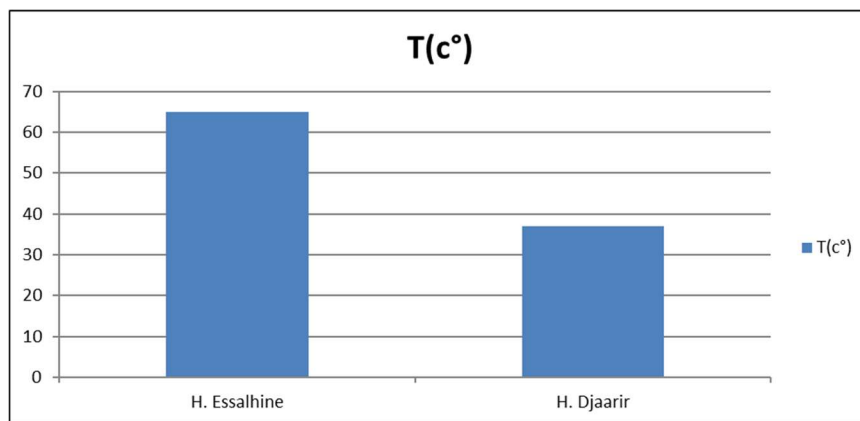


Figure16 : Répartition des températures ($^{\circ}\text{C}$) des eaux de la zone d'étude.

4.3.1.2 Le potentiel hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène est liée principalement à la nature lithologique des terrains traversés. Il constitue le mode de représentation de la concentration en ion H^+ d'une solution, c'est- à- dire l'alcalinité ou l'acidité du chimisme du milieu. Il est exprimé par le log décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+

$$pH = \log 1/ [H^+].$$

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

* Si $[H^+] = [OH^-] \rightarrow$ Le pH = 7, donc l'eau est neutre.

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

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

Le pH des eaux de la zone d'étude est neutre à alcaline. Ceci est lié à la nature des roches présentes dans la région et qui sont essentiellement constituées de roches sédimentaires à composante carbonatée importante.

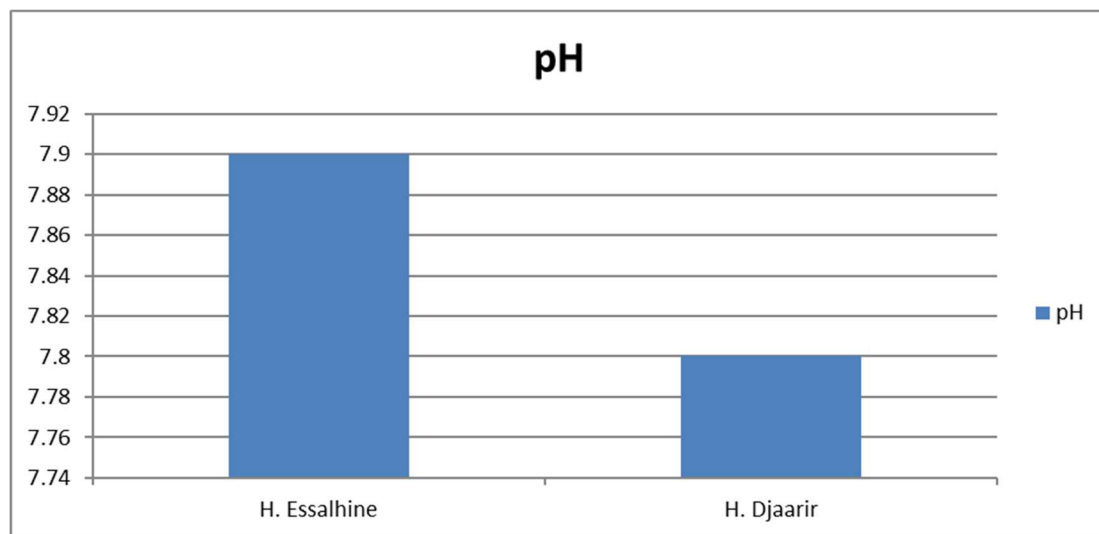


Figure17 : Répartition des pH des eaux de la zone d'étude.

4.3.1.3 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 $\mu.S/cm$.

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 .

Les valeurs de la conductivité des eaux de la région d'étude sont 2620 $\mu S/cm$ (Essalhinee) et 1848 (Djaarir) $\mu S/cm$. La conductivité électrique est liée à la présence d'ions en solution. Elle

CHAPITRE 4 : Géochimie des eaux thermales

augmente avec la température et la concentration en sels dissous. L'OMS conseille, pour une eau destinée à la consommation humaine, une conductivité électrique pouvant atteindre la valeur de 2500 $\mu\text{S. cm}^{-1}$. On note que les valeurs de la conductivité électrique mesurée sont situées au-dessus des valeurs maximales de l'OMS pour Hammam Fssalhine (figure 18). Ces valeurs de la conductivité indiquent une minéralisation très élevée.

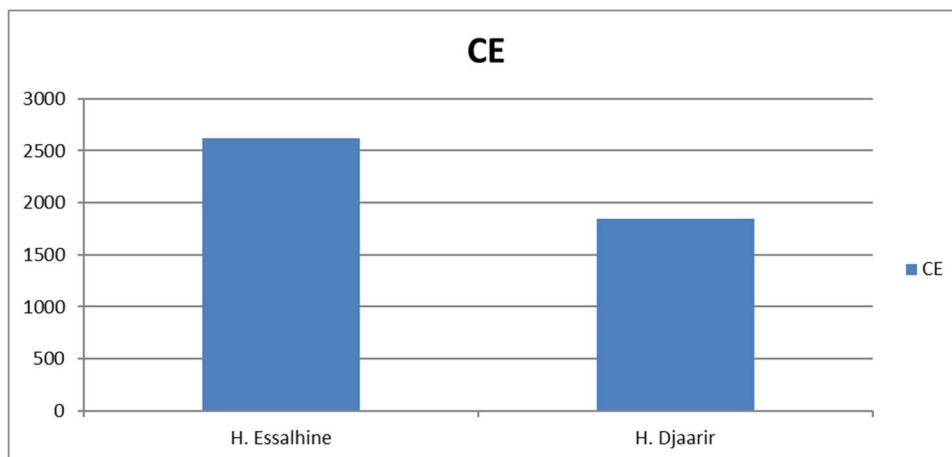


Figure18 : Répartition des conductivités (à 25°C).

4.3.2 Evaluation spatiale des éléments chimiques majeurs

4.3.2.1 Le calcium (Ca^{2+})

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 (CaCO_3) par l'attaque chimique des eaux en présence du gaz carbonique (CO_2) par Eq :

$$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$$

Les résultats des teneurs en Calcium calculées dans les eaux des deux sources diffèrent d'une source à l'autre. L'eau de Essalhine est proche des normes de l'OMS (108 mg/l) par contre, la teneur en calcium à Djaarir se situe à environ 140 mg/l (figure 19) (Chenaker et al., 2018).

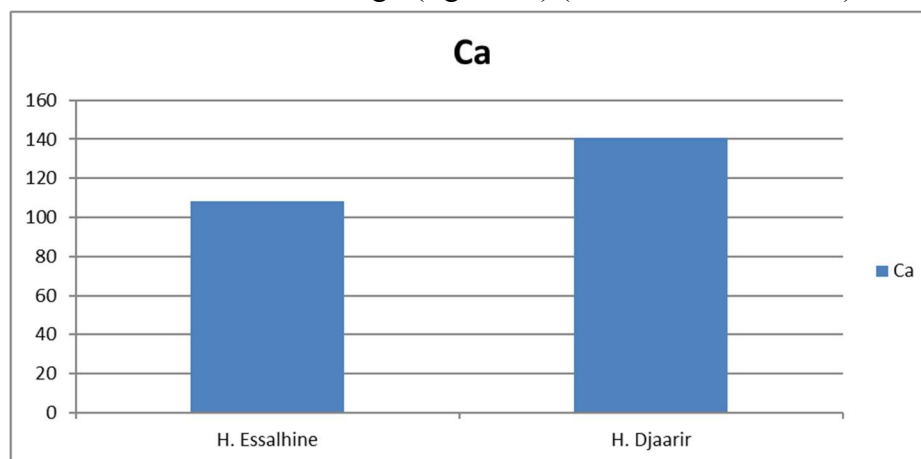


Figure19 : Répartition des concentrations de Ca (mg/l).

4.3.2.2 Le Magnésium (Mg^{2+})

L'existence du 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 « $MgSO_4$ ». La réaction chimique est accentuée par la présence de l'acide carbonique présente dans l'eau. (Vallès, 1985).

La teneur en magnésium pour les deux sources est au-dessous des normes (Figure 20). Ces résultats laissent supposer que les apports en magnésium proviennent de la dissolution des formations évaporitiques, et prouvent une nouvelle fois que ces eaux sont insalubres (Chenaker et al., 2018).

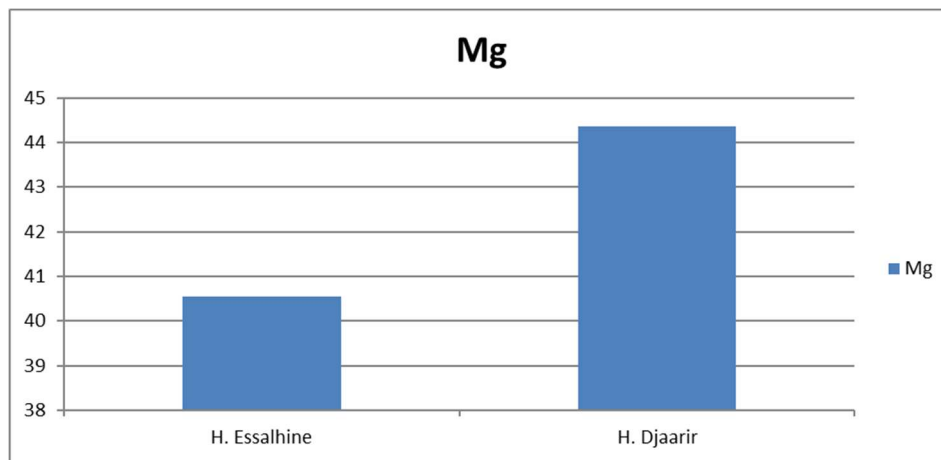


Figure20 : Répartition des concentrations de Mg (mg/l).

4.3.2.3 Le Sodium Na^+ et le potassium K^+

Le sodium est le plus fréquent parmi les éléments alcalino-terreux présents dans la lithosphère. Il est bien présent dans les roches sédimentaires et magmatiques, et a l'effet de la salinité marine (Olivier et al., 2008).

Dans le cas de la source Essalhine, la valeur de Na^{2+} (215 mg/l) est proche de la norme de l'OMS (200 mg/l). Par contre, la source Djaair dépasse toutes les normes aussi bien la norme OMS que la norme algérienne (250 mg /l) avec une teneur de 365 mg/l (figure 21). Ce qui traduirait l'influence des facteurs climatiques à savoir la sécheresse de la saison et par conséquent, le manque de lessivage des argiles et marnes (Chenaker et al., 2018).

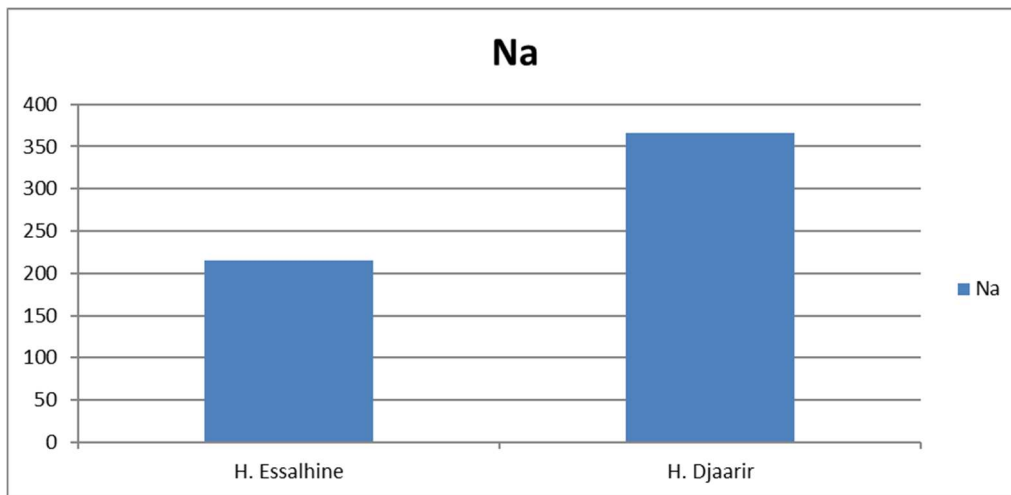


Figure21 : Répartition des concentrations de Na (mg/l).

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées et des argiles potassiques. En général, il dépasse rarement les 10 ou 20 mg/l dans les eaux thermales (Olivier et al., 2008).

Dans le cas des deux sources étudiées, la concentration représente 17 mg/l pour Essalhine, et 13 mg/l pour Djaarir, les deux sources ont dépassé les normes norme de l'OMS (12 mg /l) (figure 22). Ce qui pourrait impliquer l'impact de la saison sèche sur le mécanisme de l'altération des argiles potassiques (Chenaker et al., 2018).

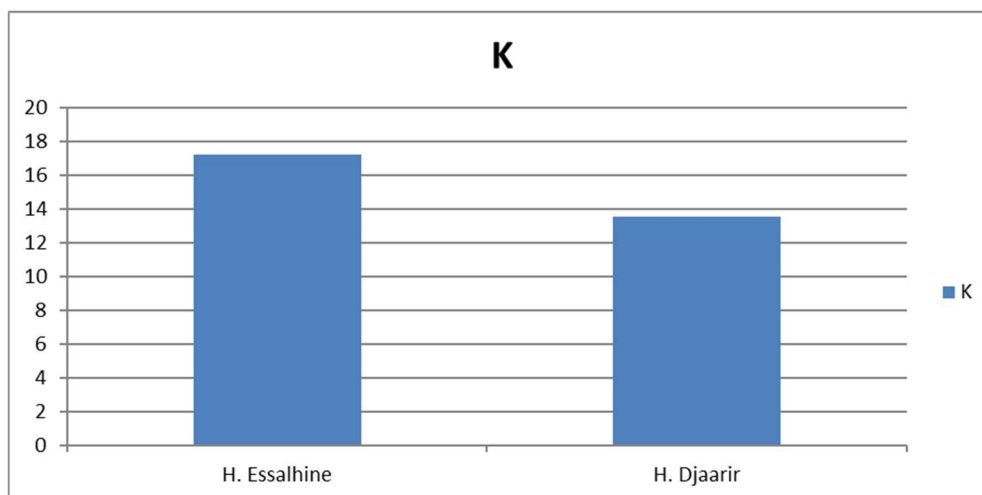
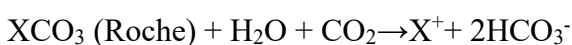


Figure22 : Répartition des concentrations de K (mg/l).

4.3.2.4 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 .

CHAPITRE 4 : Géochimie des eaux thermales

En d'autres termes, la teneur en (HCO_3^-) dans l'eau dépend d'un certains nombres de paramètres physico-chimiques à savoir (Chenaker et al., 2018) :

- 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 mesurées pour les deux sources sont proche aux normes OMS (250 mg /l) (figure 23), ce qui peut être dû à la dissolution des roches calcaires en bicarbonates.

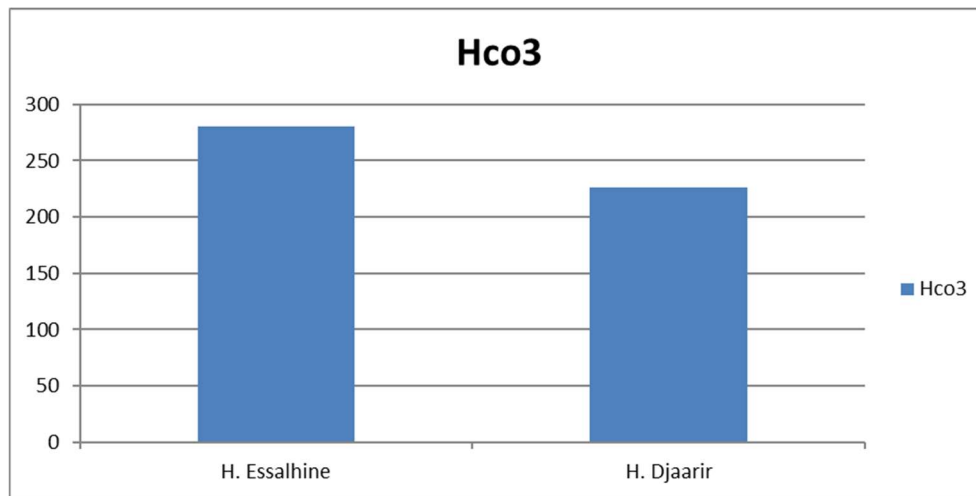


Figure23 : Répartition des concentrations de Hco3 (mg/l).

4.3.2.5 Les chlorures (Cl)

Les chlorures sont des éléments conservés en solution .ils ne subissent aucune interaction eau-roche et ne sont pas dégradés en solution. Ils ont pour origines (Chenaker et al., 2018):

- 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.

Les valeurs mesurées dans l'eau des deux sources Essalhinee (428 mg/l), Djaarir (533 mg/l), sont très élevées par rapport à la norme OMS (250 mg/l) .

Dans les sites de prélèvements, aucune source de pollution apparente n'est remarquée. La raison de cette importante valeur en chlorure pourrait être due à la formation géologique du site. Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines dont les argiles sableuses gypsifères du quaternaire qui couvrent la totalité de la région (Chenaker et al., 2018).

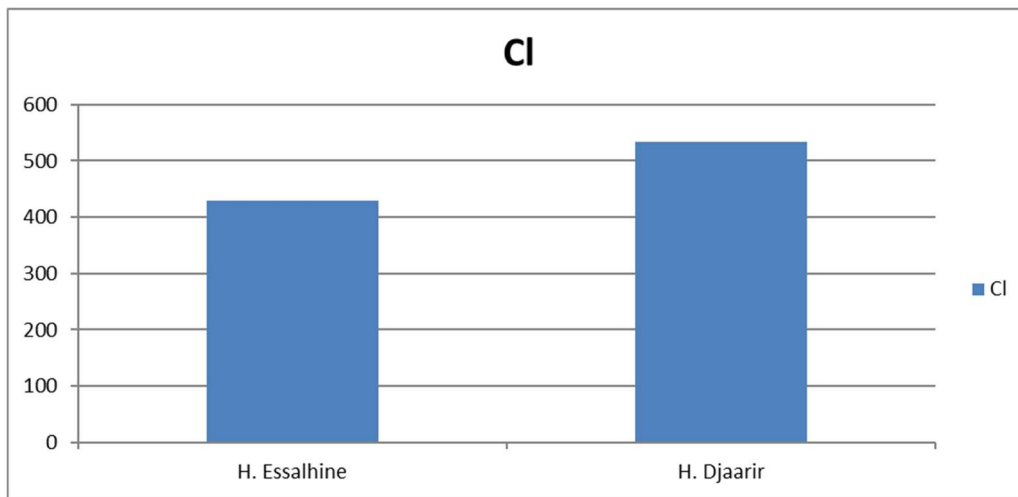


Figure24 : Répartition des concentrations de Cl (mg/l).

4.3.2.6 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., 2009). 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.

Les concentrations mesurées sur les deux sources sont très différentes, dans la source Essalhinee (251 mg/l) la teneur est proche aux normes OMS (250 mg/l) ce qui pourrait traduire l'influence de la saison sèche ou l'absence de la dissolution du gypse, la source Djaairir présente une valeur forte (366 mg/l) ce qui pourrait traduire la présence de la dissolution du gypse ou le temps de séjour est élevé (figure 25) (Chenaker et al., 2018).

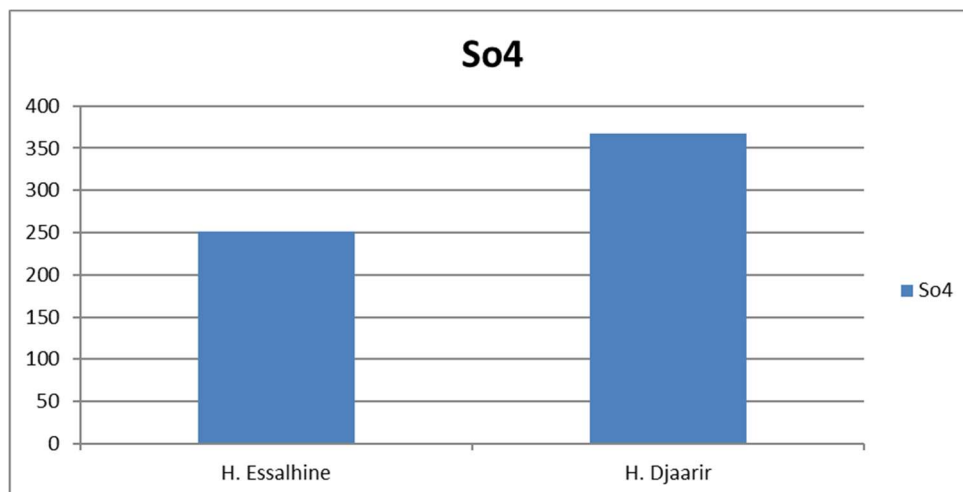


Figure25 : Répartition des concentrations de So4 (mg/l).

4.3.2.7 Paramètre organoleptique odeur

Les eaux des deux sources intéressées par ce travail possèdent une odeur nauséabonde rappelant celle du soufre. Selon Detay (1993), les valeurs importantes de la solubilité du dioxyde de

CHAPITRE 4 : Géochimie des eaux thermales

carbone (CO_2) et de l'anhydride sulfureux (H_2S) permettent d'expliquer pourquoi les eaux thermominérales sont souvent pétillantes ou sentent le soufre.

4.3.3 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 .

4.3.3.1 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 26) montre que les deux sources ont un faciès chlorurée sodique.

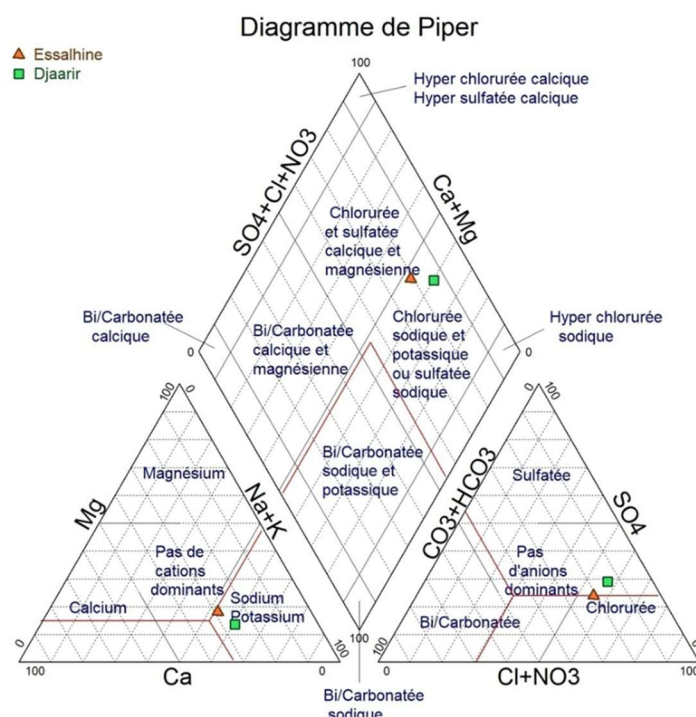


Figure26 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Piper.

4.3.3.2 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 .

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 27), montre que les eaux sont issues d'un même aquifère.

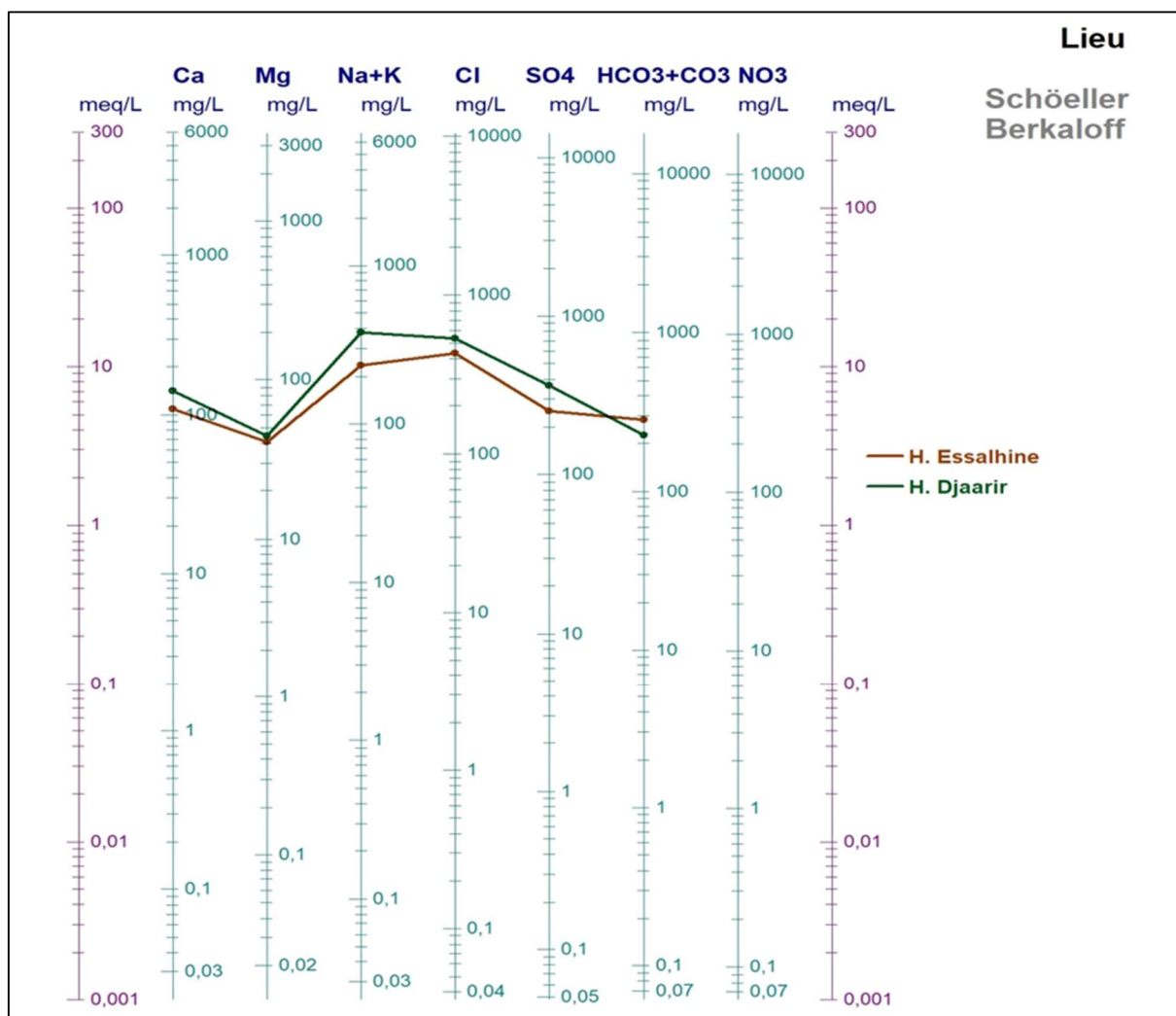


Figure27 : Représentation des sources sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff.

4.3.3.3 Diagramme de Stabler

Ce diagramme donne une représentation très claire des résultats des analyses chimiques. Le sodium est l'élément qui domine sur les cations, pour les deux sources à la fois, Djaarir et Essalhinee. Pour les anions, c'est le chlorure qui domine pour les deux sources ce qui confirme que le faciès est chloruré sodique (figure 28).

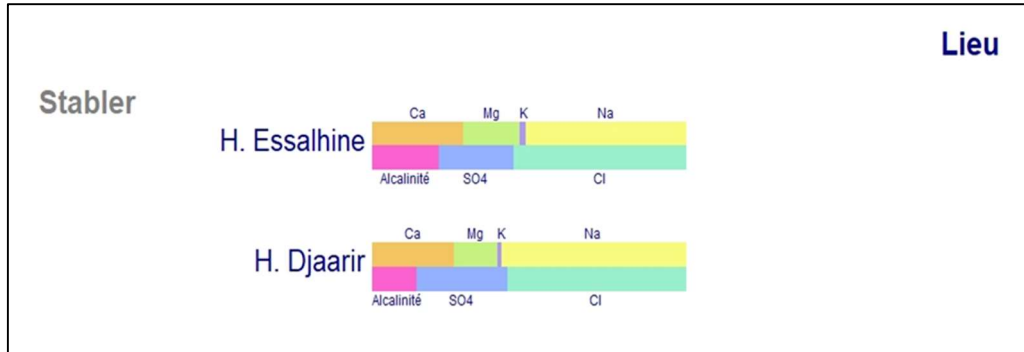


Figure28 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Stabler.

4.3.3.4 Qualité des eaux pour l'irrigation selon Wilcox

L'aptitude des eaux à l'irrigation est ici définie en se basant sur le diagramme de Wilcox, qui permet d'indiquer les zones où les eaux sont utilisables pour l'irrigation selon un critère fondé sur la conductivité et sur le SAR.

Lorsque le SAR est supérieur à 10, le taux de fixation de sodium sur le complexe adsorbant est élevé ce qui provoque une dispersion des argiles. Le sol devient alors compact, imperméable à l'eau et à l'air (Cissé, 2012).

Le pourcentage en ions Na⁺ est défini par la relation suivante:

$$\%Na = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100 \quad (\text{Cissé, 2012}).$$

Où tous les ions sont exprimés en méq/l.

Tableau 5: Classification des eaux à l'irrigation selon Wilcox.

Les classes	La qualité des eaux pour l'irrigation
C1S1	excellente
C1S2	
C1S3	
C2S	Bonne
C2S2	
C2S3	
C3S1	Admissibles; la source de Djaarir
C3S2	
C3S3	(fortement minéralisées) ; la source Essalhinee
C4S1	
C4S2	
C4S3	mauvaise (très minéralisée)

CHAPITRE 4 : Géochimie des eaux thermales

Les eaux de la source de Essalhinee sont localisées dans la zone zones (C4S1) du diagramme de Wilcox, donc elles sont fortement minéralisées ne pouvant être les utilisée que pour des plantes supportant des teneurs élevées en sels (halophytes) (tableau 4), (Figure 29).

La source Djaarir est localisée dans la zone (C3S1), ce qui exprime que les eaux de cette dernière sont admissibles pour l'irrigation .

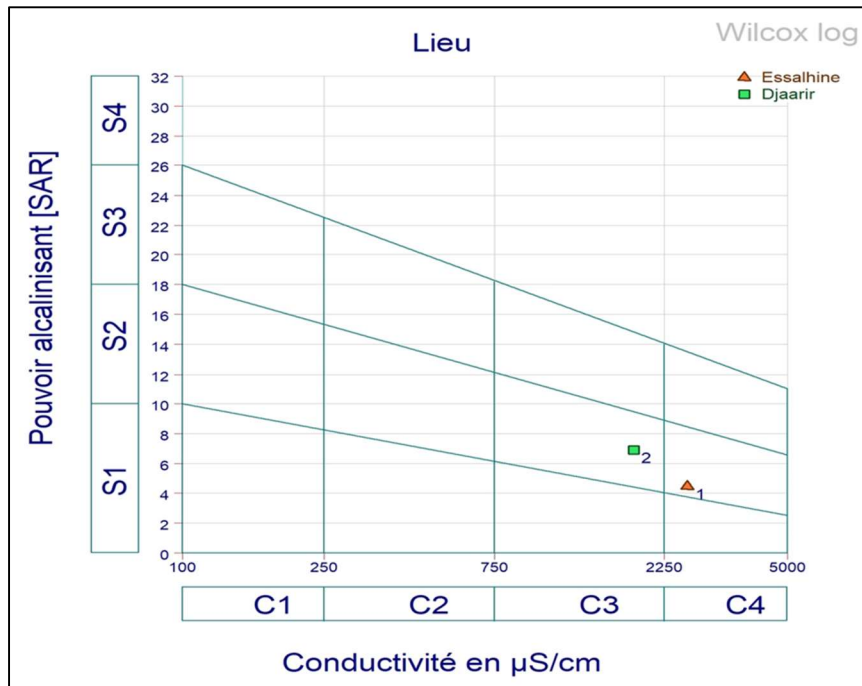


Figure29 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Wilcox.

4.4 Conclusion

D'après la représentation des résultats sur les diagrammes de Piper et de Stabler, les deux sources possèdent un faciès chimique Chlorurée sodique;

D'après le diagramme du Schoeller-Berkaloff, on pourrait avancer que les deux sources possèdent une même origine puisque les deux lignes de représentation des deux sources ont une même évolution.

Tandis que pour la classification de Wilcox, qui est utilisée pour estimer si les eaux de ces deux sources peuvent être utilisées pour l'irrigation, on a pu constater que les eaux de la source de Essalhinee sont fortement minéralisées ne pouvant être les utilisée que pour des plantes supportant des teneurs élevées en sels (halophytes) et les eaux de la source Djaarir sont admissibles pour l'irrigation .

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

La station thermale de Hammam Essalhinee est située dans la commune d'El Hamma, à 7 km au Nord-Ouest de chef-lieu de la wilaya de Khenchela, au sud du bassin de Rémila dans une dépression montagneuse.

La source Djaarir est une source thermale naturelle située à l'Est de la commune de Bouhmama, au Nord-Ouest de la Wilaya de Khenchela et dans la partie Est des Aurès, à une altitude de 1018 m caractérisée par une géologie cénomaniennne ; et est presque complètement entourée d'une chaîne de montagnes.

L'étude géologique de la région des deux sources a montré que les formations géologiques parcourues par les eaux de ces sources influent sur la qualité chimique de leurs eaux parce que les principaux âges géologiques présents dans cette région sont à l'origine de cette composition.

Le climat de Khenchela s'intègre parfaitement dans le climat des hautes plaines constantinoises et des Aurès. Il est méditerranéen, semi-aride, au voisinage de l'aride. Deux saisons distinctes sont obtenues; une saison peu pluvieuse froide allant du mois de novembre jusqu'au mois de mars; une saison sèche chaude qui va du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre.

Du point de vue physico-chimique et hydro chimique, les différentes teneurs mesurées et observées pour chaque paramètre étudié, au niveau des deux sources en comparaison avec les normes OMS, et avec l'interprétation des différents diagrammes (Piper, Stabler, Schoeller-Berkaloff et Wilcox) ont donné les résultats suivants:

D'après la représentation des résultats sur les diagrammes de Piper et de Stabler, les deux sources possèdent un faciès chimique Chlorurée sodique;

D'après le diagramme du Schoeller-Berkaloff, on pourrait avancer que les deux sources possèdent une même origine puisque les deux lignes de représentation des deux sources ont une même évolution.

Tandis que pour la classification de Wilcox, qui est utilisée pour estimer si les eaux de ces deux sources peuvent être utilisées pour l'irrigation, on a pu constater que les eaux de la source de Essalhinee sont fortement minéralisées ne pouvant être les utilisée que pour des plantes supportant des teneurs élevées en sels (halophytes) et les eaux de la source Djaarir sont admissibles pour l'irrigation .

Enfin et d'après tous les résultats affichés, on peut dire que la qualité des eaux des sources Essalhinee et Djaarir ne peuvent pas être destinées à la consommation humaine, on peut utiliser les

Conclusion générale

eaux de Djaarir pour l'irrigation mais pas les eaux de la source Essalhinee. Elles peuvent être utilisées uniquement pour la baignade .

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Guide-piscine.fr
- A.Issaâdi, 1992. Le thermalisme dans son cadre géo structural. Apports à la connaissance de l'Algérie profonde et de ressource géothermales.
- Anctil F., Rousselle J., Lauzon N., (2012). Hydrogéologie. 2ème Ed. Presses internationales polytechnique. p : 1-24.
- 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 Mohamed Khider-Biskra).
- Athamena. M (2006) : Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud Sétifien. Mémoire de Magister. Départ.Hydrolique.Univ.Batna.130 pages.
- Barkaoui, A. E., Zarhloule, Y., Rimi, A., Verdoya, M., & Bouri, S., 2014. Hydrogeochemical investigations of thermal waters in the (northeastern part of Morocco), Environmental earth sciences, 71, 1767-1780.
- Benmarce, K., Hadji, R., Hamed, Y., Zahri, F., Zighmi, K., Hamad, A., & Besser, H., 2023. Hydrogeological and water quality analysis of thermal springs in the (Guelma) region of NorthEastern Algeria: a study using hydrochemical, statistical, and isotopic approaches, Journal of African Earth Sciences, 205, 105011.
- Benmarce, K., Hadji, R., Zahri, F., Khanchoul, K., Chouabi, A., Zighmi, K., & Hamed, Y., 2021. Hydrochemical and geothermometry characterization for a geothermal system in semiarid dry climate: The case study of Hamma spring (Northeast Algeria). Journal of African Earth Sciences, 182, 104285.
- Berkani, C., & Houha, B., 2017. Physico-chemical and therapeutic characteristics of the thermo-mineral waters of Khenchela region (NortheasternAlgeria). Journal of Material and Environmental Science, 8, 1546-1553.
- Boubelli S., (2009). Identification et mise en évidence les formations hydrogéologiques de la wilaya de khenchela (nord-est algérien). Magister. Université Badji Mokhtar Annaba. p : 4 - 24.
- Bouroubi Ouadfel, Y., Benzagouta, M. S., Khiari, A., Souffi Moulla, A., Ait ouali, A., Saadali, B., & Khaska, S., 2021. Hydrogeochemistry and geothermal potential of thermal waters: case study of the Triassic diapir area in Northeastern (Algeria), Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 6, 1-14.

Références bibliographiques

- C.F., (2016). Presentation general de la wilaya de khenchela. 2 p.
- Chenaker, H., Houha, B., & Vincent, V., 2018. Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from (north-eastern Algeria). *Geothermics*, 75, 137-145.
- Cissé O., (2012). Les décharges d'ordures en Afrique. Ed. Karthala. 373 p.
- Cissé O., (2012). Les décharges d'ordures en Afrique. Ed. Karthala. 373 p.
- D.E., (2016)., Présentation de la zone d'accueil. 15 p.
- D.P.A.T., (2012). Situation administrative de la wilaya de Khenchela.10 p.
- D.P.A.T., (2016). Situation administrative de la wilaya de Khenchela. 10 p.
- D.S.P., (2016). Les cartes de la wilaya de Khenchela. 18 p.
- Déri-Takács, J., Erőss, A., & Kovács, J., 2015. The chemical characterization of the thermal waters in Budapest, Hungary by using multivariate exploratory techniques, *Environmental Earth Sciences*, 74, 7475-7486.
- DHWK, 1984. Master plan for planning and development, production and layout services. Department of Khenchela.
- Dib.H, (2008) : Guide pratique des sources thermales de l'Est Algérien. Publication du service Géologique National.14, 15, 40p.
- Elster, D., Szőcs, T., Gál, N., Hansen, B., Voutchkova, D. D., Schullehner, J., & Rman, N. 2022. Terminologies and characteristics of natural mineral and thermal waters in selected (European countries), *Geologija Vilnius*, 65(1), 21-46.
- Espinosa-Paredes, G., & Garcia-Gutierrez, A., 2004. Thermal behaviour of geothermal wells using mud and air–water mixtures as drilling fluids, *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1513-1527.
- Froger ; 2018 Place du thermalisme dans le traitement des affections des voies respiratoires : exemple de la station de cauterets.
- Gouidia.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.Mémoire de Magister.Départ.Géologie.Univ.Annaba. 131 pages.
- Houha. B., (1996) : quantité et qualite des eaux souterraines de la région de khenchela (garat tarf). Mémoire de magister, f.s.t annaba, algerie,
- 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*, n°22, pp 669-680.

Références bibliographiques

- Jilali, A., Chamrar, A., & El Haddar, A., 2018. Hydrochemistry and geothermometry of thermal water in (northeastern Morocco), *Geothermal Energy*, 6, 1-16.
- K. Goma ; 2014. Tout savoir sur les eaux thermales.
- Kergreis A., Clande J., (1991). Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. Jhon Libbey eurotext. 345 p.
- Kifouche, R., Bouaicha, F., & Bouteraa, O., 2023. Impact of thermal water on environment case study of Mila and (Guelma region, Algeria), *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 171(171), 143-157.
- Lafitte, R. (1939). Structure et relief de l'Aurès (Algérie). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 16(119), 34-40.
- Lakrout, A., Meddah, B., & Ali Rahmani, S. E, 2022. Geochemical assessment of thermal water in Bouhanifia aquifer system: suitability for touristic therapeutic treatment, *Applied Water Science*, 12(8), 204.
- Lambert R., (1996). Géographie du cycle de l'eau. Ed. Presses universitaires du mirail. pp : 32- 36, 50-60.
- M. Amran ; 2018. Évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux thermales de Hammam Righa «Ain Defla».
- Olivier W., Dufraisse A., Pétreqium P., (2008). Sel, eau et foret d'hier à aujourd'hui. Ed. Presses universitaires de franche-comté. 573p.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e édition intégrant le premier additif. Genève, Suisse
- Ouali S., (2008). Division Energie Solaire thermique et géothermie. *Bulletin* 013-10. p : 16-18.
- Remeneras G. (1986) : Hydrologie de l'ingenieur. Edit. Eyrolles. Paris. 183 pages.
- Rodier J., Logude B., Ecoll M., (2009). Analyse de l'eau. 9ème Ed. Dunod. 1511 p.
- S .Osmani ; 2012. Le traçage chimique et isotopique des eaux du versant Nord du massif de l'Aurès, Univ Khenchela. 134 page.
- Schoeller, H., 1977. Geochemistry of groundwater. *Groundwater studies an international*.
- SCHWENKE .A, (2007) : De l'usage de l'eau thermale en nébuliseur. Thèse de doctorat en pharmacie, université Henri poincare- Nancy 1.63, 64, 65p.
- Trabelsi, S., Makni, J., Bouri, S., & Dhia, H. B., 2015. Hydrochemistry of thermal waters in (Northeast Tunisia): water–rock interactions and hydrologic mixing, *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 1743- 1754.
- VILA J.M., (1977) : carte géologique de l'Algérie et notices explicatives.

Annexe

Annexe

Norms de l'OMS:

- Calcium (Ca^{2+}) : environ 100 mg/l.
- Magnésium (Mg^{2+}) : environ 50 mg/l.
- Sodium (Na^+) : environ 200 mg/l.
- Potassium (K^+) : environ 10 mg/l.
- Sulfate (SO_4^{2-}) : environ 250 mg/l.
- Bicarbonate (HCO_3^-) : environ 300 mg/l.
- Chlorure (Cl^-) : environ 200 mg/l.
- Température : ne doit pas dépasser 37°C ($98,6^\circ\text{F}$).
- pH : entre 6 et 8.
- Conductivité électrique :
 - Eaux thermales faiblement minéralisées : 50 à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$
 - Eaux thermales modérément minéralisées : 500 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
 - Eaux thermales fortement minéralisées : 1000 à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$