



جامعة عباس لغرور خنشلة
ABBES LAGHROUR UNIVERSITY KHENCHELA



جامعة عباس لغرور خنشلة
ABBES LAGHROUR UNIVERSITY KHENCHELA

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abbas LAGHROUR- Khenchela-
Faculté des sciences de la nature et de la vie
Département de l'Ecologie et l'Environnement

Mémoire de fin d'étude
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master académique
Domaine : Sciences de la nature et de la vie
Filière : Ecologie et environnement
Spécialité : Ecologie fondamentale et appliquée

Thème
Approche hydrochimique et énergie
géothermique des eaux thermominérales
de la région de Khenchela

Présenté par
ARRIF Mohamed Akram
BOUHZEM Ayoub

Devant le jury composé de

Président
Encadrant
Examineur

BOULABEIZ Mahrez
BERKANI Cherifa
MEZHOUD Amel

MCA, Université de Khenchela
MCA, Université de Khenchela
MAA, Université de Khenchela

Année universitaire : 2023/2024

DEDICACES

*De la part de **ARRIF MOHAMED AKRAM***

A mes parents, mon cher père, mon exemple de force, de patience et de défit et ma chère mère qui a souffert sans me laisser souffrir, source de tendresse et de sécurité, que dieu les protègent pour leur présence et leur soutien pendant mon parcours

A ma famille et mes amis.

A mon frère Wahab.

A mon binôme Ayoub pour sa gentillesse et sa compréhension tout au long de ce projet.

*De la part de **BOUHZEM AYOUB***

A mes adorables parents qui étaient toujours présents avec leur soutien moral et matériel, derrière toutes mes réussites depuis l'école primaire Jusqu'à ce jour, Vous m'avez donné l'éducation et enseigné le sens de l'honneur, de la dignité et le respect de soi.

A mes amis.

A ma famille.

A mon binôme Akram pour son esprit d'équipe et sa compétence.

Remercîments

Ce mémoire est le résultat d'un travail de formation de près de deux ans.

Nous voulons adresser tous nos remerciements aux personnes avec lesquelles nous avons pu échanger et

Qui nous a aidés pour la rédaction de ce mémoire. En remercier **Dr. BERKANI**, maitre de conférences classe A à l'université de Khenchela, notre encadrant, pour toute sa compétence et sa compréhension au

long de ce projet.

Nous remercions également **Dr BOULABEIZ Mahrez**, maitre de conférences classe A à l'université de

Khenchela, et **Dr MEZHOUD Amel**, maitre-assistant classe A à l'université de Khenchela d'avoir

accepté jury ce travail.

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont prêté main forte dans l'élaboration de ce travail.

Merci !

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I.....	3
Introduction.....	3
I.1. Bref historique.....	3
I.2. finitions.....	4
I.3. Le thermalisme.....	5
I.4. Les eaux thermales.....	5
I.5. La géochimie des eaux thermominérales.....	6
I.6. Origine de sels dissous dans les eaux thermominérales.....	6
I.6.1. Origine exogène.....	6
I.6.2. Origine endogène.....	7
I.7. Températures des eaux thermominérales.....	7
I.8. Origine de la température des eaux thermominérales.....	7
I.9. Origine des eaux thermominérales.....	8
I.9.1. Origine météorique.....	9
I.9.2. Origine Juvénile.....	9
I.9.3. Origine magmatique.....	9
I.9.4. Origine Volcanique.....	9
I.9.5. Origine mixte.....	9
I.10. Classification des eaux thermominérales.....	10
• Eaux Athèrmales.....	10
• Eaux Hypothèrmes.....	10
• Eaux Mésothèrmes.....	10
• Eaux Orthothèrmes.....	10
• Eaux Hyperthèrmes.....	10
I.11. Législation régissant les eaux thermales.....	10
I.12. L'hydrothermalisme.....	11
I.12.1 Les modes de fonctionnement des systèmes thermaux.....	12
• Le mode de réchauffement des eaux.....	12
• Le moteur de la remontée en surface.....	12
• La pression hydrostatique.....	12
• La présence de gaz dissous.....	12

• La différence de densité de l'eau chaude.....	13
I.12.2. Le thermosiphon.....	13
I.13. Le gradient géothermique.....	14
I.14. Le Géothermie.....	15
1.14.1 - Les différents types d'énergies géothermales.....	15
• La géothermie de faible profondeur (30 à 400 mètres).....	15
• La géothermie profonde (dès 400 mètres de profondeur.....	15
• La géothermie de grande profondeur.....	15
CHAPITRE II.....	16
II.1. Cadre géographique.....	16
II.2. Cadre géologique.....	17
II.2.1. Tectonique régionale.....	17
II.2.1.1. La série stratigraphique.....	17
• Trias.....	17
• Jurassique.....	18
• Crétacé.....	18
• Miocène.....	18
• Quaternaire.....	18
II.3. Les sources thermales de Khenchela.....	19
• Hammam Essalihine.....	19
• Hammam El Kenif.....	20
• Hammam Djaarir.....	20
II.4. Cadre socio-économique.....	21
II.5. Industrielle et l'agriculture.....	21
II.6. Réseau hydrographique.....	22
II.7. Végétation et activité humaine.....	23
II.8. L'altitude.....	23
II.9. Le climat.....	25
CHAPITRE III.....	27
Introduction.....	27
III.1. Prélèvements et Représentativité de l'échantillonnage.....	27
III.2. Résultats et discussion.....	28
III.2.1. Les paramètres physiques.....	28
• La température.....	28
•	

Le pH.....	29
• La conductivité électrique.....	30
III.2.2. Les paramètres chimiques.....	31
III.2.2.1. Origine des sels minéraux.....	32
• Les cations.....	32
• Les anions.....	33
III.2.2.2. Le facies chimique des eaux.....	34
III.2.2.3. Géothermie au Nord Est Algérien.....	36
• L'origine de la chaleur.....	37
• Les géothermomètres à silice et à cations.....	38
• Géothermomètre Na/K.....	38
• Le géothermomètre à silice.....	39
Conclusion générale.....	42
Références bibliographiques.....	

Liste des figures

Figure 1. Schéma de l'origine météorique des eaux thermominérales (Suess, 1903).....	8
Figure 2. Schéma de l'origine magmatique des eaux thermominérales (Suess, 1903).....	9
Figure 3. Schéma de l'origine mixte des eaux thermominérales (Fourmarior, 1955).....	9
Figure 4. Schéma de la circulation des eaux thermales Thermosiphon (Moret, 1946).....	14
Figure 5: Carte du gradient géothermique de l'Algérie du Nord (N. KaziTani, 1974)....	15
Figure 6. découpage administratif de Khenchela.....	16
Figure 7. Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de L'Aurès (Laffitte, 1939 ; modifié par Guiraud, 1973 In Houha, 2007).....	19
Figure 8. la carte géographique des 3 sources.....	21
Figure 9. Données climatiques de la température et des précipitations (1991-2020).....	25
Figure 10. Carte critère du climat (Bouzekri, 2015).....	26
Figure 11. Prélèvement des échantillons, Janvier 2024.....	28
Figure 12. Représentation graphique comparative en histogramme de la température des sources	29
Figure 13. Représentation graphique comparative en histogramme du pH.....	30
Figure 14. Représentation graphique comparative en histogramme de la conductivité électrique	31
Figure 15. Réalisation des analyses chimiques, janvier 2024.....	31
Figure 16. Représentation graphique en histogramme des éléments majeurs.....	32
Figure 17. représentation graphique du diagramme de Piper des eaux thermales de la région de Khenchela.....	35
Figure 18. représentation graphique du diagramme de Schoeller des eaux thermales de la région de Khenchela.....	36
Figure 19. Variation de la température en fonction de la profondeur.....	40

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification des eaux thermales (Moret, 1946).....	11
Tableau 2. Coordonnées des principales composantes Hammam El-Kenif (Belmekki, 2013).....	20
Tableau 3. température à l'émergence et la conductivité électrique des 3 échantillons.....	29
Tableau 4. Températures et profondeurs du gisement hydrothermal calculées par les différents géothermomètres.....	40

INTRODUCTION

Introduction générale

Ce jour-là, les eaux thermales acquises une importance pour ces différents avantages dans des divers domaines et en particulier leurs effets thérapeutiques. **(Issaadi, 1992 ; Duriez, 2006).**

L'Algérie septentrionale contient en abondance des sources thermominérales de composition très variée. La répartition des eaux thermominérales en Algérie, est très irrégulière. Ces sources sont augmentées en nombre au fur à mesure que l'on se rapproche de l'Est du pays. Cette répartition semble suivre celle des gîtes métallifères. C'est ainsi que l'on compte une vingtaine de sources dans la région ouest, environ 40 dans le centre et 150 dans l'Est. **(Dib, 1985 ; Aboubakar, 2012, Bekhouche, 2016).**

Un inventaire effectué dans les années 1970 recense quelques 202 sources, classées comme suit : 136 sources locales, 55 régionales et 11 nationales. Le décret n°98-370 de 23 novembre 1998 relatif au classement des communes ou groupement de communes en stations classées, signale quant à lui quelques 41 stations hydrominérales. **(Ouali, 2005 ; Bouaicha, 2018).**

La plupart des stations thermales et hyperthermales d'Algérie sont reconnues pour leur efficacité dans le traitement de diverses affections telles les affections de l'appareil locomoteur, les affections rénales et gynécologiques, les affections de la peau les affections respiratoires, les affections O.R.L, les maladies des vaisseaux et certaines maladies de métabolismes. **(Hellal, 2017).**

Ce travail consiste à l'actualisation des études des eaux de sources thermales du point de vue hydrogéologique et géothermique de la région de Khenchela, en se basant bien-sûr sur les travaux antérieurs.

Les éléments de compréhension, amenés par cette étude, serviront de bases pour répondre aux questions de ces acteurs. Ces questions concernent non seulement des aspects pratiques, mais également des aspects fondamentaux plus généraux, nécessaires à la communication envers les touristes et la population locale et qui peuvent se résumer ainsi :

- Pourquoi une ressource thermique de cette nature existe-t-elle ?
- Quelle est l'origine de ces eaux ?
- Quel est le mécanisme qui permet leur réchauffement ?
- Comment ces eaux acquièrent les sels minéraux ?

INTRODUCTION GENERALE

Pour mener à bien ce travail, nous avons structuré notre mémoire en deux parties ; une partie théorique représente une synthèse bibliographique dans lequel nous avons essayé de rappeler les notions de thermalisme, les principaux caractéristiques et constituants des eaux thermales, les principales origines des eaux thermales et enfin un aperçu sur le thermalisme en Algérie. Une présentation générale de la zone d'étude en abordant aussi le contexte géologique de la région de Khenchela, et une présentation des caractéristiques climatiques et hydrogéologiques de la zone d'étude.

Une partie pratique traite la stratégie de prélèvement, le matériel utilisé et les méthodes d'analyses physicochimiques utilisées et une analyse hydrochimique des eaux des sources thermales, à travers la représentation graphique des résultats, puis l'interprétation en cherchant l'origine probable pour chaque élément, avec le calcul à la fin des géothermomètres des différentes sources.

En fin, notre travail se termine par une conclusion générale avec quelques recommandations.

PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I
GENERALITES SUR
LES EAUX
THERMOMINERALES

Introduction

Il existe sur le territoire algérien plus de 200 sources thermales d'après les études réalisées à ce sujet, ce nombre croît régulièrement quand on déplace vers l'Est. Les températures mesurées à l'émergence varient de 35°C à Ben Haroun à 98°C à Hammam Debagh.

La minéralisation des eaux est déterminée surtout par la nature chimique et minéralogique des sédiments qu'elles traversent.

Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias si répandu en Algérie (**Guigue, 1940**).

Ce chapitre établit un bilan des connaissances autour de l'hydrothermalisme en général puis autour des sites thermaux de Khenchela en particulier. La synthèse bibliographique des études techniques réalisées sur le secteur permet de définir plus précisément le point de départ et les objectifs de cette étude.

I.1. Bref historique

Les traces trouvées dans les stations thermales remontent à l'époque romaine. En effet les romains accordaient une importance très particulière aux sources thermales, très souvent ils construisirent leurs sites autour de ces sources, comme c'est le cas pour les sites suivants : Aquae Maurétanie Césarienne (Hammam Righa) ; Aquae Sirenses (Hammam Bouhanifia) ; Aquae Chibilita Nae (Hammam Meskhoutine).

Les sources thermales furent aussi bien exploitées par les arabes, en effet très souvent des sources portant le nom d'un marabout Sid Ahmed Bouhadjar qui a vécu dans la tribu des Ouled Bouhadjar avant la colonisation française et dont le Mosolé est situé au Sud-Est de la ville de Hammam Bouhadjar. (**Ouali, 2005 ; Ouali, 2018**).

Les Turcs aussi très amateurs des bains chauds construisirent dans les villes plusieurs bains avec les installations permettant le stockage de l'eau de source.

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

Aujourd'hui comme dans le passé les stations thermales sont très sollicitées par les algériens pour divers traitements d'ordre rhumatologique, dermatologique et psychiatrique (**Bekhouché, 2009 ; Hellal, 2017**).

Il est intéressant de savoir qu'en 1823 furent effectuées les premières études scientifiques sur le thermalisme en Algérie et que fut mise en place la première réglementation en vigueur portant sur des données médicales précises. Il est intéressant aussi de citer quelques auteurs qui ont contribué avec leurs travaux en Algérie dans ce domaine :

- En 1852, M. Ville publia ses recherches sur "Les roches, les eaux et les gites minéraux des provinces d'Oran et d'Alger" ;
- En 1880, J. Bails publia une notice sur "Les sources thermales et minérales du département d'Oran" ;
- En 1889, M. Ville publia une notice sur "Les sources thermales et minérales d'Algérie" ;
- En 1923, MM. Pouget et Chouchak effectuèrent une étude très détaillée sur "La radioactivité des eaux algériennes" ;
- En 1940 et 1947, S. Guigue étudia "Les sources thermominérales de l'Algérie" dans le cadre de la carte géologique de l'Algérie ;
- En 1974, P. Verdeil publia une carte au 1/500000 des eaux minérales, thermales et thermominérales de l'Algérie ;
- En 1985, H. Dib-Adjoul travailla sur "Le thermalisme de l'Est algérien" dans le cadre de sa thèse de doctorat troisième cycle ;
- En 1992, A. Issaâdi travailla aussi sur "Le thermalisme dans son cadre géostructural" dans le cadre de sa thèse de doctorat d'état. (**Athamena, 2006**)

I. 2. Définitions

- ❖ **Trésor de la Langue Française (eau) thermale** : " Qui a une température élevée à son point d'émergence et qui possède des propriétés thérapeutiques".
- ❖ **Le Petit Robert (1994) Thermale** : "Qui a une température élevée à la source et des propriétés thérapeutiques". (Eaux thermales chargées de principes minéralisateurs).
- ❖ **Dictionnaire des Sciences de l'Environnement (1990)** "Eau de source ayant une température élevée".
- ❖ **Dictionnaire de l'Environnement (AFNOR, 1994)** "Eau d'une source chaude ou tiède".
- ❖ **Dictionnaire français d'Hydrogéologie (1977)** "Eau souterraine naturellement chaude à son émergence (source, puits jaillissant) et utilisable de ce fait à des fins particulières à : thermalisme, chauffage".

- ❖ **Paramelle (1856)** : "Les sources d'eau chaude ou thermales, présentent tous les degrés de chaleur depuis l'eau bouillante, qui est de 100 degrés, jusqu'à la tempérée."
- ❖ **De Launay (1899)** : "Une source est dite thermale quand sa température dépasse celle de la zone de température constante".

❖ **Définition proposée (définition officielle)**

Selon **Vincent VALLES (2004)** : Il s'agit d'une eau dont la température est supérieure à la température moyenne des eaux de nappe de la région. En général, la température des eaux régionales est très proche de la température moyenne annuelle de l'air dans cette même région. La température des eaux du sol et du sous-sol suit les variations de la température de l'air avec un décalage temporel et un amortissement qui augmente avec la profondeur. Au-delà de 1.50 m les variations temporelles sont assez faibles et rapidement en dessous de cette profondeur, la température peut être considérée comme constante (sauf cas particulier comme certains systèmes karstiques).

I.3. Le thermalisme

Le thermalisme est l'utilisation thérapeutique des propriétés de certaines eaux minérales naturelles pour guérir ou soulager des personnes souffrant d'affections diverses. L'ensemble des moyens médicaux, sanitaires, administratifs, sociaux et d'accueil est mobilisé pour l'utilisation des eaux minérales, des gaz thermaux et des boues thermales à des fins thérapeutiques : on parle de thérapie thermique ou crénothérapie. La médecine thermique est naturelle par définition. C'est une médecine douce, complémentaire et constitue une alternative aux autres soins médicaux (**Lakhdari & Bouaicha, 2016**).

I.4. Les eaux thermales

Une eau thermale est, par définition, une eau minérale chaude. Dans le langage courant, on appelle « eau thermal » toute eau minérale dotée de propriétés thérapeutiques et utilisée au sein d'un établissement thermal. Enfin, l'appellation en elle-même, ainsi que l'autorisation d'exploitation, ne sont données que sur l'agrément du ministère de la santé (**Ouali, 2005 ; Hellal, 2017**).

I.5. La géochimie des eaux thermominérales

- **Principaux anions** : Parmi Les anions, nous mettrons dans l'ordre d'importance Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , I^- , et F^- L'anion Cl^- est le plus commun et provient de la dissociation des chlorures, NaCl et KCl . Le Brome, Br^- est fréquent et est souvent associé au potassium, au Sodiums et au magnésium. Il atteint quelques centigrammes par litre. SO_4^{2-} est fréquent dans de nombreuses eaux thermo-minérales. HCO_3^- est l'anion le plus répondu dans les eaux souterraines ou il est rarement absent. Souvent son excès donne des sources incrustantes. L'iode est très répondu : vichy, plombières, Luchon...etc. Le fluor F^- joue un rôle important dans les sources fluorées.

- **Principaux cations** : Le cation sodium est le plus répondu et est rarement absent. Sa teneur est variable. Il est combiné à l'état de chlorure, bicarbonates, sulfures. Le potassium K^+ est subordonné au sodium mais on plus faible quantité. Le lithium Li_2^+ toujours en petite quantité. Le calcium est le cation le plus fréquent car il est très courant dans ses roches sédimentaires. Le Magnésium Mg^{2+} accompagne très souvent le calcium à l'état de carbonates et chlorures. Le fer Fe^{2+} est fréquent dans toutes les sources, combiné on carbonate, sulfates on complexe organiques. Le barium Ba^{2+} , le strontium Sr^{2+} et l'aluminium Al^{3+} sont plus rares.

I.6. Origine de sels dissous dans les eaux thermominérales

Ils ont soit une origine exogène soit une origine endogène.

I.6.1. Origine exogène

La principale source dissous provienne du lessivage des terrains dans les quels circulent les eaux souterraines. Des réactions chimiques, l'action de micro-organisme et des échanges de bases modifiant la composition ionique et les proportions initiales.

- **Lessivage des terrains** : Les chlorures proviennent de la dissolution de sels naturels : sel gemme, sels de potasse. C'est pourquoi le Trias donne naissance à de nombreuses sources thermominérales. Les carbonates et bicarbonates sont fréquents dans les roches : carbonates de calcium, de magnésium. Les sulfates, sulfures, hypo-sulfites, l'hydrogène sulfuré et le Soufre proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ($\text{Ca SO}_4 2\text{H}_2\text{O}$), suivie éventuellement d'une réduction et de la décomposition des sulfures métalliques Fe S_2 , Fe As S , Cu Fe S_2 ou des Pyrites de fer. Cette origine à partir du gypse explique la liaison fréquente des eaux sulfatées et moins

fréquemment sulfurés avec le Trias. L'iode provient de la circulation dans les terrains riches en substances organiques végétales fossiles, comme par exemple les schistes. Le lithium peut provenir de minéraux de roches silicatées acides au type granulites, ou leur altération donne des micas à base de lithium. Le fer est fourni par la décomposition de Pyrites ou par la dissolution de bicarbonates. Le sodium peut être issu également de la sericitisation des plagioclases par la transformation de leur feldspath sodique en un mica potassique avec libération de Na.

- **Echanges de bases** : c'est un mécanisme de permutation qui se fait en présence des argiles, ils jouent un rôle important dans le chimisme des eaux particulièrement souterraines. Le processus d'échanges de bases a été illustré par (**Guigue, 1947**).

I.6.2. Origine endogène

La vapeur d'eau produite dans la profondeur de l'écorce terrestre par les phénomènes magmatiques entraîne des éléments endogènes. C'est le cas du fluor qui semble avoir une origine presque exclusivement interne. Sa présence caractériserait les eaux juvéniles. Les autres éléments comme le chlorure, le brome, Les sulfates et peuvent avoir une origine interne. (**Guigue, 1947**).

I.7. Températures des eaux thermominérales

La température est la caractéristique la plus importante des eaux thermominérales. Importante en elle-même par ses effets physiologiques et hydrodynamiques et aussi par le fait généralement admis que la concentration en sels dissous augmente avec elle. La température influence aussi le débit de sources thermominérales, où il est important lorsque la température est plus élevée.

Une source est dite thermale lorsque ses eaux ont une température supérieure de 05 à 06 °C la température moyenne de la zone d'émergence. (**Dib, 2008 ; Ouali, 2015**)

I.8. Origine de la température des eaux thermominérales

La première origine de la température des eaux thermales c'est bien le gradient géothermique. D'autres origines secondaires peuvent être liées aux, volcanisme (refroidissement de magmas) et les réactions physico-chimiques.

- **Gradient géothermique** : Il est défini comme la profondeur de pénétration dans le sol exprimé en mètre, nécessaire pour que la température augmente de 1°C. Sa valeur moyenne est de 30 à 35m.

Elle diminue dans les régions volcaniques (10 à 15m) et augmente dans les massifs granitiques (60 à 80m) (Castany, 1963).

- **Volcanisme** : l'activité volcanique produit de la chaleur par les émissions de magma et d'eaux juveniles hyperthermales. (Castany, 1963).

Réactions physico-chimiques : elles dégagent de la chaleur, mais en quantité peu importante, ces réactions sont de type : exothermique (oxydation et réduction) ou radioactifs. Par exemple l'oxydation de la Pyrite de fer contribue à une augmentation de la température de 0.03°C (Schoeller, 1963).

I.9. Origine des eaux thermominérales

Plusieurs hypothèses ont été mises quant à l'origine des eaux thermominérales, par exemple (A. Dambrée, 1887) in (Castany, 1963) a mis une origine exclusivement volcanique, après (A. De Lannay, 1899), démontré que la minéralisation et la température des eaux thermominérales se expliquent par la circulation des eaux à différentes profondeurs. Quelques années après (Suess, 1903) admettent une double origine météorique et juvénile.

I.9.1. Origine météorique

Les eaux de surface provenant de précipitation s'infiltrent dans le sol et le sous-sol, puis descendent par gravité dans les couches profondes. Au cours de leur trajet, elles dissolvent des sels minéraux et leur température s'élève sous l'action de gradient géothermique. Puis par remontée rapide dans les fissures et fractures ouvertes, elles émergent à la surface (Fig.1)

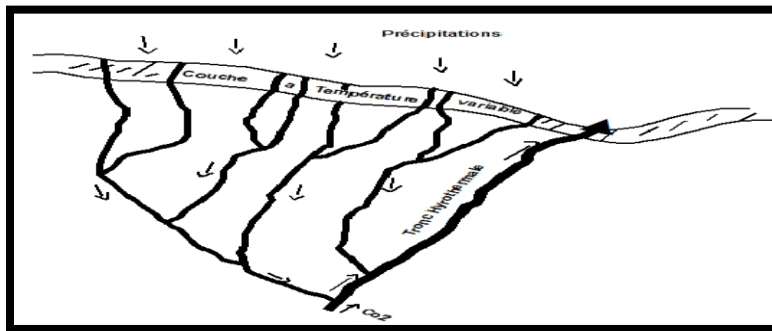


Figure 1. Schéma de l'origine météorique des eaux thermominérales (Suess, 1903)

I.9.2. Origine Juvénile

Parfois les températures élevées et surtout les caractéristiques physico-chimiques des eaux thermo-minérale, il peut être expliqués par la circulation des eaux d'origine météoriques, pour cela il est nécessaire de faire appel à des sources profondes (eaux juvéniles ou endogène). Les eaux juvéniles peuvent avoir trois origines principales :

I.9.3. Origine magmatique La cristallisation des magmas libère des constituants volatils qui souvent s'échappent sous forme de fumerolles. Ils sont composés essentiellement d'hydrogène et de vapeur d'eau accompagnés de fluor, chlore, soufre, carbone, phosphore et bore (Fig.2)

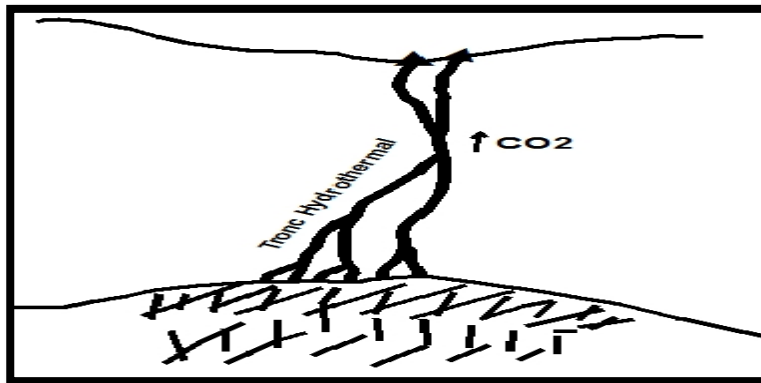


Figure 2. Schéma de l'origine magmatique des eaux thermominérales (Suess, 1903)

I.9.4. Origine Volcanique : les eaux juvéniles peuvent provenir de la consolidation des laves et de la vapeur d'eau d'origine volcanique. Cette émission de vapeur d'eau est carbonique, d'azote, H₂S, Hcl, Hf et SO₂ (Fourmarior, 1955).

I.9.5. Origine mixte : les eaux thermo-minérales ont souvent une origine mixte par mélange des eaux juvéniles, connés et météorique (Fig.3). Les venues profondes de gaz carbonique peuvent activer les eaux d'infiltration. (Fourmarior, 1955).

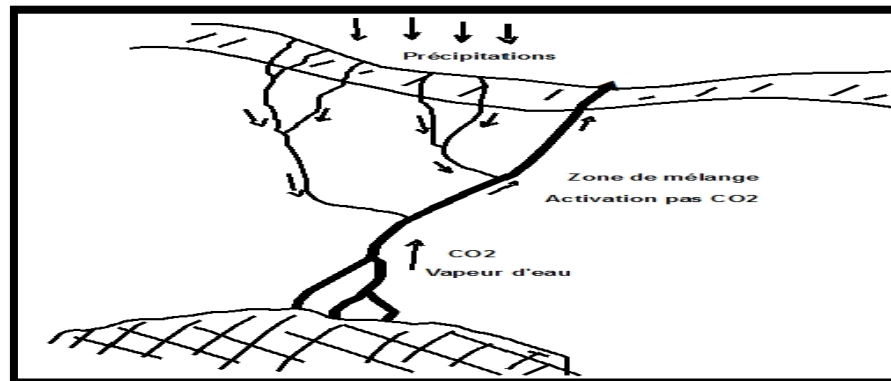


Figure 3. Schéma de l'origine mixte des eaux thermominérales (Fourmarior, 1955).

I.10. Classification des eaux thermominérales

Divers classifications ont été proposées pour les eaux en fonction des températures proposée par plusieurs auteurs H.schoeller, P. Verdeil, H.Dib, A.Issadi (**Mammeri, 2017**). Nous admettons donc la distribution suivante :

- **Eaux Athèrmales** : eaux dont la température est inférieure à la température moyenne annuelle du lieu d'émergence.
- **Eaux Hypothèrmes** : eaux dont la température est égale à la température moyenne annuelle du lieu d'émergence
- **Eaux Mésothèrmes** : eaux dont la température est comprise entre la température moyenne annuelle du lieu d'émergence plus 4°C et 37°C qui est la température du corps humain ;
- **Eaux Orthothèrmes** : eaux dont la température est comprise entre 37°C et 45°C.
- **Eaux Hyperthèrmes** : eaux dont la température est supérieure à 45°C.

I.11. Législation régissant les eaux thermales

Le décret exécutif n° 94-41 du 17 Chaâbane 1414 correspondant au 29 janvier 1994 portant définition des eaux thermales et réglementant leur protection et leur exploitation.

-Décret exécutif n° 07-69 de l'Aouel Safar 1428 correspondant au 19 février 2007 fixant les conditions et les modalités d'octroi de la concession d'utilisation et d'exploitation des eaux thermales.

- Décrets sur les eaux thermales et le thermalisme (Algérie) D'après le Journal officiel de la République Algérienne N° 13 (3 Safar 1428, 21 février 2007)

Art.2. - 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.

Art.7. - Les eaux thermales font l'objet d'une reconnaissance et sont soumises impérativement des analyses bactériologiques.

Art.8. - La reconnaissance des eaux thermales consiste en l'évaluation de l'importance de leurs ressources, l'identification de leurs caractéristiques et la détermination des propriétés thérapeutiques et des soins curatifs correspondants.

Art.10.-La reconnaissance d'une eau thermale, telle que définie à l'article 8 ci-dessus, est homologuée par arrêté du ministre chargé du thermalisme.

Art. 12. – Les eaux thermales doivent faire l’objet d’une surveillance continue des institutions compétentes comme favorable.

La surveillance des eaux thermales au sens du présent décret a pour objet le contrôle de leur stabilité et de leur qualité et peut s’étendre aux installations de leur captage. Leur adduction et aux moyens de leur transport. (**JOR, 2007**).

Tableau 1. Classification des eaux thermales (Moret, 1946)

Type d’émergence	Origine des eaux	Cause de la remontée	Origine de la température
<ul style="list-style-type: none"> - Diaclases - Faille - Filons - Contact sédimentaire - Plissement - Griffon diffus 	<ul style="list-style-type: none"> - Vadose - Juvénile - Mixte 	<ul style="list-style-type: none"> - Pression hydrostatique - Force expansive de la vapeur d’eau - Gaz en suspension - Différence de densité - Capillarité 	<ul style="list-style-type: none"> - Gradient géothermique - Volcanisme - Réaction physico-chimique et

I.12. L’hydrothermalisme

Le terme d’hydrothermalisme regroupe tous les phénomènes liant les circulations d’eau et leur réchauffement. Bien qu’il n’existe pas de définition précise, on peut considérer que ceci englobe trois thématiques principales de recherche : l’hydrothermalisme comme manifestation du magmatisme, la géothermie et enfin les sources thermales exploitées par les stations thermales.

Les études sur les phénomènes hydrothermaux au niveau des dorsales océaniques portent essentiellement sur les interactions fluides-roches au niveau des fumeurs noirs (**Paulicket al., 2006**) ou du plancher basaltique (**Bodeï et al., 2006**). Ces zones présentent aussi l’intérêt d’être le siège de l’apparition des premières formes de vie sur Terre (**Li et Kusky, 2007**).

Les manifestations hydrothermales sont également présentes dans les zones de magmatisme récent, au niveau des sites volcaniques (**Finizola, 2002, Federico et al. 2004**) avec les fumerolles

ou au niveau des intrusions plutoniques avec les soffioni. La figure I.1 montre un modèle de fonctionnement des systèmes thermaux en contexte de volcanisme actif (**Finizola, 2002 ; Bekkouche, 2009**). Dans ce type de contexte, les eaux vont lessiver les roches volcaniques et s'enrichir en gaz issus du magma. L'étude des manifestations hydrothermales en contexte volcanique permet, par exemple, de mettre en place des systèmes de surveillance des éruptions.

I.12.1 Les modes de fonctionnement des systèmes thermaux

Le fonctionnement de tous les systèmes thermaux est marqué par 3 étapes :

- Un transfert des eaux météoriques vers la profondeur.
- Un réchauffement des eaux.
- Une remontée rapide à la surface.

Blavoux considère que les eaux thermales sont majoritairement alimentées par les eaux météoriques et l'origine juvénile proposée par (**Moret, 1946**) peut donc être rejetée. Les sources thermales se différencient alors en fonction de deux critères : le mode de réchauffement des eaux et le moteur de la remontée des eaux vers la surface.

- **Le mode de réchauffement des eaux**

A partir d'environ 30 à 50 m de profondeur, la température augmente sous l'effet du flux géothermique interne. Le gradient géothermique dépend de la valeur du flux terrestre et de la conductivité des roches.

- **Le moteur de la remontée en surface**

La remontée rapide vers la surface se fera par l'intermédiaire de zones de forte perméabilité telles que des failles, diaclases, filons ou contacts sédimentaires. Le moteur de cette remontée peut être de trois types :

- **La pression hydrostatique** : une différence d'altitude entre la zone d'infiltration et la zone d'émergence va créer une différence de charge suffisante pour faire remonter les eaux vers la surface. On parle de système en U ou de siphon.
- **La présence de gaz dissous** : les eaux thermales peuvent contenir des gaz dissous. Ils proviennent soit d'émissions depuis les chambres magmatiques (CO_2 , H_2 , N_2) soit de phénomènes superficiels (comme la réduction des sulfates par les bactéries par exemple) libérant de l' H_2S ou du CO_2 . La présence de ces gaz dissous va accélérer la remontée vers la surface. En

effet, lorsque la pression diminue au moment de la remontée, les gaz dissous sont libérés sous forme libre et ceci provoque une diminution de densité du fluide alors constitué de deux phases : liquide et gazeuse (Valles, 2007).

- **La différence de densité de l'eau chaude** : la densité de l'eau diminue lorsque la température augmente. Ceci favorise aussi la remontée des eaux vers la surface mais constitue rarement une condition suffisante. La présence de ces gaz dissous va accélérer la remontée vers la surface. En effet, lorsque la pression diminue au moment de la remontée, les gaz dissous sont libérés sous forme libre et ceci provoque une diminution de densité du fluide alors constitué de deux phases : liquide et gazeuse (Valles, 2007).

I.12.2. Le thermosiphon

De l'eau de pluie à sa résurgence en eau thermale, l'eau vit un parcours complexe, souvent mystérieux : descendant dans les profondeurs de la terre entre les couches géologiques, atteignant des températures élevées, circulant entre les calcaires et les granites... se frayant un chemin le long des failles... pour remonter vers la surface chargée de tous les minéraux qu'elle a rencontrés au fur et à mesure de son long voyage.

Le schéma classique du circuit hydrothermal présente la structure suivante : Une aire d'alimentation avec infiltration d'eau météorique Un réseau d'infiltration ou colonne d'infiltration, vaste en volume mais à vitesse d'écoulement très lente dans lequel l'eau se minéralise ; Un axe vertical de collecte agissant en drain et permettant l'arrivée rapide en surface de l'eau ; au cours de cette remontée l'eau thermale conserve pour l'essentiel la température et la composition chimique acquise en profondeur

Le thermosiphon est constitué d'un circuit. La zone d'alimentation peut être située en altitude. A ce niveau une partie de l'eau de surface s'infiltré à la faveur d'un réseau de failles. L'eau froide et dense circule vers la profondeur où elle gagne des couches chaudes. Elle se charge en élément dissous par interaction avec les roches encaissantes, et se charge parfois en gaz. Les hautes températures accélèrent la cinétique de l'interaction eau roche (Moret, 1946, Le Maréchal 1976).

Les eaux arrivent en surface au niveau d'un nœud tectonique (**Figure1**), formé par l'intersection de failles profondes, puisqu'elles servent à la remontée de fluides d'origine profonde, et d'une ligne de dépression topographique, car c'est évidemment là que l'eau a plus de facilité pour s'écouler (**Durozoy 1948, Villa 1977**). L'eau chaude et donc moins dense remonte vers la surface en empruntant une faille. La différence de densité entre l'eau froide et l'eau chaude, la présence de gaz qui diminue la densité apparente à partir du point de bulle, sont autant de phénomènes qui facilitent la circulation de l'eau (**Le De Launay, 1899**). Le tronçon ascendant traverse à nouveau le remplissage alluvionnaire où l'eau pourra plus ou moins se disperser latéralement, en sources diffuses, et apparaître dans plusieurs sources. Le temps de transfert dans le circuit du thermosiphon peut être relativement long et se chiffre en dizaines de milliers d'années (**Blavoux, 1995**).

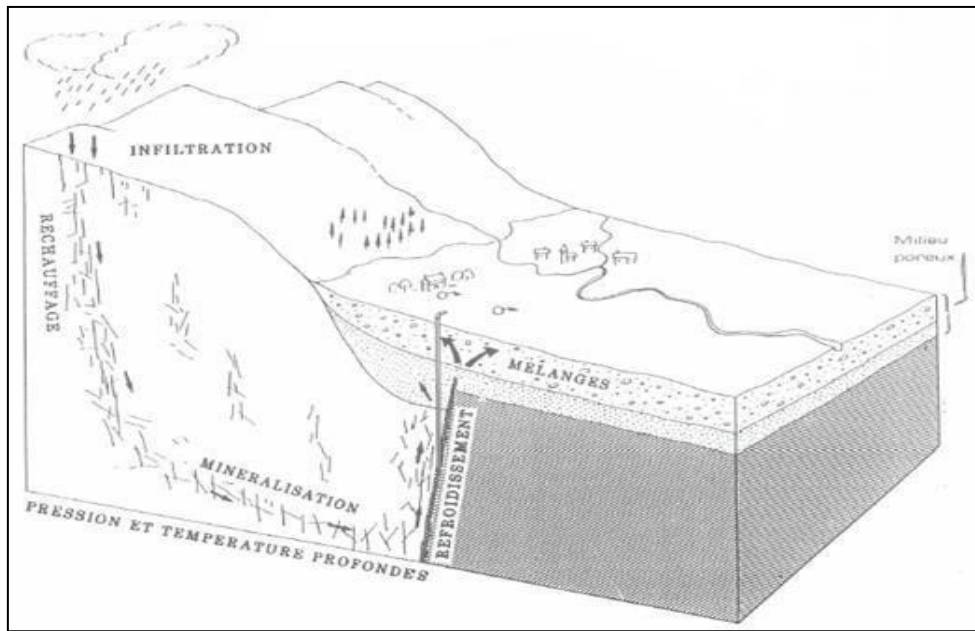


Figure 4. Schéma de la circulation des eaux thermales Thermosiphon (Moret, 1946)

I.13. Le gradient géothermique

Qui représente nombre de degré d'augmentations de la température pour 100 m de profondeur. Il est fonction du flux de chaleur terrestre et de la conductibilité des roches. 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 Dib 2008, 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. La région de Guelma est sans doute une zone prometteuse sur le plan de l'énergie géo thermique. (Dib, 2008).

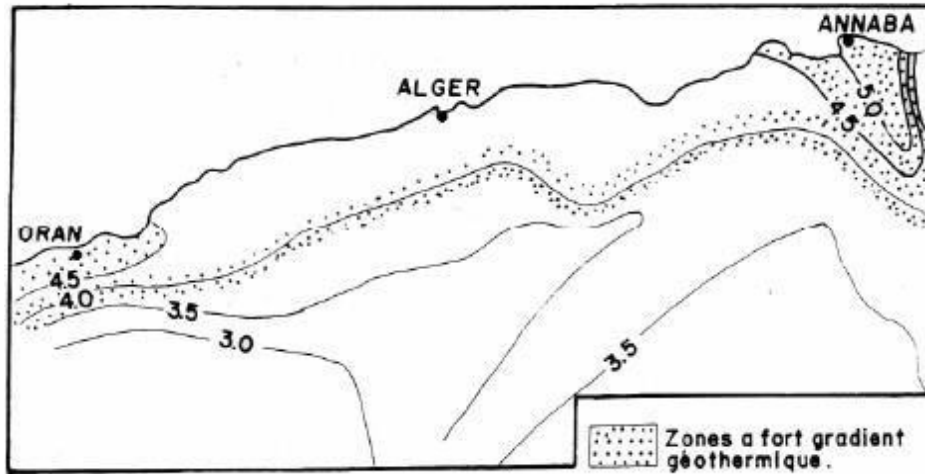


Figure 5: Carte du gradient géothermique de l'Algérie du Nord (N. KaziTani, 1974)

I.14. La Géothermie

La géothermie est une source d'énergie renouvelable. Elle est produite constamment à l'intérieur de la terre. Cette énergie définit des techniques qui permettent de récupérer la chaleur à différentes profondeurs et températures. Tout ceci conduit à un apport continu d'énergie thermique vers l'extérieur. Cette énergie provient de la chaleur générée par la désintégration radioactive dans les roches qui composent la Terre à partir d'atomes fissiles (uranium, thorium et potassium) avec 90% et 10% de la chaleur de la formation originelle de la planète. (Dib, 2008 ; Houha, 2007).

1.14.1 - Les différents types d'énergies géothermales

- **La géothermie de faible profondeur (30 à 400 mètres) :** En général à une profondeur située entre 120 et 150 mètres. A cette profondeur, la température du sol est comprise en 12° et 15°.
- **La géothermie profonde (dès 400 mètres de profondeur) :** Sur le Plateau suisse, la température de l'eau entre 1 et 4 kilomètres de profondeur atteint entre 40° et 130°.
- **La géothermie de grande profondeur (de 4000 à 6000 mètres) :** Entre 4000 et 6000 mètres, la température de la roche peut atteindre vers les 200°.

CHAPITRE II
PRESENTATION
GENERALE DE LA
ZONE D'ETUDE

II.1. Cadre géographique

La wilaya de Khenchela est située Nord-est de l'Algérie, avec une superficie totale de **9 715** Km² Elle est délimitée par :

- Au nord, par la wilaya d'Oum El Bouaghi ;
- Au sud, par la wilaya d'El Oued ;
- À l'ouest, par les wilayas de Batna et de Biskra ;
- À l'est, par la wilaya de Tébessa.

La ville de Khenchela est construite au pied des contreforts du massif de l'Aurès, elle est dominée à l'ouest par le mont Ras Sardhoun à 1263 mètres. À l'est, elle est bordée par l'Oued Baghaï. (CENAP, 2002, Chebbah, 2004).

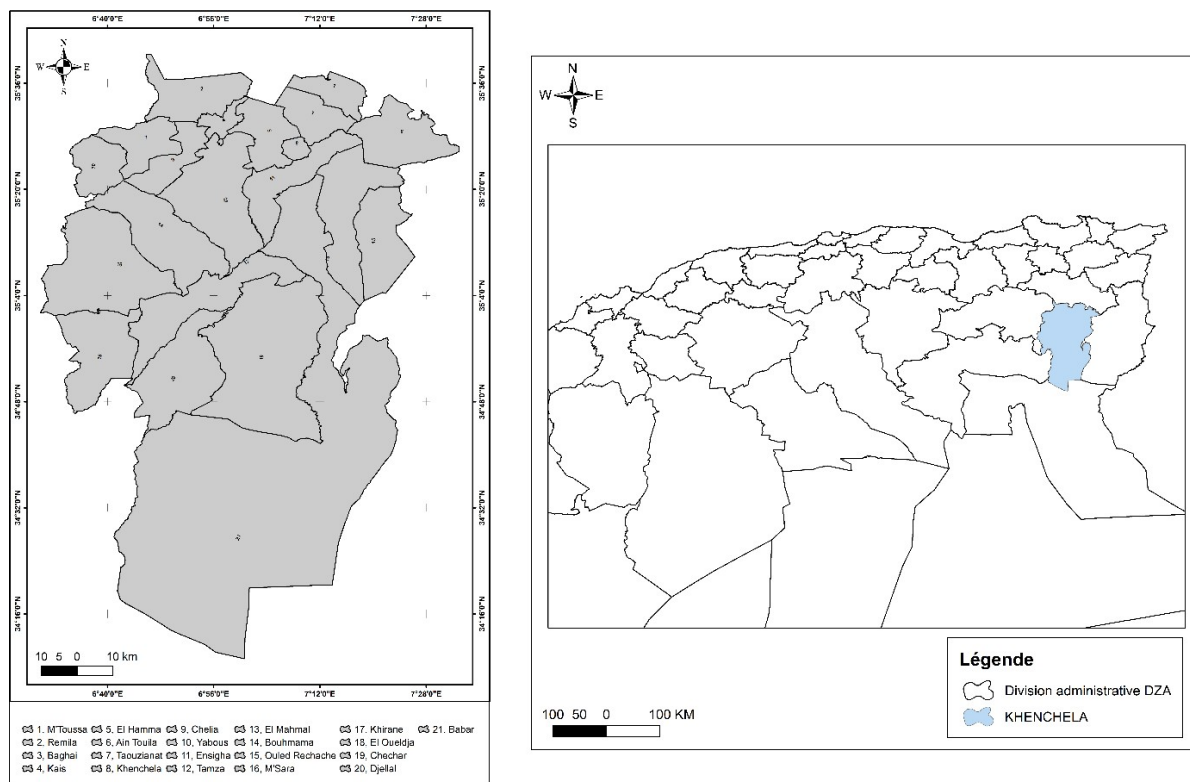


Figure 6. Découpage administratif de Khenchela (Boukhalefa et al., 2023)

La partie des Aurès se distingue par trois zones géographiques alliant entre : - Paysages Telliens : zones de haute montagne bien arrosées et bien boisées, localisées dans la région Ouest, il s'agit d'une partie orientale des Monts des Aurès - Paysages des Hautes plateaux : localisés dans

la partie Nord de la zone d'étude, il s'agit des hautes plaines céréalières semi-arides. - Paysages Steppiques : ils sont caractérisés par la prédominance de l'activité pastorale, il s'agit des monts totalement dénudés et érodés localisés sur des monts des Némemcha à l'est. -Paysages Présaharien : localisées dans la région Sud, il s'agit des oasis (Siar, Khirane, EL Ouldja), des piémonts de l'Atlas Saharien, et les basses plaines d'El Meita et Ouazerne. Elle est caractérisée par sa vocation agro-sylvo-pastorale où la superficie agricole représente 23%, les forêts représentent 8%, et la steppe représente 22%.

II.2. Cadre géologique

II.2.1. Tectonique régionale

Il présente un style tectonique souple essentiellement constitué de plis vastes assez réguliers. Cependant, il faut remarquer qu'il existe, dans divers points du massif, des étranglements ou des dilatations brusques des plis. Ce phénomène significatif de certaines anomalies, traduit au niveau de la couverture post-triasique des rejeux d'accidents profonds L'architecture actuelle des plis est engendrée par un certain nombre de facteurs (**Chadim, 2004**) :

La disharmonie.

Les rejeux successifs d'accidents cassants.

La superposition des phases tectoniques (souples).

La position du panneau de socle sous-jacents.

La nature du matériel mis en œuvre.

Les structures anticlinales présentent plusieurs formes

Anticlinaux à flancs pentes fortes mais non verticaux. * Anticlinaux coffrés- Anticlinaux semi coffrés.

Anticlinaux à déversement sur un seul flanc.

II.2.1.1. La série stratigraphique

- **Trias**

La période triasique se présente sous la forme d'affleurements triasiques qui se distinguent par le sel. Ces affleurements isolent la période miocène de la période crétacée, suivant une étendue de 4 à 5 km de long et de 300 à 2400 m de large.

- **Jurassique**

Les roches des formations jurassiques de l'Uras sont caractérisées par la présence de carbonates entre les roches tonétiques et calcaires, les argiles siliceuses et Labichi, elles sont également caractérisées par la présence d'intersections allant du Maroc au jaune et au rouge.

a- Lias : shisttarder contente parfois des ammonites pyrite.

b-Dogger : calcaires et de marne avec des gypses.

C-Malm: alternance des calcaires noduleux et des marines.

- **Crétacé**

a-Canpanien : Marnes noires Interrallations des calcaires Ocre légèrement phosphatés Le santonien : Marnes gris bleu et calcaires Le comité Alternance de marines gris et de Manon calcaires.

C- Le turonien moyen et supérieur : Alternance de marines beiges et de calcaires zoageme noduleux

d-Turonien basal : Marno_ calcaires Alternance de marnes bleues.

e- Le cénomanien supérieur : Calcaires marneux gris bleu à assurer noirâtre.

f-Cénomaniens moyens : De marines gris avec de petites intercalations calcaires.

- **Miocène**

a-Lettonien supérieur De argilesilteuses beiges et rouges et de gris L'ensemble argilo gréseux épouse de 300 a 400 m

b- Le tortonien : grée senx Blanc et grossier

c- Lemiocene1 (Aquitano-burdigalien) : formation rouges azoïques, discordant sur les dépôts antérieurs, conglomérats grés argiles rouges, marnes rouges grises ou vertes et calcaires noires dolomitique ou bréchoides.

Le miocene 2 (Burdigalien) : lesmêmes facies de miocene2 avec les marnes sableuses et grés jaunâtres a verdâtres.

Le miocene3 ; langien-tortonien : calcaires ou des grés

Le miocene : messinien : marnes gréseuses brun rouge gypse blancs.

- **Quaternaire**

Recouvert majeure partie de la palaine de touffane La sédimentation est en majeure partie argileuseet marnent avec une proportion importante de gypses.

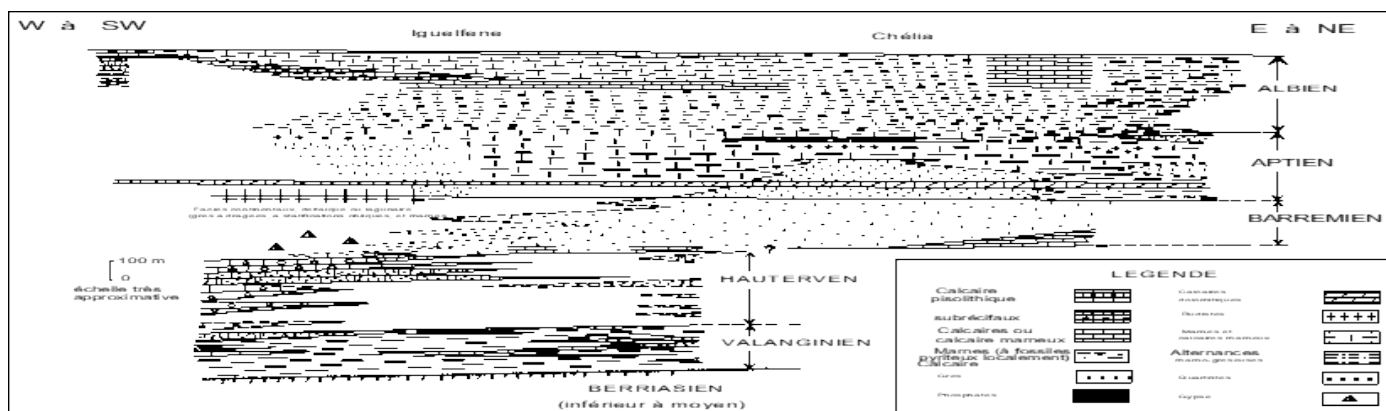


Figure 7. Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de L'Aurès (Laffitte, 1939 ; modifié par Guiraud, 1973 In Houha, 2007)

II.3. Les sources thermales de Khenchela

✓ Hammam Essalihine

Est situé au sud du bassin de Rémila, à 7 Km de Khenchela, au pied mont de Djebel Aidel. Il couvre l'aire limitée géographiquement par les latitudes 35°26' 32.78" N et 7°05 00.85 " E de longitude. L'altitude de zone varie de 1063 m dans le vallon du site thermal de Hammam Essalihine à 1650 m à la hauteur de Ras Serdoun, et culmine à 1870m au djebel Feraoun où la pluviométrie est voisine de 1000 mm. Ce site thermal est constitué de trois sources. L'étude des caractéristiques des eaux thermales est souvent destinée à préciser les Variations potentielles de leur qualité et de leurs origines dans une région donnée.

Dans le site de Hammam Essalihine, il existe trois sources thermales (Griffons) 1, 2 et 3 qui occupent le piémont du versant nord de djebel Aidel, dans un vallon.

Ces sources seraient en rapport avec le réseau hydrographique local car les émergences, se trouvent à leurs points bas, c'est-à-dire dans un graben, au fond d'un vallon, ou les eaux sont drainées par oued Kissen. (Chadi, 2004).

Les deux griffons sont aménagés pour faciliter leur captage et sont protégés par un périmètre immédiat et rapproché afin d'éviter toutes sources de pollution et d'éventuels accidents mortelles. Le débit des sources (griffons) est estimé à 50l/s (180m³/h), avec des températures variant de 40 à 60°C. Elles sont classées dans la catégorie des eaux hyperthermales.

CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Il semblerait que les trois sources soient alimentées par des eaux météoriques, récoltées sur tout l'impluvium du vallon pour s'infiltrer profondément et remonter le long des filons hydrothermaux par différence de pression et de densité et réapparaître sous forme d'émergences en sources thermales.

La station est facilement accessible grâce à deux chemins de wilaya ; trois sources thermales (griffons) alimentent Hammam Essalihine avec différentes températures à l'émergences dont la plus élevée est de 70°C.

L'eau de cette source est efficace contre les affections dermatologiques (eczéma, kératose, psoriasis...). Elles sont aussi efficaces pour l'augmentation de flux sanguin et comme effet analgésique et anti inflammatoire ; indiquée aussi pour les affections de l'appareil locomoteur tel que les contractures musculaires.

✓ Hammam El Kenif

A environ 19 km du chef-lieu de la wilaya de Khenchela (11,5 km à vol d'oiseau) (figure 8), Les suivante. (Mekhachefi et al., 2021)

Tableau 2. Coordonnées des principales composantes Hammam El-Kenif (Belmekki, 2013)

Source	Coordonnées		Altitude
Forage	35°29'17,57 N	7°15'08.31" E	1015m
Château d'eau	35°39'18 63 N	7°15'12.08" E	1023m
Vaporeux	35°29'11,55" N	7°15'16,02" E	1057m

✓ Hammam Djaarir

Cette source existe dans la commune de Bouhmama à 35° 16' 45" et 6° 47' 23" et une altitude de 1102, sous forme d'un seul griffon, non aménagée. (Berkani et al., 2016)



Figure 8. Présentation des trois sources d'eau thermale par google earth, 29/01/2024

II.4. Cadre socio-économique

La région de Khenchela a été depuis toujours une zone à vocation agro-sylvo-pastorale l'activité principale au niveau de la région demeure l'agriculture avec une superficie de 231 768 ha. Les terres à haute valeurs agricole sont de 39 000 ha, les terres improductives sont de 150 155 ha (terres improductives 78 900 ha, terres urbanisés 7 236 ha).

Le secteur de l'industrie est faiblement représenté dans la wilaya. Il se constitue de deux unités de production de secteur public et trente et un de la petite et moyenne entreprise privée. La population de la wilaya a évolué au rythme de la croissance nationale, avec une population estimée à 384 268 habitants en 2008, dont 30% en milieu rurale. **(Bouafia, 2015)**

II.5. Industrielle et l'agriculture

Pour l'industrie le secteur est faiblement représenté et les entreprises publiques sont quasiment inexistantes, le recensement fait état de 04 entreprises publiques dont 02 seulement en activité et 30 unités privées dont 16 en activité avec 766 emplois.

Le secteur de l'agriculture est considéré comme étant la principale activité économique de la wilaya. la superficie agricole utile représente 232.395 has soit 24.10% de la superficie agricole totale de la wilaya, la superficie irriguée est de 196.104 , l'arboriculture est prédominante se propage au niveau de la zone des Hauts- plateaux et des plaines, la production arboricole connaît

Une nette évolution due au programme de reconversion de la céréaliculture en arboriculture fruitière.

Le potentiel de développement dans ce secteur se situe dans :

L'élevage ovin et bovin.

Les petits élevages.

L'aliment de bétail.

L'arboriculture.

Les pépinières agricoles. **(Bouafia, 2015)**

II.6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la zone est de type endoréique, il est assez dense sur la quasi-totalité du territoire.

L'aire urbaine de Khenchela est traversée du Nord-est au Sud-est par l'oued Baghai. La commune d'El Hamma est drainée du Nord au Sud par l'oued El Hammam.

La commune de Baghai est traversée par plusieurs oueds parmi lesquels nous citons oued Aimer au Nord-est et oued Baghai au Nord-ouest. La commune d'Ensigna est drainée par plusieurs oueds, dont les plus importants sont oued Aimer au Nord-est, oued Mahdi et oued Djemri au centre et oued Bou Madjeur au Sud. Enfin, Oued Zoni au Nord-est, oued Oullal et oued Fournis au Sud traversent la commune d'El Mahmel.

Les ressources en eau de l'aire d'étude proviennent, essentiellement, des eaux souterraines, à l'exception de la commune de Baghai qui dispose aussi d'un potentiel en eaux superficielles destiné à l'irrigation. **(CENEAP, 2009)**

Les eaux de hammam Essalihine sont drainées par oued Elkissen, d'une longueur de 6 km, et qui prend naissance sur les hauteurs de dj ; Aurès et longe les hautes plaines de Rémila pour se terminer dans Chott Ezzahar.

Oued El-Hamma : Ce dernier prend naissance à partir du Djebel Ras Serdoun (1700m), il est alimenté par les sources thermales du hammam Salihin, et par des affluents qui fonctionnent principalement à la suite de fortes précipitations, et la couverture neigeuse, tout le potentiel de ce oued va alimenter les chotts environnants surtout le chott du Garat- Tarf **(Bouafia, 2015)**.

II.7. Végétation et activité humaine

Les zones forestières occupent les reliefs montagneux des communes de la zone. La commune d'El Hama est dotée d'une zone forestière assez dense dans laquelle se trouve la forêt de Tarbat, qui est considérée comme l'une des plus grandes forêts de la zone, ainsi que la forêt de Ras Serdoune située à l'Est et qui s'étend dans la commune de Khenchela, limitant ainsi la ville à l'Ouest (**Khabthane, 2015**).

On trouve au niveau des montagnes entourant la station thermale, culmination de 1200 à 1900 mètres pour Kafa malal (mont blanc), une association végétale liée au Cèdres : les Chênes-verts, les houx, les Genévriers, les Chèvrefeuilles, les Lauriers-tins, les Garons, etc.

Les Cistes et les Cytises se massent autour des arbousiers, Myrtes, Genévriers romains et lentisques. Il existe toutefois plusieurs types de maquis selon les types des sols, l'altitude et même la dominance d'une plante particulière, par exemple les cistes.

Dans les zones ou les maquis, elle est encore soumise aux activités de l'homme qui l'exploite, surtout pour le bois (souvent convertible en charbon de bois) comme le cas des familles des charbonniers Hoggas, Ouled Yaagoub, mais aussi pour les colorants, le mastic ou d'autres produits qu'ils extraient des plantes (**DPAT W. Khenchela, 2012**).

La population est concentrée au niveau des communes et des mechtas. L'agriculture, le pâturage et l'exploitation forestière sont les activités traditionnelles de la région.

L'industrie est quasi absente, on en trouve celle du bios, des minoteries, et des unités de collecte et transformation de lait. (**CENEAP, 2009**)

La station est un lieu de villégiature, sa composition chimique lui confère des propriétés thérapeutiques indiquées pour les maladies rhumatismales, respiratoires et dermatologiques. Elle enregistre jusqu'à 700.000 visiteurs. Cette station est composée par deux piscines romaines pour hommes, deux piscines ouvertes pour femmes et 40 cabines pour bain thermal.

Et grâce à la situation de station dans une région forestière avec un climat particulier le site est un lieu de prédilection pour les nombreux touristes. (**Berkani, 2016**)

II.8. L'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 Chélia) sur les monts des Aurès au nord-ouest de la wilaya.

Globalement, on relève cinq domaines à altitudes différenciées :

- Le domaine montagneux des Aurès, au Nord-Ouest, qui se distingue par ses altitudes très élevées, où l'on dénombre de nombreux sommets dépassant les 1500 m : Djebel Chélia (2169 m) ; successions de monts atteignant 1623 à 2113 m sur la chaîne montagneuse du Djebel Tafrent ; Djebel Fourhal (1698 m, etc...)
- Le domaine montagneux des Nemenchas, à l'est, dont l'altitude oscille entre 600 et 1400 m, avec toutefois quelques sommets avoisinant les 1600 m (versant nord d'El Outa Guert). Les monts des Nemenchas se distinguent par leur dénivellation qui s'abaisse brutalement du nord au sud.
- Le domaine des hautes plaines au nord, dont l'altitude oscille généralement entre 800 et 1000m.
- Le domaine des piémonts des Némemchas, dont l'altitude oscille entre 200 et 600 m.
- Le domaine des basses plaines sahariennes, dont l'altitude se situe entre moins 26 mètres (bordure de Chott Melghir) et 200 mètres (piémonts des Nemenchas).

Afin de mieux caractériser cette composante du relief, une carte des classes de d'altitudes a été dressée pour le territoire de la wilaya, sur la base de la grille utilisée par le ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme (MATET) pour le classement des zones de montagnes. Cette grille, préconise 04 classes d'altitudes, définies comme suit :

Les zones de piémonts et contiguës : classe comprise entre 0 et 400 mètres ;

Les zones de moyenne montagne, étage inférieur : classe comprise entre 400 et 800 mètres;

Les zones de moyenne montagne, étage supérieur : classe comprise entre 800 et 1200 mètres

Les zones de haute montagne : classe supérieure à 1200 mètres.

La répartition générale des classes d'altitude en fonction de la superficie est comme suit
(Anonyme, 2008) :

- La classe d'altitude comprise entre 0 et 400 mètres. Cette classe, qui correspond la zone sud de la wilaya (plaine saharienne), occupe une superficie totale de 363 600 ha, soit 37,95 % de la superficie totale de la wilaya.

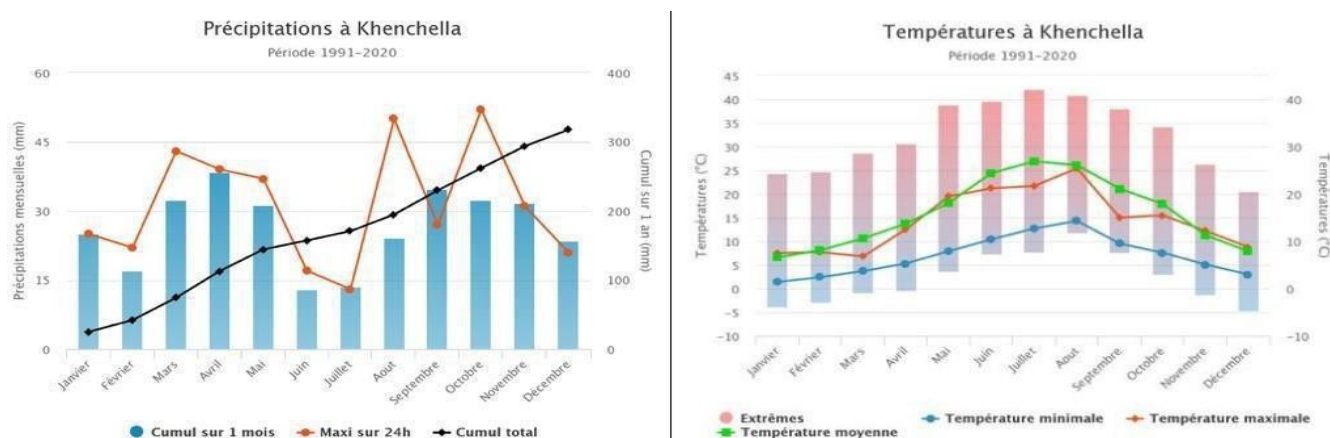
CHAPITRE II. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

- La classe d'altitude comprise entre 400 et 800 mètres. Cette classe, qui correspond à la zone de piémonts des Néménchas, occupe une superficie totale de 183 131 ha, soit 19,13 % de la superficie totale de la wilaya.
- La classe d'altitude comprise entre 800 et 1200 mètres. Cette classe, qui correspond en majorité à zone des hautes plaines, occupe une superficie totale de 352 601 ha, soit 36,83 % de la superficie totale de la wilaya.
- La classe d'altitude supérieure à 1200 mètres.

Cette classe correspond aux zones de haute montagne des Aurès et Néménchas, elle occupe une superficie totale de 58 218 ha, soit 6,08 % de la superficie totale de la wilaya.

II.9. Le climat

De par sa situation géographique et l'hétérogénéité du relief, la région présente des caractéristiques climatiques transitoires, allant d'un climat semi-aride sur les hautes terres au nord, continental sur la région montagneuse au centre et désertique aride au sud. Les températures annuelles varient de 45°C le jour à -5°C la nuit. (Chenaker, 2022)



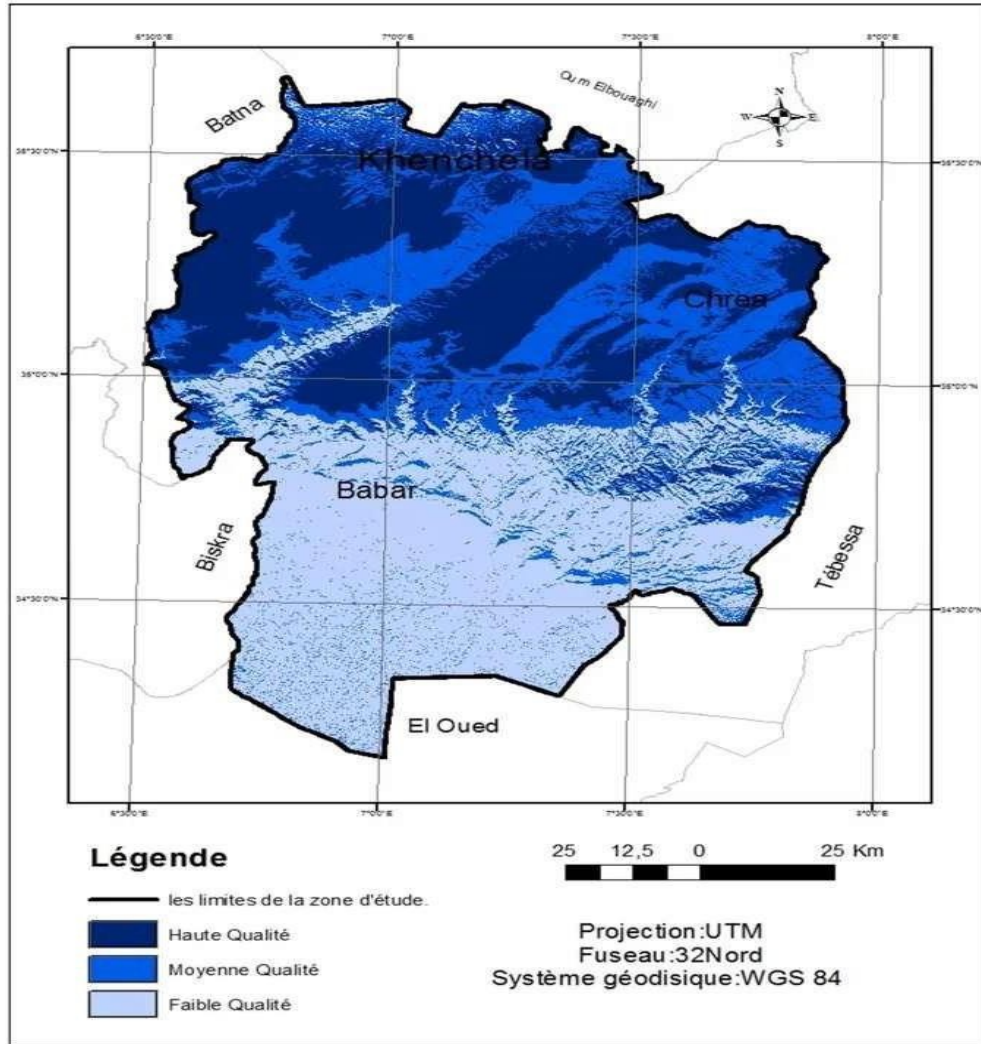


Figure 10. Carte critère du climat (Bouzekri, 2015)

PARTIE
EXPERIMENTALE

CHAPITRE III
CARACTERISATION
HYDROGEOCHIMIQ
UE DES EAUX
THERMOMINERALE
S DE LA REGION DE
KHENCHELA

Introduction

Ce travail apporte une caractérisation hydrochimique de trois sources d'eau thermominérales dans la région de Khenchela, Hammam Essalihine, Hammam El Kenif et Hammam Djaarir. Pendant Janvier 2024, des campagnes de reconnaissance et d'échantillonnage des points d'eau ont été régulièrement effectuées dans cette région, par une série de mesures et de suivis de terrain pour le traçage chimique.

Dans ce chapitre, on a procédé au traitement et à l'interprétation des résultats des mesures physiques et des analyses chimiques pour une meilleure distinction et caractérisation des eaux thermominérales de la région de Khenchela.

Nous avons essayé par approches pour discriminer les facteurs responsables de l'acquisition de la minéralisation des eaux. Des outils, chimiques sont utilisés pour expliquer les différents mécanismes responsables de l'acquisition de la minéralisation des eaux.

III.1. Prélèvements et Représentativité de l'échantillonnage

La représentativité de l'eau échantillonnée est un problème majeur en hydrogéologie. En effet, il peut intervenir lors du prélèvement des échantillons ou des mesures in situ, des processus de dégazage ou d'absorption de CO₂, entraînant ainsi des modifications conséquentes des équilibres physico-chimiques. On peut aussi envisager la contamination des échantillons par la poussière atmosphérique, les branchages ou autres éléments susceptibles de les altérer (BRGM, 2002, Abba, 2006).

Pour les analyses à réaliser au laboratoire à l'aide du chromatographe ionique (cations et anions), les échantillons d'eau ont été collectés dans des flacons en polyéthylène propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à échantillonner, puis fermés hermétiquement avant d'être conservés au frigidaire, à 4°C. (Favreau, 2000 ; Rodier, 1984).

Les propriétés physico-chimiques (température, conductivité électrique, pH, minéralisation) ont été effectuée *in-situ* avec du matériel usuel (analyseur multi paramètre de type YSI (Pro DSS). Les ions majeurs, anions et cations ont été mesurés et dosés au niveau du laboratoire pédagogique de l'université de Khenchela et au niveau de laboratoire de l'algérienne des eaux (ADE).



Figure 11. Prélèvement des échantillons, Janvier 2024

III.2. Résultats et discussion

III.2.1. Les paramètres physiques

➤ La température

La température de l'eau est influencée par la température de l'air, elle joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz (Afnor, 1997). La température des sources thermales présente un minimum de 33 °C et un maximum de 65°C et une moyenne de 49°C. Ce déséquilibre thermique entre l'atmosphère et l'aquifère indique que les eaux ont une origine très profonde. Elles sont influencées par le gradient géothermique d'une part, l'activité sismique, la désintégration radioactive et les réactions chimiques endogènes productrices d'énergie d'autre part. Notons aussi que les frictions entre les couches géologiques lors de l'activité sismique produisent de la chaleur qui fait chauffer l'eau des aquifères. (Dib, 2008 ;Berkani, 2016).

Tableau 3. Température à l'émergence et la conductivité électrique des 3 échantillons

Source	T (°C) à L'émergence	CE (25°C)	Classification
Hamam Essalihine	52	4120	Eau hyperthermale
Hamam El Kenif	47	3822	Eau mésothermale
Hamam Djaarir	33	2031	Eau mésothermale

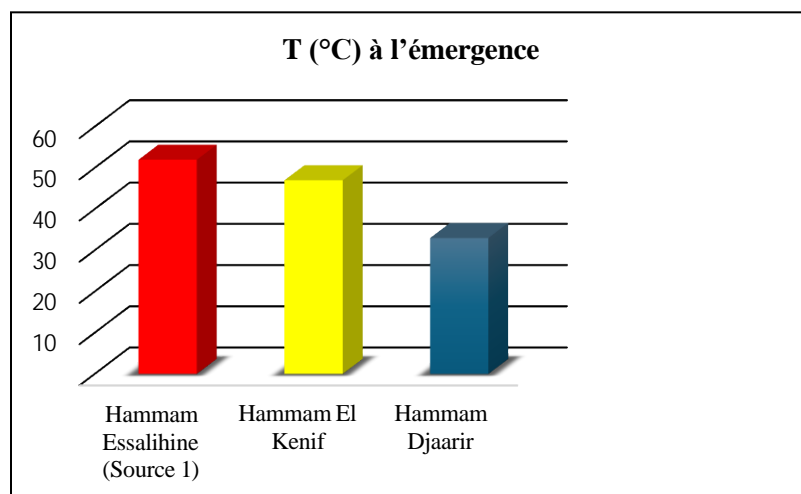


Figure 12. Représentation graphique comparative en histogramme de la température des sources

➤ Le pH

Le pH est déterminé par la teneur en acide carbonique libre. Il peut cependant aussi être influencé par l'utilisation du sol (utilisation d'engrais ammoniacés) ou par des processus naturels (échanges de matières entre les plantes et le sol, formation d'acides humiques au cours de la dégradation de matière organique, etc.) (Rodier, 1984 ; Chapman et al., 1996 ; Chabour, 1997). Le multiparamètres n'a pas mesuré correctement les valeurs du pH, donc nous avons utilisé des valeurs mesurées précédemment (Hani et al ; 2021). S'inscrit dans la gamme 7,05 à 7,7

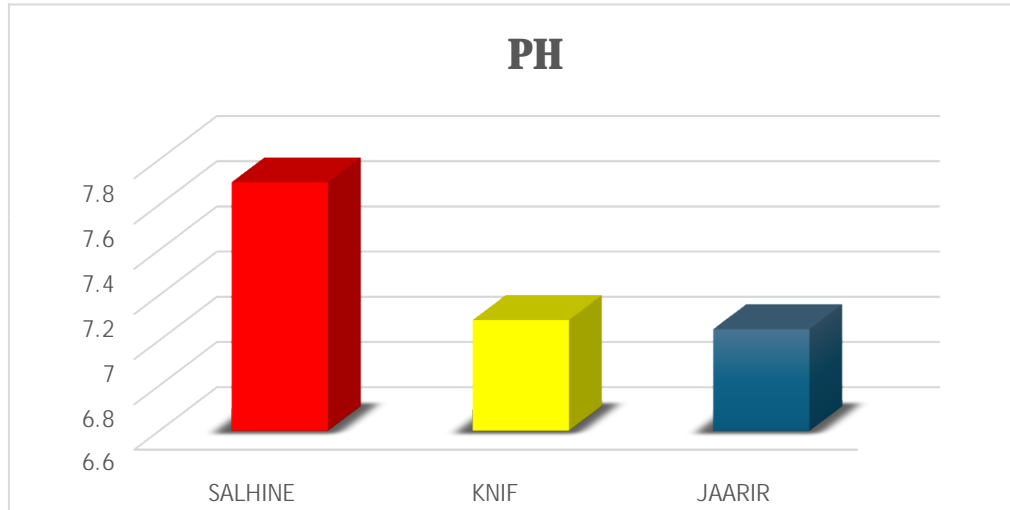


Figure 13. Représentation graphique comparative en histogramme du pH

➤ La conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure du contenu de l'eau en substance dissoute ions et électrolytes. Une variation de la conductivité électrique peut avoir une cause aussi bien anthropique (pollution de l'eau) que naturelle (dilution par les eaux météoriques, infiltration d'eau de surface peu minéralisée) (Rodier, 1984 ; Bakhouch, 2016).

Les valeurs mesurées de la conductivité électrique indiquent une minéralisation élevée. Elles sont toutes globalement supérieures à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cela traduit la grande solubilité des sels à des grandes températures. Ces valeurs indiquent que les eaux thermales de la zone d'étude sont minéralisées et auraient traversé les terrains triasiques gypso-salifères et sont liées à la grande solubilité des sels (NaCl , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4 et Na_2SO_4) (Bouaicha, 2018).

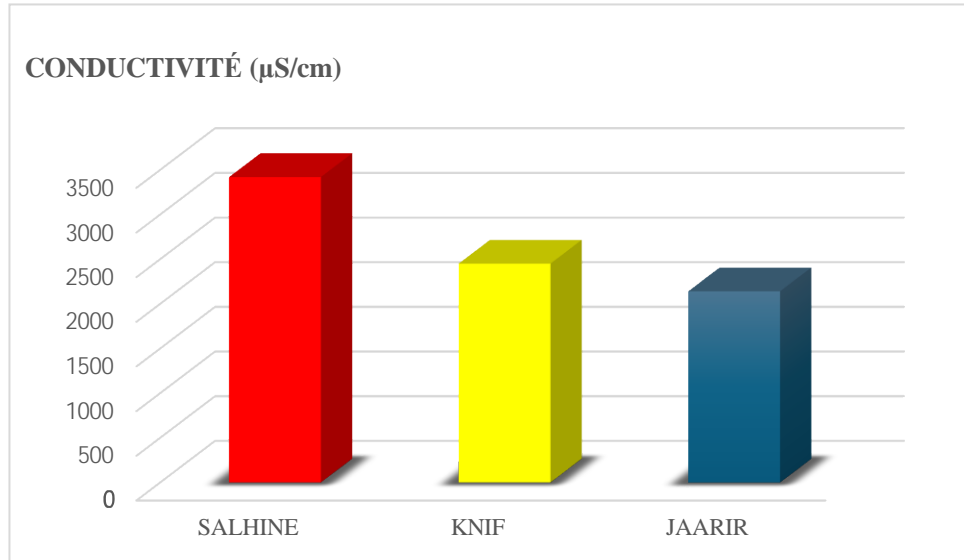


Figure 14. Représentation graphique comparative en histogramme de la conductivité électrique

III.2.2. Les paramètres chimiques

Les éléments chimiques dits majeurs correspondent aux anions et cations qui constituent de façon prépondérante la minéralisation des eaux.



Figure 15. Réalisation des analyses chimiques, janvier 2024

Les résultats des analyses chimiques en éléments majeurs effectuées sur les échantillons prélevés de la zone d'étude sont représentés par les histogrammes suivants :

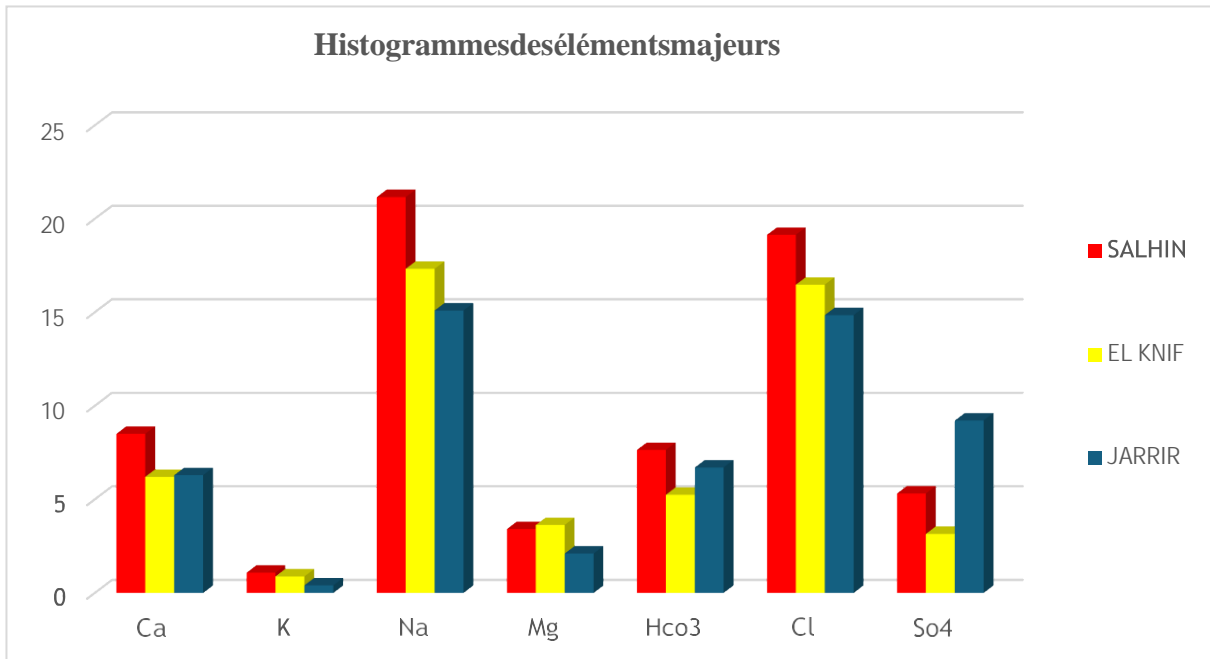


Figure 16. Représentation graphique en histogramme des éléments majeurs

L'étude analytique des paramètres chimiques sur les échantillons prélevés de la zone d'étude, montre des valeurs différentes d'éléments dosés d'un point à un autre, nous avons remarqué que : l'anion Cl^- est prédominant sur les ions HCO_3^- et SO_4^{2-} et les cations Na^{+2} sont prédominants sur les ions K^+ , Mg^{+2} et Ca^+ .

III.2.2.1. Origine des sels minéraux

a. Les cations :

❖ Calcium Ca^{+2}

La présence des ions Ca^{+2} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : Soit la dissolution des formations carbonatées ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{CO}_3^{-2}$) Soit la dissolution des formations gypseuses $\text{CaSO}_4 + 2(\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{+2} + 2(\text{H}_2\text{O})$ (Chebbah, 2004 ; Berkani, 2023).

Une teneur faible en calcium fait penser à un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables. Par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite.

❖ **Le magnésium Mg^{+2}**

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, magnésite : $MgCO_3 \rightarrow Mg^{+2} + CO_3^{-2}$

Quand la dolomie est attaquée, il n'y a pas de solubilité sélective, il y a autant de calcium que de magnésium. Si toutefois la quantité du calcium dépasse celle du magnésium, l'eau aurait obtenu sa minéralisation du calcaire. Par contre une teneur élevée en magnésium peut faire penser à une contamination d'eau de mer ou du lessivage des minéraux magnésiens.

On pense ici que les apports en magnésium proviennent de la dissolution des formations évaporitiques, ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des Formations carbonatées et les formations gypseuses. (Chebbah, 2004 ; Berkani, 2023).

❖ **Le sodium Na^+**

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La plus importante source de sodium se trouve dans les évaporites.

L'existence d'inclusion évaporitiques sous forme de roches salines riches en NaCl et $CaSO_4$ et Na_2SO_4 (Halite, gypse et mirabilites peut être aussi à l'origine de cet élément.

Ces concentrations témoignent d'un apport salifère à partir des formations évaporitiques liées aux Sebkhass qui se trouvent près de la région de Khenchela, d'ailleurs ces points présentent les valeurs les plus élevées au l'est de l'Algérie. (Chebbah, 2004 ; Berkani, 2023).

❖ **Le potassium K^+**

Le potassium provient de l'altération des formations silicatées, des argiles potassiques. En général le potassium dépasse rarement les **10 ou 20 mg/l** dans les eaux thermales.

b. Les anions

❖ **Les chlorures Cl^-**

L'origine de cet élément est comme pour le cas du sodium, liée principalement à la dissolution des formations salifères. Les évaporites constituent la source principale de cet élément.

L'effet de la salinité marine, les bassins endoréiques (Chotts, Sebkhas), les eaux fossiles ou cannées, le salage des routes et l'adoucissement des eaux par les résines peuvent aussi être à l'origine de cet élément. Généralement les eaux riches en chlore sont riches en sodium parfois le calcium remplace le sodium. (Houha, 2007).

Les de Cl^- teneurs présentent des valeurs importantes par rapport à celle du sodium, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile.

Ces concentrations indiquent l'existence d'apports salifères à partir des formations évaporitiques liées à la Sebkhah se trouvant près de ces régions.

❖ Les sulfates SO_4^{2-}

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses, à la dégradation de la matière organique dans le sol (Vieville, 1983) ainsi qu'à l'apport anthropique (origine agricole). Donc la présence des sulfates est beaucoup plus liée aux formations gypseuses. (Bouziane et al., 2009 ; Chebbah, 2004).

❖ Les bicarbonates HCO_3^-

Les bicarbonates résultent de la dissolution des roches calcaires ou d'émanation du magma profond, l'apport atmosphérique de cet élément est négligeable.

III.2.2.2. Le faciès chimique des eaux

Le diagramme de Piper présente les minéraux (Anions et Cations) les plus abondants dans l'eau. Donc il renseigne sur la tendance minéralogique. Le diagramme de Piper est composé de deux triangles équilatéraux à la base (un pour les anions et l'autre est destiné aux cations), avec un losange au milieu. Les côtés des triangles sont divisés en 100 parties égales. Chaque élément est représenté sur le triangle par rapport à ses paires de même nature. La projection des points sur le losange par deux droites menées depuis les triangles correspond au faciès chimique. Cette représentation graphique est utilisée pour déterminer le faciès chimique des eaux et suivre ses variations dans l'espace et dans le temps. Il permet également de voir l'évolution d'une eau, passant d'un faciès à un autre, grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses d'échantillons pris à des endroits différents. Le diagramme de Piper est très utile pour représenter toutes autres

sortes de groupes d'analyses. Le faciès chimique des eaux a été déterminé classiquement à l'aide du diagramme de Piper, en ayant recours au logiciel Diagramme du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2007).

Les données des ions majeurs, reportées sur le diagramme de Piper ont permis de mettre en évidence un faciès sulfaté calcique à chloruré sodique. (Fig17.),

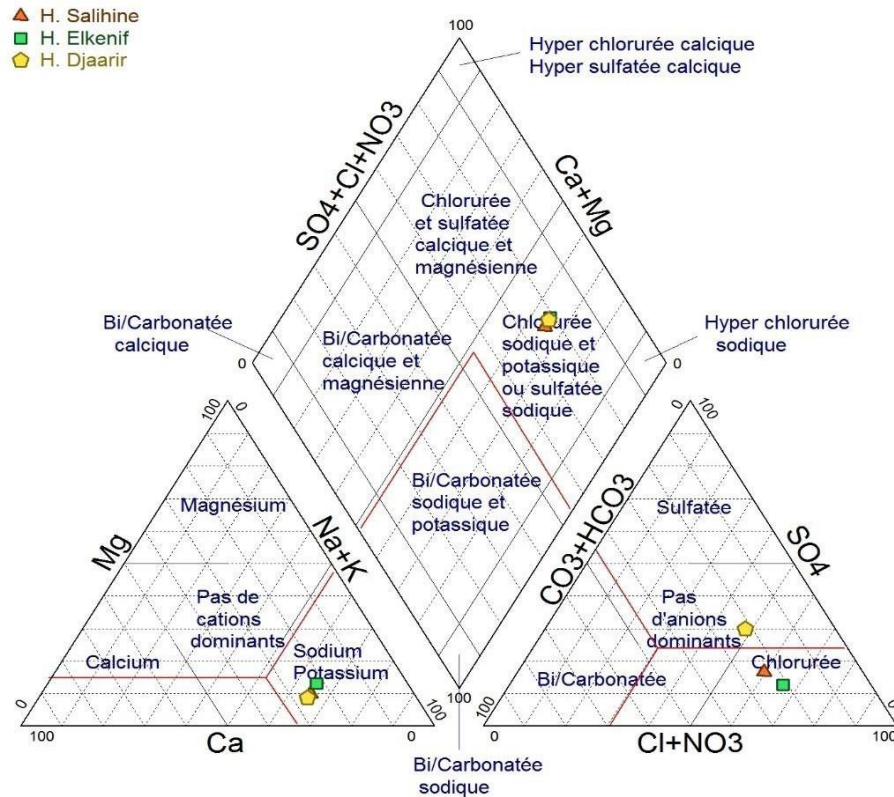


Figure 17. Représentation graphique du diagramme de Piper des eaux thermales de la région de Khenchela

Sur la représentation du Schoeller (Fig 18.), on remarque que les droites s'entrecoupent entre elles, ce qui traduit que les eaux sont d'origine différente ; même s'il existe des eaux qui ont le même faciès chimique.

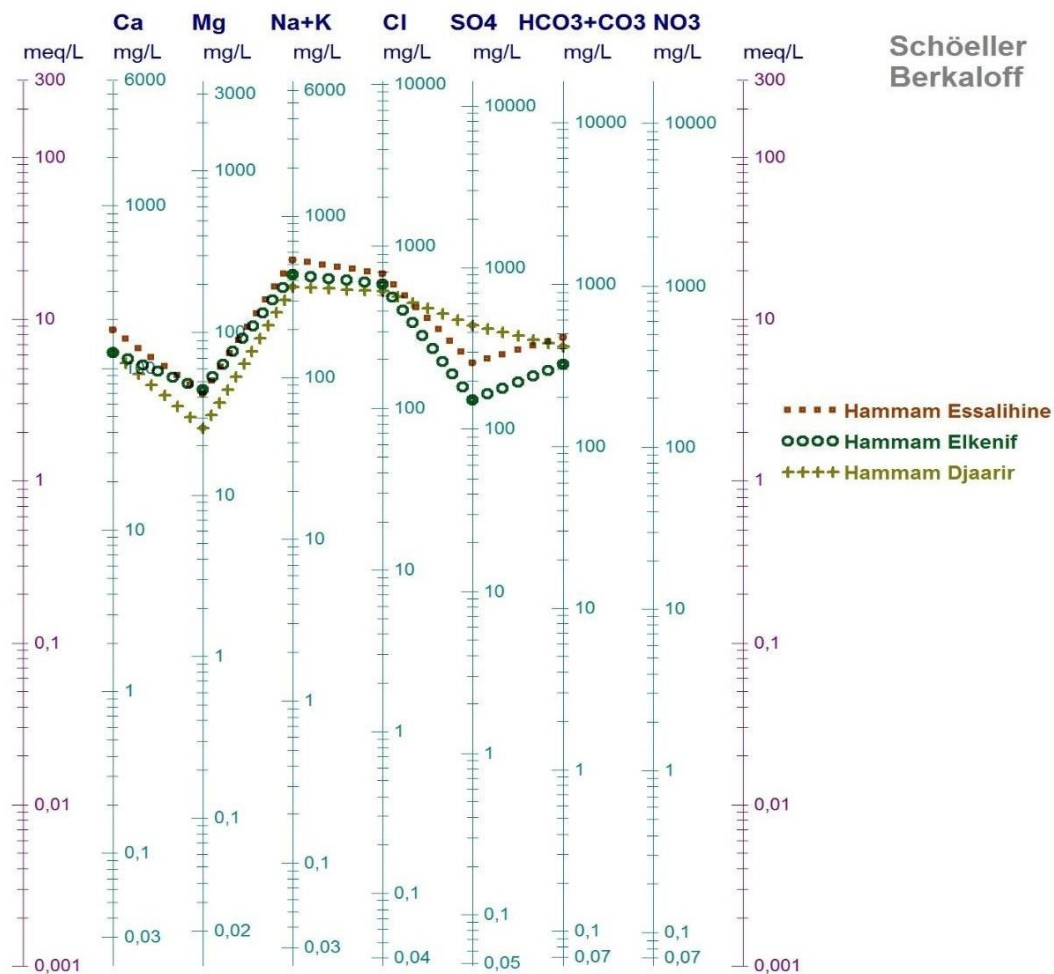


Figure 18. Représentation graphique du diagramme de Schoeler des eaux thermales de larégion de Khenchela

III.2.2.3. Géothermie au Nord Est Algérien

Les géothermomètres d'Ellis et Fournier d'une part et de Trusdell et Arnorson d'autres part fournissent des valeurs de mêmes ordres de grandeurs en matière de température dans le filon hydrothermal et la profondeur du gisement hydrothermal. (Alami, 2018).

Nous constatons que pour la source de Hammam Salihine ; plus les eaux descendent en profondeur plus elles se chauffent sous l'action du gradient géothermique et de l'Energie libérée par les réactions chimiques et passe de 100°C à 2008 m de profondeur 152°C à 3245 m.

Pour la source d'El Knif, elle passe d'une température de 111 °C à 2270 m de profondeur à 165°C à 3567 m.

A la lumière de cette étude il se dégage que le gradient géothermique moyen dans la région de hammam Salihine est de 4,82°C tous les 100m, et dans la région de hammam el Kenif est de 4,74°C par 100 m de profondeur.

✓ **L'origine de la chaleur**

On sait depuis longtemps, grâce aux exploitations minières que la température augmente avec la profondeur. Une température élevée est donc, à priori, un indice d'origine profonde.

On explique la relation entre la température et la profondeur par le terme de gradient géothermique. Par définition le gradient géothermique (degré géothermique), est la profondeur de pénétration dans le sol, exprimée en mètres nécessaire pour que la température augmente de 1°C. Variable suivant les endroits et la profondeur ; sa valeur est en moyenne de 30 à 35 m.

Le gradient géothermique est fonction du flux de chaleur terrestre et de la conductibilité calorifique des roches. Dans une région considérée ; une valeur plus au moins élevée du gradient géothermique traduira l'intensité de ce flux de chaleur. (**Schwenke, 2007 ; Alami, 2018 ; Bouaicha, 2018**).

Les activités tectoniques récentes, seraient aussi à l'origine d'anomalies positives, dans ce cas un gradient géothermique particulièrement élevé peut être observé.

Les mouvements orogéniques peuvent produire de l'énergie calorifique liée aux déformations mécaniques des roches et surtout aux frottements qui s'effectuent le long de grands accidents et dislocations. (**Schwenke, 2007**).

Enfin les réactions physico-chimiques exothermiques résultant de la réduction des sulfates, de l'oxydation des sulfures de fer et de la transformation de l'anhydrite en gypse et la désintégration des minéraux radioactifs peuvent aussi engendrer une élévation considérable de la température des eaux.

Ces différentes propriétés ne s'excluent pas mutuellement mais certaines apparaissent comme secondaires et ne pouvant provoquer des échauffements importants : c'est le cas de la chaleur dégagée par la désintégration d'éléments radioactifs (Le Maréchal).

La chaleur dégagée par les réactions chimiques exothermiques est généralement considérée comme négligeable. En fait **Ellis (1965)** a montré qu'elle pouvait jouer un rôle important.

Les mesures de températures prises directement dans les trois sources indiquent des valeurs qui varient de 42°C pour source 2 à 61°C dans la source 3.

Notons que la température des eaux varie de 4°C entre l'hiver et l'été (57°C, T_{air} 8°C, Janvier 2007) et (61°C, T_{air} = 30°C, Juin 2000).

Pourtant, la chaleur dégagée par notre globe n'a pas pour principal responsable le refroidissement de son noyau, mais la désintégration des éléments radioactifs présents dans ses roches : uranium, thorium, potassium, etc. 90% de l'énergie dissipée provient en effet de ce mécanisme. La chaleur émise par la fission varie avec la composition chimique des roches, de la friction des roches par l'activité sismique, du gradient géothermique et des réactions chimiques endogènes qui libèrent de l'énergie.

✓ Les géothermomètres à silice et à cations

Les géothermomètres employés utilisent des rapports de concentration : Na/K (**Fournier, 1979 ; Trudell, 1975, Ellis, 1970 ; Arnorson et al, 1983**), d'autres font appel aux concentrations en silice (**Fournier, 1977 ; Michard, 1979 ; Verma, 1997**) ; cette méthode basée sur la silice n'est citée que pour mémoire, car la silice n'a pas été dosée.

D'autres types de géothermomètres chimiques ne sont que des extensions de la méthode Na/K (par exemple Na-K-Ca-Mg (**Fournier and Potter, 1979**)).

✓ Géothermomètre Na/K

D.E. White (**1970, 1965**) puis A.J. Ellis (**1970**) ont mis empiriquement en évidence la relation entre le rapport Na/K et la température profonde de l'eau. Ils ont mis cette constatation en relation avec l'équilibre :



Les deux feldspaths n'étant pas miscibles, l'équilibre s'écrit en effet :

$$\frac{|\text{Na}^+|}{|\text{K}^+|} = K(T)$$

Les équations correspondantes sont :

Géothermomètre Na/ K

$$\text{A.J. Ellis (1970) : } T = \frac{908}{0.700 + \log \frac{\text{Na}}{\text{K}}} - 273.15$$

$$\text{R.O. Fournier (1979): } T = \frac{1217}{1.483 + \log \frac{Na}{K}} - 273.15$$

$$\text{A.H. Trusdell (1975): } T = \frac{856}{0.857 + \log \frac{Na}{K}} - 273.15$$

$$\text{Arnorson et al. (1983): } T = \frac{933}{0.933 - \log \frac{Na}{K}} - 273.15$$

Na et K sont exprimés en mg/l et la T en °C.

✓ Le géothermomètre à silice

La silice est l'un des constituants majeurs de l'écorce terrestre ; omniprésente dans les roches magmatiques, elle entre également dans la composition de nombre de roches sédimentaires (argiles, marnes, grès...)

Les différentes variétés allotropiques de la silice (quartz, calcédoine et silice amorphe) se dissolvent en donnant naissance, à l'équilibre, à une variété monomère H_4SiO_4 ; la réaction de solubilisation correspondante est indépendante du pH (jusqu'à pH > 9,5) et de la force ionique de la solution, la mise en solution est donc essentiellement fonction de la température.

Les feldspaths, les pyroxènes, les olivines libèrent également de la silice par action de l'eau.

Très généralement ces minéraux sont beaucoup plus facilement altérables et dans la pratique, la limitation de la silice dissoute est obtenue par précipitation d'une variété allotropique de silice à partir d'une solution où se sont dissous feldspaths, olivines, etc. (Alami, 2018 ; Bouaicha, 2018).

On peut alors utiliser les concentrations en silice de ces dernières pour calculer leur température d'équilibre à partir des formules suivantes :

$$T(C^\circ) = \frac{C}{5,19 - C} - 273,15$$

(C concentration en mg/l)

Calcul de la profondeur

Pour chaque source thermique, la profondeur du gisement hydrothermal peut être évaluée en utilisant le gradient géothermique estimé et la température calculée par les géothermomètres comparée à la température de l'air, en se rapportant à l'équation suivante :

$$P = \frac{T_{cal} - T_{air}}{G}$$

G : gradient géothermique régional (°C/100 m)

Tcal : température calculée par le géothermomètre (°C).

Tair : température moyenne annuelle de l'air °C.

Nous choisirons les résultats des équations de Trusdell et Arnorson parce que sont logique et raisonnable, ainsi, nous voyons la grande profondeur de l'eau qui s'écoule de l'intérieur, ainsi que la température importante dans cette profondeur Ce qui diminue progressivement avec la montée grâce à divers phénomènes.

Tableau 4. Températures et profondeurs du gisement hydrothermal calculées par les différents géothermomètres

Géothermomètres Na/ K		Ellis		Fournier		Trusdell		Arnorson	
		T (C°)	P (m)	T (C°)	P (m)	T (C°)	P (m)	T (C°)	P (m)
Khenchela	HS	168	3642	151	3421	104	2011	121	3120

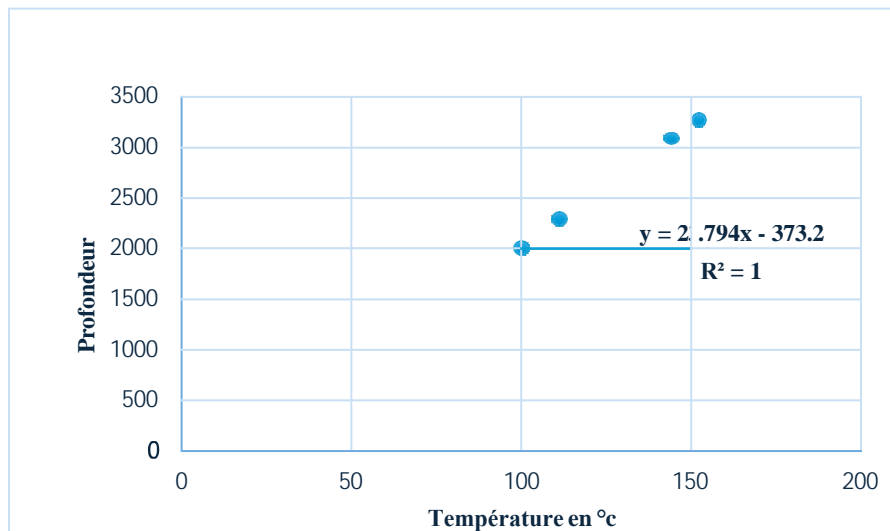


Figure 19. Variation de la température en fonction de la profondeur

Ces valeurs traduisent une géothermie à moyenne énergie qui pourrait être exploitée comme énergie pérenne et renouvelable eu égard aux nombreuses sources thermales d'Algérie. Cette énergie se renouvelle soit naturellement par l'infiltration des eaux de pluie.

La géothermie à moyenne énergie est utilisée ans l'industrie, l'agriculture, l'habitat et les loisirs Avantages et inconvénients du géothermomètre faisant intervenir un rapport de concentration, ce géothermomètre est insensible aux processus deconcentration ou de dilution, en particulier au mélange avec des eaux superficielles qui sont le plussouvent très diluées par rapport aux eaux profondes.

Il est peu sensible aux conséquences d'un refroidissement éventuel et au contact de roches d'origine profonde ; les modifications d'alcalins sont faibles. Par contre, il n'en est pas toujours de même quand il y a un long contact avec des roches sédimentaires (**Allamia, 2018 ; Bouaicha, 2018**).

L'inconvénient le plus sérieux de ce géothermomètre est qu'il suppose l'équilibre atteint. Or il est souvent très difficile de montrer qu'il en est bien ainsi.

L'importance de l'erreur que l'on pourrait commettre est montrée par l'exemple des eaux de surfacedes régions granitiques ou volcaniques ; le rapport Na/K dans ces eaux est uniquement gouverné par la vitesse relative de dissolution des feldspaths calcosodique et potassique. Dans la majorité des cas, ce rapport est compris entre 30 et 3 ; l'application du géothermomètre dans ce cas conduirait à des températures allant de 145 à 500°C.

CONCLUSION

Conclusion générale

Cette étude est une contribution à la compréhension du thermalisme à la région de la wilaya de Khenchela. Nous avons étudié par ce travail trois sources thermales.

Dans notre zone d'étude le climat est caractérisé par une très grande variabilité climatique, la région d'étude appartient au climat semi-aride. Le bilan hydrique de cette région est toujours déficitaire.

L'aperçu hydrogéologique de la région montre que les formations du crétacé inférieur, moyen et supérieur peuvent offrir des possibilités d'aquifères très intéressantes.

L'étude hydrochimique a fini par attribuer l'origine évaporitique à certains éléments comme le Na^+ et le Cl^- ils viennent principalement de l'effet de l'altération des schistes et des gneiss, d'origine profonde et enfin les éléments Mg^+ et Ca^+ proviennent à la fois des formations carbonatées et évaporitiques, qui existent en profondeur, lors de l'ascension de ces eaux chaudes en surface.

La caractérisation physico-chimique des eaux, relève de l'hydrochimie dont les principaux paramètres qui donnent une indication physique sur les eaux sont la température, la minéralisation, la conductivité électrique et le pH. La température varie de **33 à 62°C**, L'amplitude thermique, montre que les eaux ont une origine très profonde. Le pH varie de **7.05 à 7.7**. Les mesures de pH indiquent que les eaux sont acides influencées par la présence du CO_2 dissous et la foresterie. La conductivité électrique varie de **2141 à 3420 $\mu\text{S}/\text{cm}$** . Les valeurs élevées de la conductivité traduisent la solubilité des sels s'est faites sous de grandes températures.

La représentation graphique des résultats des analyses a donné un faciès chimique chloruré sodique, pour les trois sources thermales.

Les eaux thermominérales émergent dans des terrains de l'Aptien-Albien qui sont des calcaires dolomitiques riches en magnésium, calcium et carbonates avec présence d'une grande aréole triasique salifère riche en **NaCl** (Halite) et gypse (**$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$**), le tout est couvert par une argile rouge du quaternaire récent. Ces calcaires sont traversés par un réseau de fissures et failles entrecoupés qui permettent l'infiltration et la remontée des eaux souterraines sous forme de sources thermales.

Les équations de Trusdell, Ellis, Fournier et Arnorson ont données des valeurs de températures assez dispersées mais qui restent dans la normale en tenant compte du gradient géothermal, des réactions chimiques endogènes, de la désintégration radioactive de l'activité sismique et enfin dure

CONCLUSION GENERALE

ainsi les températures du gisement hydrothermale.

Une telle conclusion peut être discutée. Nous pensons alors qu'il est indispensable d'opter pour d'autres méthodes pour arriver à des résultats plus convaincants. Nous espérons par ce travail avoir contribué d'une façon admissible dans le domaine du thermalisme en Algérie.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- ABBA E, (2006).** Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique des eaux d'un écosystème aquatique du Moyen Atlas : Dayet Aoua. Diplôme d'Etudes Supérieures Approfondies, Université Ibn Tofail, kenitra, Maroc.
- ALAMIA, (2018).** Étude et modélisation d'un système thermiques alimenté par énergie géothermique. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle en génie mécanique, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès.
- AFNOR. (1997).** La qualité de l'eau, Tome 1, Echantillonnage et contrôle, qualité.
- AFNOR. (1997).** La qualité de l'eau, Tome 2, Analyses organoleptiques, Mesures physico-chimiques, Paramètres globaux, Composés organiques
- BEKKOUCHE, A. (2016).** Caractéristique hydro chimique des sources thermales de l'extrême Nord-est Algérien. Thèse de doctorat en science, université Badji Mokhtar- Annaba.
- BEKKOUCHE, M. (2009).** Caractéristiques des sources thermales de la région d'Azzaba, thèse de magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 147pp.
- BENCER, S. (2004).** Etat actuel des ressources hydriques de la région de Aïn Djasser et estimation de la qualité des eaux souterraines (wilaya de Batna). Mémoire de magistère. Départ. Hydraulique. Univ. Batna. 119 pages.
- BERKANI, Ch. (2016).** Traçage chimique et isotopique des eaux de sources pour la connaissance des aquifères du massif de l'Aurès, Khenchela, Algérie, thèse de doc. Université de Khenchela.
- BOUAICHA.F, (2018).** Le géothermalisme de la région de Guelma. Thèse de doctorat en science, université des frères Mentouri-Constantine 1-.
- BOUZIANE M.T. LABADI A. (2009).** Les Eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie). European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X, Vol. 25, No.4, 526-537.
- BRGM (2002).** Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines, outils et méthodologie. Edit. BRGM. Paris. 174 pages.
- CENEAP., (2009).** Plan d'aménagement et de développement durable de la wilaya de Khenchela ; phase n°1 : rapport n°2 évaluation territoriale « bilan critique-problématique d'aménagement ». Direction de l'environnement.
- CHADIM. (2004).** Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du constantinois (Est-Algérien). Thèse de Doctorat. Départ. Sciences de la terre. Univ. Constantine.219 pages.
- CHAPMAN D., KIMSTACH V. (1996).** Selection of water quality variables. Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed., E & FN Spon, London, 59-126

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHEVALIER-LEMIRE G., PIGASSOU R., RIGAILL R., VILMUS T. (1990).** Etude des variations naturelles du débit des sources thermales à Luchon (Haute-Garonne, France). Bull. B.R.G.M., N°4, 287-296.
- DEMDOUM A, DJEBBAR M. (2009).** Caractérisation hydrochimique et apport isotopique sur la salinité du bassin d'El Eulma en région sud-sétifienne (Algérie nord orientale), Sciences et Technologie, D- N°30, 19-26. 166 Caractérisation physico-chimique des eaux du bassin hydrographique côtier algérois
- DIB.H, (2005).** Guide pratique des sources thermales de l'Est Algérien. Publication du service Géologique National.
- CHABOUR, N. (1997).** Etude hydrogéologique de la plaine de Ain Djasser (Boughzel). Mémoire de magistère. ST. Univ. Constantine. 198 pages.
- CHADI, M. (2004).** Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du constantinois (Est-Algérien). Thèse de Doctorat. Départ. Sciences de la terre. Univ. Constantine. 219 pages
- CHEBBAH, L. (2004):** Etude hydrogéologique de la plaine de Zana Chott Saboun (wilaya de Batna). Mémoire de magistère. Départ. Hydraulique. Univ. Batna. 160 pages.
- GUIRAUD. R., (1973) :** évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse doctorat, univ. Nice
- HOUHA. B., (2007) :** étude de fonctionnement hydrogéologique et salin d'un bassin semi-aride Remila-khenchela. Thèse doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.
- KHABTANE.H., (2015) :** contribution à l'étude des caractères morphologiques, physiologiques et des marqueurs moléculaires pour l'évaluation du polymorphisme phénotypique et génétique des espèces du genre Tamarix dans différents écotopes de la zone steppique de Khenchela (Est algérien).
- LAFITTE, R. (1939) :** Etude géologique de l'Aurès. Thèse sciences, bulletin service. Carte géologique Alg. , Alger, 2° série : stratigraphie – description régionales, n° 15 ; 484p. 26 pages XXXIV pl. h.-t., 10 pl. ph. h.- t.
- ISSAËDI. A, 1992.** Le thermalisme dans son cadre géo structural. Apports à la connaissance de l'Algérie profonde et de ressource géothermales.
- OUALI , S. (2005).** Étude géothermique du sud de l'Algérie. Mémoire de magister en géophysiques. UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGUERRA BOUMERDES.
- OUALI, S. (2008).** Les sources Thermales en Algérie. Division Énergie Solaire Thermique et géothermie. Recherche et développement.
- OUALI, S. (2015).** Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie. Thèse

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

de doctorat en science, Université Des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.

OUALI, S. Hadjiat.M.M, AIT-OUALIA, Salhi. K, Malek. A, (2018). Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. Centre de Développement des énergies renouvelables, CDER.

RODIER, J. (1984). Edit. Dunod. Paris. 1365 p.

SCHWENKE, A. (2007). De l'usage de l'eau thermale en nébuliseur. Thèse de doctorat en pharmacie, université Henri Poincaré- Nancy 1.

SIMLER, R. (2007) : Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Université d'Avignon, Logiciel d'hydrochimie multilingage en distribution libre.

VALLES, V. (1985) : Etude et modélisation des transferts d'eau et des sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation, Thèse Doc. De l'institut national polytechnique de Toulouse. 180 p.

Sites d'internet

www.al.lu/chemistry/stuff1/DL1/radioactivity , consulté le 23/1/2024

www.aquamania.net/other/images/science/eauisotope, consulté le 18/4/2024

www.bondy.ird.fr/pleins_textes/, consulté le 21/3/2024

www.brgm.fr/domaines/eaux, consulté le 2/2/2024

www.industrie.gouv.fr/energie/matieres/pdf/nt07, consulté le 13/5/2024

www.quanterra.org/Quanterra_Short_Course_8F, consulté le 30/5/2024

www.uprm.edu/publications/cjs/VOL17/P133-150, consulté le 6/3/2024

عنوان المذكرة: النهج الهيدروكيميائي والطاقة الحرارية الأرضية للمياه المعدنية الحرارية في منطقة خنشلة.

الإسم و اللقب: عريف محمد أكرم، بوحزام أيوب

المؤطر: بركاني شريفة

ملخص:

تنتشر الينابيع الحرارية على نطاق واسع في شمال الجزائر وهي الأكثر وفرة في الجزء الشمالي الشرقي من الجزائر في مشروع السنة النهائية لدينا قفنا بدراسة الوظيفة الهيدروجيوكيميائية للينابيع الحرارية في منطقة خنشلة فيما يتعلق بالسباق الجيولوجي والطاقة الحرارية الأرضية تم أخذ عينات من ثلاثة ينابيع وتم تحليلها لمختلف المعايير الفيزيائية والكيميائية أظهرت نتائج التحليل الفيزيائية وجود موصلية كهربائية عالية جداً ناتجة عن ذوبان الأملاح المعدنية في درجات حرارة عالية جداً. التحاليل الكيميائية التي أجريت في الينابيع الحرارية المائية في منطقة الدراسة كشفت عن وجود أوجه كيميائية للكوريد والصوديوم أوجه كيميائية صودية يوفر مقياسا لحرارة الجيو حراري إلبليس وفورنييه من جهة وتروسدیل وأرنورسون من جهة أخرى في ما من نفس ترتيب الحجم. يوفران في ما من نفس الرتبة من حيث درجة الحرارة في الوريد الحراري المائي الحراري الوريد الحراري المائي وعمق الترسبات الحرارية المائية.

الكلمات المفتاحية: الجزائر، مقياس الحرارة الأرضية، الكيمياء الهيدروجيولوجية، خنشلة، الينابيع الحرارية.

Title of the dissertation: Hydrochemical approach and geothermal energy of thermomineral waters in Khenchela region.

Full name: ARRIF Mohamed Akram, BOUHZEM Ayoub

Directed by: BERKANI Cherifa

Abstract:

Thermal springs are widespread in Northern Algeria. They are most abundant in the north-eastern part of Algeria. In our final year project, we have study the hydrogeochemical functioning of thermal springs in the Khenchela region in relation to the geological context and geothermal energy. Three springs were sampled and analysed for the various physical and chemical parameters. The results of the physical analyses showed a very high electrical conductivity resulting from the solubility of mineral salts at very high temperatures. The chemical analyses carried out in the hydrothermal springs in the study area revealed a chloride-sodium chemical facies. sodic chemical facies. The geothermometers of Ellis and Fournier on the one hand and Trusdell and Arnorson on the other provide values of the same order of magnitude. provide values of the same order of magnitude in terms of temperature in the hydrothermal vein and the depth of the hydrothermal deposit.

Key words: Algeria, geothermometers, hydrogeochemistry, Khenchela, thermal springs.

Titre du mémoire : Approche hydrochimique et énergie géothermique des eaux thermominérales de la région de Khenchela.

Nom et prénom : ARRIF Mohamed Akram, BOUHZEM Ayoub

Encadreur : BERKANI Cherifa

Résumé :

Les sources thermales sont très répandues sur le territoire de l'Algérie du Nord. Elles sont plus abondantes dans la partie nord-est de l'Algérie. Dans notre projet de fin d'étude, nous avons étudié le fonctionnement hydrogéochimique des sources thermales de la région de Khenchela en relation avec le contexte géologique et l'énergie géothermique. Trois sources ont été échantillonnées et analysées pour les différents paramètres physiques et chimiques. Les résultats des analyses physiques ont montré une conductivité électrique très importante résulte de la solubilité des sels minéraux à des températures très grandes. Les analyses chimiques effectuées dans les sources hydrothermales de la zone d'étude ont révélé un faciès chimique chloruré sodique. Les géothermomètres d'Ellis et Fournier d'une part et de Trudell et Arnorson d'autres part fournissent des valeurs de mêmes ordres de grandeurs en matière de température dans le filon hydrothermal et la profondeur du gisement hydrothermal.

Mots clés : Algérie, géothermométrie, Hydrogéochimie, Khenchela, sources thermales.