



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABBES LAGHROUR KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDES PRESENTÉE
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT
OPTION : Écologie Fondamentale et Appliquée
2019/ 2020

Thème

Étude hydro chimique et énergie géothermique de la
source thermale de Hammam Essalihine wilaya de
khenchela

Soutenu le : 26/08/2020

Présenté Par :
Mlle. Hani KHAOULA
Mlle. KHABTANE CHOUROUK

Devant le jury composé de :

Président : M.LARBAA RABAH, Université Abbes LAGHROUR Khenchela
Encadreur : Mme. BERKANI CHRIFA MCB, Université Abbes LAGHROUR Khenchela
Examineur : Mme. OUANES MIYADA MAA, Université Abbes LAGHROUR Khenchela

Année 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tous notre remerciements s'adressent tous d'abord à tout puissant ALLAH, d'avoir guidé notre pas vers le chemin de savoir.

Nous adressons nos vifs remerciements va tout particulièrement à notre encadreur M^{me}. BERKANI CHRIFA, pour avoir assuré la direction de ce mémoire de master et pour avoir témoignée un intérêt constant tout au long du déroulement de ce travail.

Nous vifs remerciements à tous les membres des jurys pour avoir acceptés de juger ce travail.

Nous remercions à tous les enseignants de faculté des sciences de la nature et de la vie et surtout les enseignants de département d'écologie et environnement.

Un grande merci à tous ceux et toutes celles qui de près ou de loin ont permis l'accomplissement de ce modeste travail,

Particulièrement à ma famille et à mes amis.

A tous merci

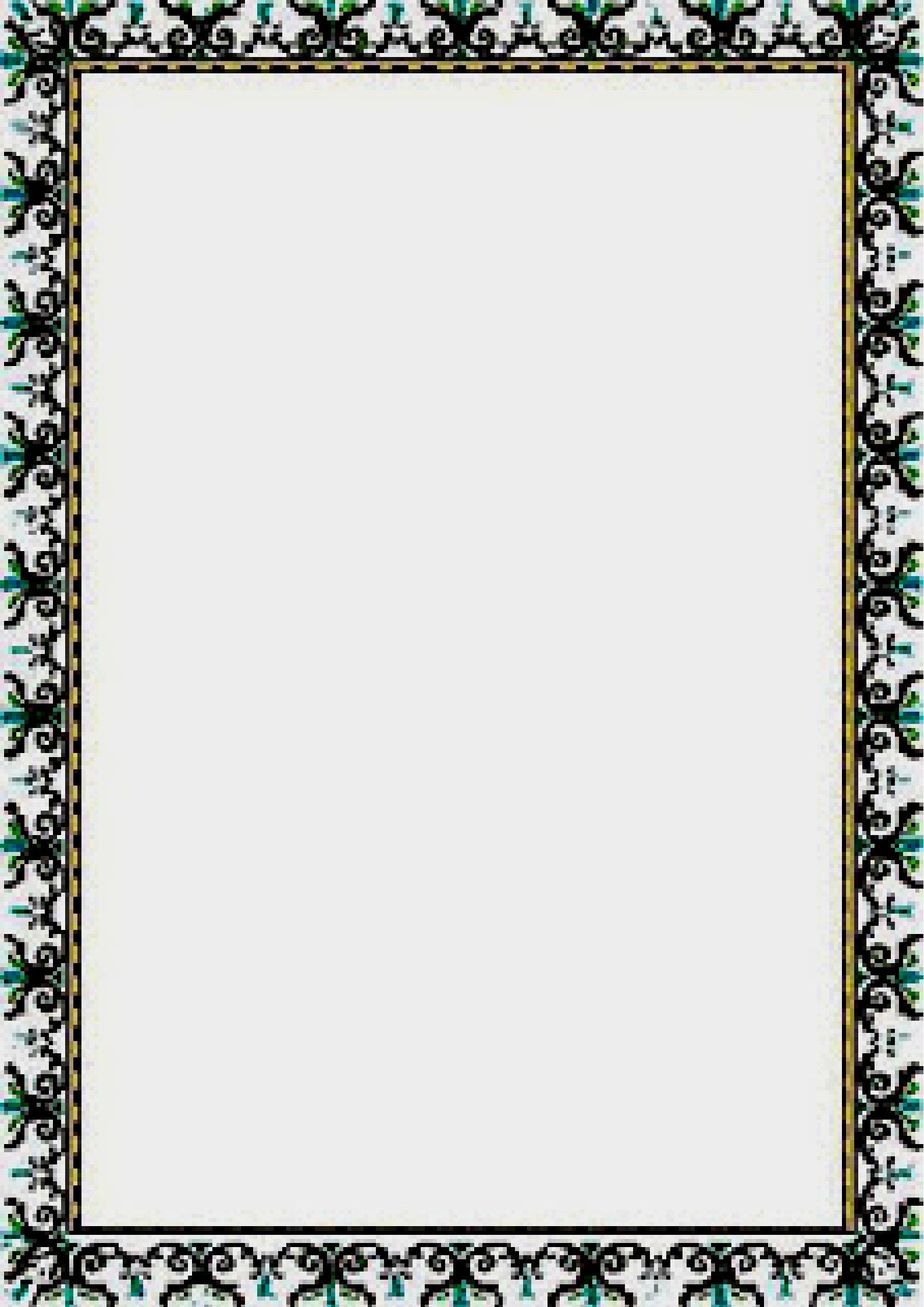
Dédicace

Je remercie tout d'abord, Allah, le tout puissant et clément de m'avoir aidé à réaliser ce travail.
A l'issu de cette thèse de recherche, je dédie ensuite ce fameux travail aux plus exceptionnels qui existent dans le monde,
A mes Très chers parents,
Qui m'ont toujours encouragé pour continuer mes études, qui m'ont soutenu tant par leurs conseils, leurs patiences et leurs confiances.

A

Mes très chers frères : Omor, Adel et Bachir.
Mes très chères sœurs : kamla et Manel.
Aux personnes qui étaient toujours à mes cotés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'étude supérieur, mes aimables amies et sœurs de cœur: Rokia, Lamiss, Hanan, Nesrin, Bouthaina et Manel,
A mes collègues de la promotion 2019-2020 Écologie Fondamentale et Appliquée.
A tous ceux qui se sont intéressés d'une recherche scientifique objective, je dédie ce.

Hani Khaoula



Dédicace

Je remercie tout d'abord, Allah, la tout puissante et clémente dz m'avoir aidé à réaliser ce travail. Je dédie ce modeste travail aux plus exceptionnels qui existent dans le monde, mes Chers parents qui ont tout sacrifié pour mon bien et qui m'ont poussé à aller de l'avant, qui m'ont soutenu tout au long de mon travail et qui m'ont éclairé ma voie par leur, compréhension et leur patience et leur amour. Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A ma chère sœur Salsabile et a mes deux frères Oussama et Louay.

A tous ceux qui sont chers, mes chers amies, mes collègues de la promotion 2020 En témoignage de l'amitié qui nous uni. Et a ceux qui lisent ce mémoire avec intérêt.

KHABTANE

CHOUROUK

Tables des matières

Remerciements	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I: Généralité sur les eaux thermales</i>	
I.1 Généralité sur les eaux thermals.....	3
I.1.1. Introduction.....	3
I.1.2. Historique.....	3
I.1.3. Définition et Étymologie.....	3
I.1.3.1. Étymologie.....	3
I.1.3.2. Définition	4
I.1.3.3. Définition proposée (définition officielle)	4
I.1.4. La Classification Des Eaux Thermals.....	4
I.1.4.1. Selon leur température.....	5
I.1.4.2. Selon leur composition chimique	5
I.1.4.3. Selon leur composition dans des minéraux.....	5
I.1.5. L'hydrothermalisme.....	6
I.1.5.1. Hydrothermalisme : une thématique vaste.....	6
I.1.5.2. Les modes de fonctionnement des systèmes thermaux.....	6
I.1.5.3. Le thermosiphon	7
I.1.6. les causes de la thermalité	9
I.1.6.1. Les réactions chimiques exothermiques.....	9
I.1.6.2. La désintégration des minéraux radioactifs	10
I.1.6.3. Le gradient géothermique	10
I.1.6.4. Les mouvements de l'écorce terrestre	10
I.1.6.5. Origine de la thermalité des eaux de Hammam Essalihine.....	10
I.1.7. Les sources thermales de l'Algérie	12
I.1.7.1. Les sources thermales de Khenchela.....	12
I.1.7.2. Différentes stations thermales médicalisés	13
I.1.8. Les deux types d'eaux thermales fréquentes	13
I.1.8.1. Les eaux carbogazeuses	13
I.1.8.2. Les eaux Sulfurées.....	14
I.1.9. Caractérisations des eaux thermales	14
I.1.9.1. Selon la température d'émergence.....	15
I.1.9.2. Selon leur minéralisation.....	15
I.1.9.3. Selon leur concentration en ions.....	16
I.2. Généralité sur la géothermie	17
I.2.1. Historique.....	17
I.2.2. Introduction.....	18
I.2.3. L'énergie géothermique	18
I.2.3.1 Types de gisements géothermiques	20
I.2.3.2. Principaux paramètres caractérisant la ressource géothermale.....	21
I.2.3.3. Utilisations des ressources géothermales.....	21

I.2.4. Les avantages et Les inconvénients de la géothermie.....	22
I.2.5. Les différents types de l'énergie géothermie.....	23
I.2.5.1 La géothermie à haute énergie :(haute enthalpie, haute température, profonde).....	23
I.2.5.2 La géothermie à basse énergie	23
I.2.5.3 La géothermie à très basse énergie	24
I.2.5.4. La géothermie à moyenne énergie	24
I.2.6. La géothermie en Algérie.....	24
I.2.6.1. L'exploration	24
I.2.6.2. L'exploitation.....	25
I.2.7. Les zones géothermiques en Algérie	26
I.2.8. Possibilité d'utilisation de l'énergie géothermale	27
I.2.8.1. L'électricité géothermique	27
I.2.8.2. L'aquaculture géothermique	27
I.2.8.3 Pompes à chaleur géothermique.....	28
I.2.9. Conclusion.....	28

Chapitre II : Cadre géographique, géologique et structurel

II. Présentation générale de la region de khenchela.....	29
II.1. Situation géographique	29
II.2. Cadre administrative.....	29
II.3. Cadre socio-économique.....	31
II.4. Industrielle et l'agriculture	31
II.5. Présentation des sites d'étude.....	31
II.6. Les sources de la région	33
II.7. Réseau hydrographique	34
II.8. Végétation et activité humaine.....	35
II.9. Aperçu pédologique sur les principaux sols de la région	36
II.10. Cadre géomorphologique et structural.....	38
II.10.1. Le relief.....	38
II.10.1.1. L'altitude	40
II.10.1.2. La pente.....	42
II.10.2. Cadre structural.....	45
II.10.2.1. Localisation et âge de mise en place du trias	46
II.11. Cadre géologique	46
II.11.1. Litho stratigraphie.....	47
II.11.1.1. Le Mésozoïque	49
A. Trias	49
B. Le Crétacé.....	49
B.1. Crétacé inférieur.....	49
B.1.1. Barrémien- Aptien.....	49
B.1.2. Albien.....	50
B.2. Crétacé supérieur.....	50
B.2.1. Cénomanién	50
B.2.2. Turonien.....	50
B.2.3. Sénonien.....	51
II.11.1.2. Le Cénozoïques.....	51
A. Le Néogène.....	51

II.11.1.3. Quatenaire.....	52
II.12. Conclusion.....	53

Chapitre III : étude climatique

III. Introduction.....	55
III.1. La station météorologique	55
III.2. Les paramètres climatiques.....	56
III.2.1. Les précipitations.....	56
III.2.1.1. Variations moyennes mensuelles des précipitations.....	56
III.2.1.2. Variations interannuelles des précipitations.....	57
III.2.2. Les température.....	58
III.2.2.1. Variations de la température moyenne mensuelle.....	58
III.2.2.2. Variations des températures moyennes annuelles.....	58
III.2.3. Le vent.....	59
III.3. Synthèse climatique.....	59
III.3.1. Diagramme Ombrothermique de Gaussen.....	59
III.3.2. Indice d'aridité de Martonne	60
III.4. Étude de l'évapotranspiration.....	61
III.4.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	62
III.4.1.1. Méthode de Turc Cette méthode est applicable	62
III.4.1.2. Formule de Thornthwaite.....	62
III.4.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	62
III.4.2.1. Formule de Thornthwaite	62
III.4.2.2. Interprétation du bilan hydrologique	65

Chapitre IV : L'Hydrochimie des eaux de Hammam Essalihine

IV. Hydrochimie.....	66
IV.1. Introduction.....	66
IV.1.1. Prélèvement.....	66
IV.1.1.1. Considérations générales sur l'échantillonnage.....	66
IV.1.1.2. Les étapes de l'échantillonnage.....	67
a. Préparation du matériel.....	67
b. Calibrage des appareils.....	67
c. Prélèvement des échantillons.....	67
d. Conservation des échantillons.....	68
IV.1.2. Mesures in Situ: Paramètres Physiques.....	68
IV.1.2.1. Mesure de la température.....	69
IV.1.2.2. Mesure du pH.....	69
IV.1.2.3. Mesure de la conductivité électrique.....	69
IV.1.2.4. Mesure du potentiel d'oxydoréduction.....	70
IV.1.3. Mesures en laboratoire: éléments chimiques majeures et mineurs.....	71
IV.1.3.1. Les éléments majeurs.....	71
A. Discussion des resultants.....	71
a. Les cations.....	71
❖ Calcium Ca^{+2}	71
❖ Magnésium Mg^{+2}	72
❖ Le sodium Na^{+}	72

❖ Le potassium K^+	72
b. Les anions.....	72
❖ Les chlorures Cl^-	72
❖ Les sulfates SO_4^{2-}	73
❖ Les bicarbonates HCO_3^-	73
❖ Les nitrates NO_3^-	73
B. Faciès chimique.....	73
a. Diagramme de Piper.....	73
b. Diagramme de Schoeller – Berkaloff	75
IV.2. La Géothermométrie chimique.....	76
IV.2.1. Introduction.....	76
IV.2.2. Principe de la géothermométrie chimique.....	76
IV.2.3. gradient géothermique.....	77
IV.2.4. Géothermie au Nord Est Algérien.....	79
IV.2.5. L'origine de la chaleur.....	79
IV.2.6. Les géothermomètres à silice et à cations.....	80
➤ Géothermomètre Na/K.....	80
➤ Le géothermomètre à silice.....	80
➤ Calcul de la profondeur.....	81
IV.2.7. La géothermie est écologique.....	82
IV.2.8. Avantages et inconvénients du géothermomètre.....	82
IV.2.9. Conclusion.....	83
CONCLUSION GENERALE.....	84

Liste des figures :

Chapitre I: Généralité sur les eaux thermales

Figure 01 : Schéma de la circulation des eaux thermales ; Thermosiphon (Houha 2007).....	9
Figure02 : Carte du gradient géothermique de l'Algérie du Nord d'après N. KaziTani (1974). (HOUHA 2007).....	12
Figure 03: relation entre profondeur et température de l'eau souterraine (Buotiba.A).....	19
Figure 04 : structure interne de globe	19
Figure 05 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température (d'après B. Lindal).....	22
Figure06 : Géothermie à haute énergie (HEINTZ ,2008).....	23
Figure07 : Géothermie à basse énergie (HEINTZ ,2008).....	23
Figure08 : Géothermie à très basse énergie (HEINTZ ,2008).....	24
Figure 09: Localisation et température des ressources géothermiques de l'Algérie (Ouali s et al 2018)	27

Chapitre II : Cadre géographique, géologique et structurel

Figure 10 : Carte administrative de la Wilaya de Khenchela.....	30
Figure 11 : Représentation du point d'échantillonnage de hammam Essalihine khenchela.....	32
Figure12 : Vue de l'intérieur de la station thermale hammam Essalihine, (Derction de tourisme, 2007).....	33
Figure13 : Le complexe de la station thermale hammam Essalihine au fond des Aurès, (Derction de tourisme, 2007).....	33
Figure 14 : Ressources hydrographique de la wilaya de Khenchela, (Derction de tourisme, (2007).....	35
Figure 15 : la carte des classes des sols de la région de Khenchela de Durand. G. H, 1954.....	38
Figure 16: Carte des reliefs de la wilaya de khenchela.....	39
Figure 17 : Modèle numérique du terrain de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009).....	40
Figure 18 : la carte des altitudes de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009).....	42
Figure 19 : la carte des pentes de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009).....	44

Figure 20 : carte géologique de Hammam Essalhine, Khenchela, « extrait de la carte géologique de khenchela au 1/50000 (sonatrach.1997) ».....	45
Figure 21 : la carte géologique de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009).....	47
Figure 22 : Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de L’Aurès d’après R. Laffitte (1939) et modifié par R.Guiraud (1973).....	48
Figure 23 : Coupe interprétative dans le bassin de Rémila (VILA, 1977).....	48
Figure 24 : la carte lithologique de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009).....	52

Chapitre III : étude climatique

Figure 25 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station d’El Hamma pour la période (2008/ 2009 -2017/2018).....	57
Figure 26 : Evolution des précipitations annuelles à la station d’El Hamma pour la période (2008/2009 -2017 /2018).....	57
Figure 27 : Variation de la température moyenne mensuelle d’El Hamma pour la période (2008/2009-2017/2018).....	58
Figure 28 : Evolution de la température moyenne annuelle à la station d’El Hamma pour la période (2008/2009-2017/2018).....	59
Figure 29 : Diagramme Ombrothermique de la station d’El Hamma.....	60
Figure 30 : Abaque de l’indice d’aridité annuel de De Martonne.....	61
Figure 31 : évaporation et évapotranspiration potentielle et réelle.....	63
Figure 32 : le complexe hydrique SOL-PLANTE-CLIMAT.....	64
Figure 33 : Diagramme variation mensuelle des éléments climatique.....	65
Figure 34 : Variation mensuelle des résultats du bilan hydrique.....	65

Chapitre IV : L’Hydrochimie des eaux de Hammam Essalihine

Figure 35 : Echantillonnage Dans les sources moins chaudes.....	68
Figure 36 : Échantillonnage Lorsque la température élevée.....	68
Figure 37 : Représentation graphique sur le diagramme de Piper.....	74
Figure 38 : Diagramme de Schoeler-Berkaloff.....	85
Figure 39 : température en fonction de la profondeur selon plusieurs valeurs du gradient géothermal.....	78
Figure 40 : Carte du gradient géothermique de l’Algérie du Nord d’après A.Issaâdi et F.Z. Haouchine (1994).....	79
Figure 41 : variation de la température en fonction da la profondeur.....	82

Liste des tableaux :

Tableau 01 : Classification des eaux thermales (Moret, 1946).....	5
Tableau 02 : classification des eaux thermales en fonction de leur minéralisation.....	16
Tableau 03: Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.....	25
Tableau 04: Division administrative de la Wilaya de Khenchela.....	29
Tableau 05 : Données géographiques de station météorologique avec la série d'observation.....	55
Tableau 06 : Précipitations moyennes mensuelle durant la période (2008-2018).....	56
Tableau 07 : Précipitations moyennes mensuelles et températures moyennes mensuelles de la période (2008-2018)	60
Tableau 08 : Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite.....	63
Tableau 09 : Bilan hydrologique moyen (2008/2009-2017/2018) à la station d'El Hamma par la méthode de Thornthwaite.....	64
Tableau 10 : classification des eaux étudiées, selon leur température	69
Tableau 11 : Valeurs du pH mesuré.....	69
Tableau 12 : Valeurs de la conductivité électrique mesurées.....	70
Tableau 13 : Valeurs du potentiel d'oxydoréduction mesurées.....	71
Tableau 14 : Analyses chimiques en éléments majeurs (mg/l).....	71
Tableau 15: Températures et profondeurs du gisement hydrothermal calculées par les..... différents géothermomètres (B.Houha 2007).....	82

Résumé :

L'Algérie est l'un des pays qui compte le plus de sources thermale au niveau mondial, Le recours à l'action curative des eaux thermales est une tradition plus que millénaire en Algérie. Autrefois mise en valeur par les Romains, elles sont aujourd'hui pour la plupart d'entre elles laissées à l'abandon. Les plus réputées en termes de qualité et de beauté à l'Est de l'Algérie.

L'objectif de cette étude est de caractériser l'hydrochimie de la source thermale Hammam Essalihine de Khenchela par la mesure des paramètres physico-chimique des eaux. L'étude de la géothermie des griffons sera une première approche expérimentale dans ces régions afin de valoriser et de rentabiliser un potentiel énergétique renouvelable très utile pour les pays en voie de développement comme l'Algérie. Cette étude est une contribution à l'étude de sources thermales de l'est algérien, afin de comparer, classer et valoriser les eaux thermales à des fins curatives et industrielles. Il est nécessaire d'utiliser la source thermale Hammam Essalihine pour des projets de l'énergie renouvelable, pour l'agriculture, la pisciculture, les pompes de production de chaleur, les turbines à irrigation, les motopompes, les chauffages domestiques et en évitant l'utilisation des énergies fossiles épuisables, et pour réduire la pollution dans le cadre du développement durable.

Mots clés : eau thermale; hydrochimie; géothermométrie; faciès chimique; hydrothermalisme; Khenchela.

ملخص

تعتبر الجزائر واحدة من البلدان التي لديها أكبر المصادر الحرارية في العالم، واستخدام المياه الحرارية العلاجية هو تقليد له أكثر من ألف سنة في الجزائر. اكتشفها سابقا الرومان، لكن معظمها الآن مهجور. الأكثر شهرة من حيث الجودة والجمال في شرق الجزائر.

والهدف من هذه الدراسة هو تحديد الخصائص الكيميائية للمصدر الحراري حمام الصالحين لولاية خنشلة عن طريق قياس الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه. ستكون دراسة الطاقة الحرارية الأرضية للغريفون أول نهج تجريبي في هذه المناطق من أجل تطوير إمكانات الطاقة المتجددة وجعلها مفيدة للغاية للبلدان النامية مثل الجزائر. هذه الدراسة تساهم في دراسة الينابيع الحرارية في شرق الجزائر، من أجل مقارنة وتصنيف وتحسين المياه الحرارية للأغراض العلاجية والصناعية. من الضروري استخدام النبع الحراري حمام الصالحين لمشاريع الطاقة المتجددة من أجل الزراعة؛ تربية الأسماك؛ مضخات إنتاج الحرارة؛ توربينات الري؛ مضخات المحركات؛ السخانات المنزلية وتجنب استخدام الوقود الأحفوري المستنفد، من أجل الحد من التلوث في إطار التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: المياه الحرارية، الكيمياء المائية؛ جيوترمومتري؛ الصيغة الكيميائية؛ الحرارة المائية؛ خنشلة

Abstract

Algeria is one of the countries with the largest thermal sources in the world, The use of curative thermal waters is a tradition over a thousand years in Algeria. They are today for most of them abandoned. The most famous in terms of quality and beauty to the east of Algeria.

The objective of this study is to characterize the hydrochemistry of the thermal sources Hammam Essalihine in Khenchela by measuring the physico-chemical parameters of the water. The study of the geothermal energy of the griffons will be a first experimental approach in these regions in order to develop and make profitable a renewable energy potential very useful for developing countries like Algeria. This study is a contribution to the study of thermal springs in eastern Algeria, in order to compare, classify and enhance thermal waters for healing and industrial purposes. It is necessary to use the Hammam Essalihine thermal spring for renewable energy projects, for agriculture, fish farming, heat production pumps, irrigation turbines, motor pumps, domestic heaters and avoiding the use of exhaustible fossil fuels, and to reduce pollution within the framework of sustainable development.

Key words: thermal water; hydrochemistry; geothermometry; chemical facies; hydrothermalism; Khenchela.

Introduction générale

Introduction générale :

Les recherches scientifiques menées sur les eaux thermales sont d'un grand intérêt. En effet, ces recherches sont basées sur diverses scientifiques, ont permis d'apprécier le phénomène de thermalisme (qui a été jusqu'à un temps récent considéré comme un phénomène surnaturel) comme phénomène naturel et de définir l'origine des eaux dites thermales ainsi que leur zones d'alimentations et leur processus d'acquisition de la température et de la minéralisation.

Le but de ce travail est une étude hydrochimique et du pouvoir géothermique de la source thermale de Hammam Essalihine.

Il était utile aussi, de calculer la température des eaux dans le gisement hydrothermal et la profondeur maximale atteinte par les eaux dans ce gisement pour subir cet échauffement.

Les ressources thermales de Khenchela en est un exemple, pour lequel l'exploitation de la ressource permet d'avoir à disposition un jeu de données relativement conséquent.

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 curistes et la population locale et qui peuvent se résumer ainsi :

- Pourquoi une ressource thermale 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?

- à fin de répondre à ces questions, une vision globale du système est nécessaire. Cette étude concerne donc le site et prend en compte les écoulements souterrains profonds mais également plus superficiels. Ce mémoire a été fondée sur deux principaux axes : axe théorique et axe pratique et s'articule autour de six grands volets :

Le chapitre I : 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.

Le chapitre II : définit la structure géologique, géomorphologique et structurelle, Dans ce but, les formations géologiques et géomorphologiques sont décrites, et la structure du remplissage quaternaire dans la zone d'émergence est précisée.

Le chapitre III : traite des aspects hydrodynamiques du système. Les entrées du système (infiltration ET pertes du réseau hydrographique) sont quantifiées et également l'aspect climatologique est étudié et le climat de la région est analysé.

Le chapitre IV : est consacré à l'étude de l'hydrochimie. Pour cela, les éléments majeurs, les éléments mineurs des eaux et des roches du secteur analysés, ce qui nous permet d'avoir une confirmation sur le faciès chimique de ces eaux.

Traite la géothermométrie chimique qui a permis de calculer la température à laquelle les eaux ont été portées dans le sous-sol "au niveau de leur gisement, et la profondeur du gisement.

L'objectif de cette étude est de déterminer la composition chimique et les paramètres physiques et les calculs géothermiques de l'eau thermale de deux sources, et confirmer les études précédentes en termes de faciès chimiques, et d'expliquer le phénomène de minéralisation des eaux thermales de Khenchela.

Traitement de l'information:

Il s'est fait avec les logiciels de traitement de texte (Microsoft Word), le tableur Excel, le logiciel Google Earth pour la cartographie et le logiciel DIAGRAMME pour les faciès chimiques.

Chapitre I

Généralité sur les eaux thermales

Le chapitre I établit un bilan des connaissances autour de l'hydrothermalisme en général puis autour du site thermal 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. Généralité sur les eaux thermales :

I.1.1. Introduction :

Il est très important, dans chaque étude de commencer par un chapitre qui établit un bilan de connaissance autour du thème, cela est considéré comme un point de départ pour définir plus précisément l'objectif du travail.

Dans ce chapitre on va présenter une synthèse bibliographique des études techniques réalisées sur le secteur.

I.1.2. Historique :

Dans les temps anciens, la présence de sources chaudes ne trouvait d'explications que dans les croyances religieuses. Jusqu'au XIX^{ème} siècle, les textes ne traitent que des aspects descriptifs des eaux thermales et de leurs effets thérapeutiques (Baudry, 1736, Debrest, 1778, Opaix, 1816, Socquet, 1824 et Ganderax, 1827). Durand-Fardel (1857) commence à évoquer l'origine des eaux thermales comme "des volcans réduits à la partie aqueuse" ou encore des "émanations gazeuses, les quelles [...] arrivent à la surface condensées en eaux minérales et thermales". Le débat sur l'origine juvénile ou météorique Des eaux thermales commence.

Dans les années 1960 à 1980, les études sur les sources thermales tentent de mettre en relation la nature de la ressource avec le contexte géologique (Blavoux, 1966, Teisseyre, 1968, Le Maréchal, 1976, Siméon, 1980, Vuataz, 1982 et Toro, 1988).

Dans les années 1990, la nature et la répartition des sources thermales sont analysées à l'échelle du pays, en Espagne (Cuchi-Oterino et al. 2000), en Slovaquie (Melioris, 2000), au Canada (Grasby et Hutcheon, 2001) ou encore en Russie (Vinograd, 2004).

En Algérie, Le recours à l'action curative des eaux thermales est une tradition plus que millénaire, la présence de trois petites stèles à Hammam Meskhoutine remonte à la période punique. En Mauritanie césarienne, huit cités furent construites autour des sources : AquaeMauretaniae césariennes (Hammam Righa), AquaeAlbae en Mauritanie Rétinienne, AquaeNumidiae (route d'Hippone – Carthage), AquaeSirenses (Hammam Bou-Hanifia), AquaeThibilitanae (Hammam Meskhoutine), Khenchela AquaeRomanique. Dans ces cités romaines se côtoyaient des bains, des thermes publics et privés dans les résidences des dignitaires.

Aujourd'hui on respecte encore les vertus de l'eau et on améliore son utilisation, devenu très médicalisé et énergétiques en Algérie.

I.1.3. Etymologies et définition :

I.1.3.1. Etymologies :

Le mot thermale vient du grec ancien (θερμός) ou thermos signifie « chaud », Syntagme (nom + déterminant adj.) d'usage fréquent. L'adjectif thermal (dérivé de thermes, lat. Termae, du grec thermos, chaud naturelle), d'après le Dict. de Castany et Margat. Eaux thermales est attesté en 1735, dans la traduction française de la Géographie physique de l'anglais Woodward.

Une eau thermale est une eau minérale chaude, de source souterraine. Elle est naturellement chaude à son émergence (à température supérieure à un seuil conventionnel), pure et possède des propriétés thérapeutiques car elle est riche en sels minéraux, en gaz, oligo-éléments.

I.1.3.2. Définition :

- ❖ **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".

I.1.3.3. Définition proposée (définition officielle) :

Selon **Vincent VALLES** : 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 suivent 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.1.4. La Classification Des Eaux Thermales :

Moret propose une classification des sources thermales en fonction de quatre critères : le type d'émergence, l'origine des eaux, la cause de la remontée et l'origine de la température (tableau 01).

Tableau 01 : 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 <ul style="list-style-type: none"> - Capillarité 	<ul style="list-style-type: none"> - Gradient géothermique <ul style="list-style-type: none"> - Volcanisme Réaction physico-chimique et exothermique

Selon la température à l'émergence, différents types de minéraux seront dissous ; raison pour laquelle, une classification des différents types d'eaux thermales doit être faite en fonction de leur origine, de leur température, des origines géologiques, de la composition chimique et composition minérale.

I.1.4.1. Selon leur température :

- Eaux froides : moins de 20°C
- Eaux hypo thermales : de 21° à 35°C
- Eaux mo thermales : de 35° à 45°C
- Eaux hyperthermales : plus de 45°C

I.1.4.2. Selon leur composition chimique :

Le cheminement de l'eau thermale pour arriver jusqu'à la surface est très important puisqu'il peut modifier sa composition.

Si l'eau est très chaude et atteint son point d'ébullition avant d'arriver à la surface, il ne sortira que de la vapeur. Ces gaz s'oxydent lorsqu'ils se mélangent avec les eaux froides et produisent des sources acides, lesquelles présentent un aspect boueux causé par l'acidité de l'eau qui corrode la roche environnante.

I.1.4.3. Selon leur composition dans des minéraux :

a. Eaux bicarbonatées : Eaux de basse minéralisation, alcalines et froides.

- ❖ Bicarbonatées sodiques.

- ❖ Bicarbonatées calciques.
- ❖ Bicarbonatées mixtes.
- ❖ Bicarbonatées sulfatées.
- ❖ Bicarbonatées chlorurées.

b. Eaux Ferrugineuses :

Eau qui contient une forte teneur en fer, bien qu'elles soient accompagnées généralement bicarbonates ou sulfates.

c. Eaux Sulfatées :

Ce type d'eaux se caractérise par sa température et minéralisation qui sont variables. Elles peuvent être classées comme : Sodiques et magnésiques : elles ont une importante action laxative.

I.1.5. L'hydrothermalisme :

I.1.5.1. Hydrothermalisme : une thématique vaste

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 (Bodeïet *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). 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.1.5.2. 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 (CO₂, H₂, N₂) soit de phénomènes superficiels (comme la réduction des sulfates par les bactéries par exemple) libérant de l'H₂S ou du CO₂. 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.1.5.3. 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 rencontrée 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 (Figure 01). 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 (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**).

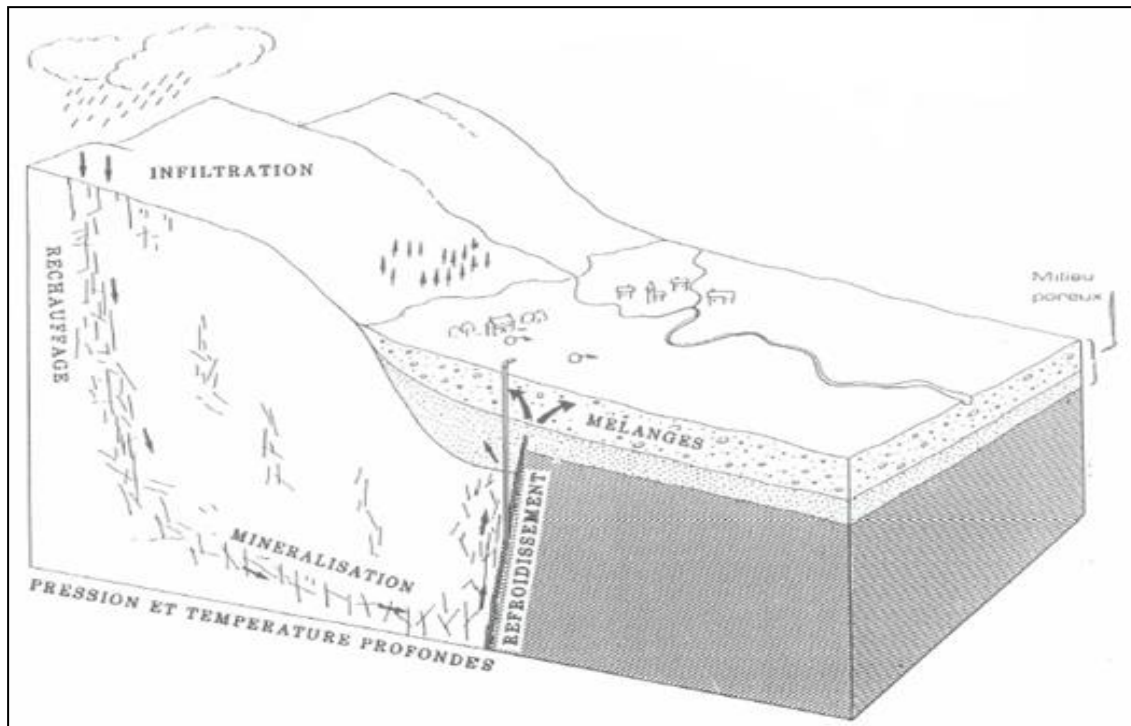


Figure 01 : Schéma de la circulation des eaux thermales ; Thermosiphon (Houha , 2007).

I.1.6. les causes de la thermalité :

La température parfois élevée des eaux thermo minérales dépend de plusieurs facteurs qui sont successivement :

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

I.1.6.1. Les réactions chimiques exothermiques :

Plusieurs réactions se produisent au sein de l'écorce terrestre. Certaines sont exothermiques, c'est-à-dire qu'elles dégagent de la chaleur, telles que l'oxydation, la réduction, l'hydratation et ont pu être invoquées pour expliquer la thermalité de quelques sources. Parmi les plus banales, l'oxydation de la pyrite de Fer, et spécialement de la marcassite, à l'air humide, en donnant du sulfate ferrique puis des hydroxydes ferreux et ferrique et en libérant l'acide sulfurique, élève la température de 300 à 500 degrés.

L'oxydation de masses importantes de ce minéral peut donc créer des centres de chaleur susceptibles de réchauffer des circuits va doses voisins.

La réduction des sulfates et l'hydratation de l'anhydrite qui pourrait à elle seule justifié des températures inférieures à 60 °C, ont été également invoquées par F.Ehrann pour

expliquer la thermalité, de même que la genèse des sources thermo minérales de la Kabylie des Babors. (DIB, 2008).

I.1.6.2. La désintégration des minéraux radioactifs :

La concentration de ces corps semble a priori être plus grande dans les couches superficielles de ce flux calorifique est donc suffisant pour échauffer dans une notable proportion un courant aquifère voisin et doit être pris en considération pour expliquer la thermalité.

La désintégration des corps radioactifs dégage de la chaleur d'une façon continue. Par exemple un gramme de Radium, en équilibre avec ses produits de décomposition dégage 137 calories/Heure. (DIB, 2008)

I.1.6.3. 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 :

$$F = (5,4428 \pm 0,4187) \cdot 106 - j/cm^2/s$$

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.

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

I.1.6.4. Les mouvements de l'écorce terrestre :

Dans l'écorce terrestre les mouvements sont multiples et multiformes, certaines déformations telles que les bombements et les failles entraînent une surrection du matériel en fusion avoisinant des couches sédimentaires, voire des circuits hydrothermaux.

Le volcanisme entre autre, joue un grand rôle dans le réchauffement de l'eau et le gradient géothermique dans les régions volcaniques est de 1° pour 10 m à 15 m. Certains circuits peuvent de ce fait acquérir une certaine température. Mais nous savons que les centres éruptifs actuels ou récents exhalent des quantités importantes d'eaux juvéniles hyperthermales. Dès lors, il est permis de supposer que dans le cas de certaines sources à températures anormalement élevées pour lesquelles l'explication du gradient reste insuffisante, c'est cette eau juvénile qui, en se mélangeant aux eaux va doses des thermo – siphons, vient renforcer la température de ces eaux (origine mixte) (DIB, 2008) .

I.1.6.5. Origine de la thermalité des eaux de Hammam Essalihine:

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.

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.

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 varient de 4°C entre l'hiver et l'été (57°C, $T_{\text{air}}=8^{\circ}\text{C}$, Janvier 2007) et (61°C, $T_{\text{air}}=30^{\circ}\text{C}$, Juin 2000).

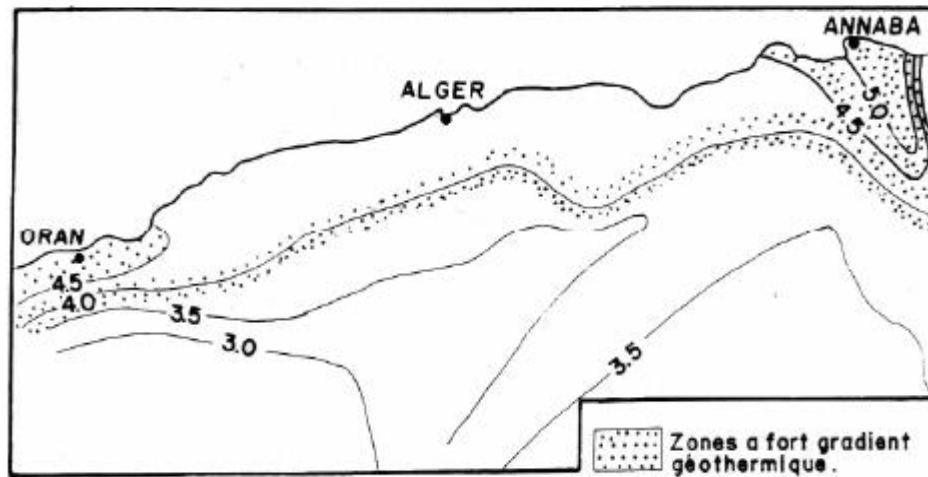


Figure 02 : Carte du gradient géothermique de l'Algérie du Nord d'après N. KaziTani (1974).
(HOUHA 2007)

I.1.7. Les sources thermales de l'Algérie :

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 se déplace vers l'Est. Les températures mesurées à l'émergence varient de 19°C à Ben Haroune à 98 °C à Hammam Meskoutine.

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, ce cas est rencontré à titre d'exemple à Hammam Melouane 29.42 gr/l, Hammam El Biban 15gr/l, Hammam Salhine 9 gr/l (Ouali, 2008).

II.1.7.1. 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.

Les trois 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.

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.

I.1.7.2. Différentes stations thermales médicalisés :

Parmi les nombreuses stations thermales qui existent en Algérie, huit seulement sont médicalisées, il s'agit des stations thermales : Hammam Bouhanifia (Mascara), Hammam Bouhadjar (Ain Temouchent), Hammam Boughrara (Tlemcen), Hammam Rabbi (Saida), Hammam Righa (Ain Defla), Hammam Guergour (Setif), Hammam Salhin (Biskra), Hammam Meskoutine (Guelma). Ces stations thermales sont gérées par la société algérienne de thermalisme et sont conventionnées avec les différentes caisses de sécurité sociale (CNAS, Casnos, Caisse militaire).

Les établissements disposent de structures d'accueil et d'équipements adéquats ainsi que d'un encadrement médical et paramédical qualifié pour prodiguer les soins basés sur les méthodes scientifiques de la crénothérapie aux différents malades et curistes. Les autres stations thermales éparpillées à travers le territoire national enregistrent par contre un déficit dans les infrastructures d'accueil, elles sont surtout sollicitées par les curistes pour les bains thermaux traditionnels (**Ouali, 2008**).

I.1.8. Les deux types d'eaux thermales fréquentes :

I.1.8.1. Les eaux carbogazeuses :

Les eaux carbogazeuses sont des eaux chargées en CO₂ ; qui peut être produit exemple par la décomposition de la calcite à haute température qui libère le gaz, en effet lorsque des calcaires sont enfouis et portés à haute température, une décomposition de la calcite se produit. Le Calcium et un Oxygène se recombinent par exemple dans une structure silicatée, alors que le CO₂ libéré peut se dissoudre dans l'eau du réservoir.

La quantité de CO₂ dissous est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz dans la phase gazeuse en contact avec l'eau. Du fait de la pression liée par exemple à la colonne d'eau surmontant le réservoir, le CO₂ est dissous, parfois en grande quantité. Le pH qui en résulte est bas et la solution peut dissoudre de grandes quantités de calcite.

Lors de la remontée de l'eau carbogazeuses des modifications physico –chimiques importantes se produisent.

Lors de la remontée des eaux vers la surface, la pression diminue car la hauteur de la colonne d'eau située au dessus diminue. Tant que la pression totale est supérieure à la pression partielle en CO₂, la solution constitue une phase homogène unique. En revanche dès que la pression totale devient inférieure à la pression partielle en CO₂, le CO₂ commence à changer de phase.

Des bulles de gaz apparaissent, c'est le point de bulle. Le mélange qui remonte devient alors multiphasique, il s'agit d'un mélange eau/gaz. Au fur et à mesure de la remontée, le volume gazeux augmente rapidement du fait de la conjonction de plusieurs phénomènes : la pression partielle en CO₂ diminue en s'ajustant sur la pression totale, ce qui provoque un passage d'une quantité croissante en CO₂ de la phase aqueuse vers la phase gazeuse.

De plus, la pression totale diminuant, le volume des bulles subit une expansion selon la loi des gaz parfait : $V = nRT/P$ N augmente, P diminue donc V augmente fortement.

Ce processus favorise la remontée du fluide multiphasique et la perte de CO₂ s'accompagne d'une élévation de pH et une augmentation du produit ionique par rapport à la calcite. A partir d'un certain stade, l'index de saturation par rapport à ce minéral devient positif et la solution est sursaturée par rapport à la calcite qui peut alors précipiter, l'eau devient incrustante (**Bekkouche, 2016**).

I.1.8.2. Les eaux Sulfurées :

Il s'agit d'eaux riches en Sulfures et autres composés soufrés ayant différents niveaux d'oxydo réduction (Sulfites, Thiosulfates, Soufre organique, Sulfate, Polysulfures, etc...). La présence de sulfures, notamment d'hydrogène Sulfuré, même à l'état de traces induit une odeur très caractéristique.

De manière générale, ces eaux sont marquées par un caractère réducteur, les espèces réduites étant relativement diverses (non seulement pour l'élément Soufre mais aussi d'autres éléments comme le Fer et de concentration variable, on mesure la quantité totale de composés réducteur par la quantité totale de dioxygène nécessaire à l'oxydation de toutes les formes réduites, sans distinction.

La quantité de dioxygène nécessaire à l'oxydation complète sera bien évidemment d'autant plus importante que les formes seront plus réduites et que la concentration de ces dernières sera plus élevée (**Bekkouche, 2016**).

I.1.9. Caractérisations des eaux thermales :

Il existe plusieurs manières de classer les eaux minérales, selon que l'élément considéré comme principal tel que la température de l'eau, la teneur en minéraux, ou la composition en minéraux (Schwenke, 2007).

Une eau pourra donc être caractérisée en fonction de différents référentiels :

I.1.9.1. Selon la température d'émergence :

On distingue les eaux thermales de basse température et les eaux thermales de haute température. D'après A. Issaâdi (1992), les eaux thermales sont classées selon leur température d'émergence en quatre classes :

➤ 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.

➤ Eaux métriothermales

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

➤ Eaux mésothermales

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

➤ Eaux hyperthermales

Ce sont des eaux dont la température à l'émergence est supérieure à 50 °C et inférieure à 100°C (Issaâdi, 1992).

I.1.9.2. Selon leur minéralisation :

Les eaux thermales ont une teneur en sels minéraux très variable, ce qui leur confère des propriétés différentes. Ces minéraux permettent une classification en fonction de leur teneur, obtenue après déshydratation à 180°C.

Les eaux très faiblement minéralisées, dont la teneur en sels minéraux est inférieure à 50mg/l, seront différenciées des eaux faiblement minéralisées, dites aussi «oligo-minérales », dont la teneur est comprise entre 50 et 500 mg/l. Les eaux moyennement minéralisées ont une teneur comprise entre 500 et 1000 mg/l, les eaux dite minéralisées sont comprises entre 1000 et 1500 mg de sels minéraux par litre. Les eaux fortement minéralisées ont une teneur supérieure à 1500 mg/l (Schwenke, 2007).

Tableau 02 : classification des eaux thermales en fonction de leur minéralisation.

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

Source : (Schwenke, 2007).

I.1.9.3. Selon leur concentration en ions :

Les anions et cations contenus dans les eaux thermales sont représentés en quantités variables. Il est néanmoins difficile d'établir une classification rigoureuse car les paramètres sont souvent associés, et une même eau peut appartenir à plusieurs familles: en effet, elle peut contenir plusieurs ions dominants (Schwenke, 2007).

A. Les eaux sulfatées :

Ce type d'eau se caractérise par sa température et minéralisation qui sont variables. Elles peuvent être classées comme : calciques, sodiques et magnésiques : elles ont une importante action laxative. Elles sont également indiquées pour lutter contre les affections dermatologiques. On distinguera les eaux :

- **Sulfatées calciques** : Elles sont indiquées dans des affections du rein et dans certaines maladies métaboliques.
- **Mixtes (calcique et magnésienne)** : Elles sont aussi indiquées pour le traitement des eczémas, des séquelles et cicatrices des brûlures comme elles sont indiquées pour les affections veineuses (Bekkouche, 2016).

B. Les eaux sulfurées:

Le soufre à l'état réduit y est partiellement entreposé sous forme gazeuse. La présence des cations, calcium et sodium essentiellement, permet de les subdiviser en eaux sulfurées calciques, sodiques ou mixtes.

L'émission d'hydrogène sulfuré permet à ces eaux (ou au gaz séparément recueilli) d'être utilisé pour leurs propriétés antibactériennes notamment sur les muqueuses de l'appareil respiratoire et également pour leur action antirhumatismale (incorporation possible du soufre dans les cartilages lésés) (Burille, 2006).

C. les eaux bicarbonate :

Des eaux qui proviennent des roches calcaires et contiennent les bicarbonates. On

distingue : Les eaux bicarbonatées sodiques ou bicarbonatées calciques. Ce type d'eaux facilite le traitement des différentes brûlures (exemple Hammam Abou Hanifa, Mascara) **(Dib, 2008)**.

D. les eaux Ferrugineuses :

Eau qui contient une forte teneur en fer, bien qu'elles soient accompagnées généralement de bicarbonates ou de sulfates.

Elles sont indiquées dans des cas d'anémies sidéropénique et d'autres types d'anémies, puisque ce type d'eau est considéré comme reconstituant. Les eaux ferrugineuses sont indiquées en cas d'obésité, de rhumatismes, d'affections hépatiques, biliaires et pour certaines affections dermatologiques, ainsi que pour des bouleversements du développement infantile **(Bekkouche, 2016)**.

E. les eaux chlorurées :

Les ions chlorures sont dominants (supérieur à 250 mg/l) associés le plus souvent au sodium (au moins 200 mg/L).

Les eaux sodiques fortes sont dites aussi chaudes, la dissolution de sel dans d'anciens dépôts lagunaires peut faire atteindre le seuil de saturation de l'eau, soit 300 g/L. Les eaux sodiques faibles, dites aussi froides, sont minéralisées seulement à quelques grammes par litre d'eau. Ces eaux sont très corrosives pour les matériaux métalliques. Elles sont beaucoup utilisées en rhumatologie, du fait de leur température optimale pour le corps humain **(Schwenke, 2007)**.

I.2. Généralité sur la géothermie :**I.2.1. Historique :**

Les énergies renouvelables deviennent un enjeu majeur dans plusieurs pays à travers le monde.

L'utilisation directe de l'eau chaude existe depuis longtemps et continue de croître dans différents domaines d'applications. Le premier système de chauffage urbain géothermique a été inauguré au XIV^e siècle à Chaudes-Aigues, en France, et le premier puits géothermique a été foré près de Reykjavik, en Islande, en 1755. Cependant, ce n'est qu'au XX^e siècle que l'énergie géothermique a été exploitée pour le chauffage des locaux, la production d'électricité et l'utilisation industrielle. Le premier grand service municipal de chauffage urbain a été lancé en Islande dans les années 1930 et fournit actuellement de la chaleur géothermique à environ 99% des 200 000 habitants de Reykjavik.

L'Algérie, est un pays fortement dépendant des énergies fossiles depuis très longtemps, se voit dans l'obligation de se retourner vers les énergies renouvelables (stations photovoltaïques

de différents types) dans le grand sud du pays pour la production de l'électricité et un premier essai d'une station géothermique programmée par SONELGAZ sur deux tranches le premier sera entre 2015 et 2020 avec une capacité de 5 MW et une deuxième station entre 2020 et 2030 avec une capacité de 10 MW dans la wilaya de Guelma (**Le ministère de l'énergie 2017**). Les ressources géothermiques de l'Algérie sont estimées de moyenne et de basse enthalpie

(<100°C), utilisées dans différents domaines comme le séchage des légumes, le chauffage urbain, la production électrique...etc. (**Bouaicha ,2018**)

I.2.2. Introduction :

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe.

La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre.

En présence d'un flux de chaleur élevé les eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être :

➤ Geysers : Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut.

Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;

➤ Fumerolles : Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère.

Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;

➤ Sources thermales : Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées.

Exemple : Les sources thermales du Nord de l'Algérie.

L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique. (**Ouali, 2005**)

I.2.3. L'énergie géothermique :

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie

géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Dans le domaine du chauffage, on peut considérer deux techniques spécifiques de la géothermie :

La géothermie se rapportant au captage de la chaleur du sol pour des faibles profondeurs. Cette technique est adaptée au pavillonnaire et au petit résidentiel. La géothermie se rapportant au captage de la chaleur issue de nappes phréatiques. Ces nappes étant généralement à des grandes profondeurs. Cette technique est adaptée au grand résidentiel (généralement plusieurs milliers de logements). (Alami ,2018)

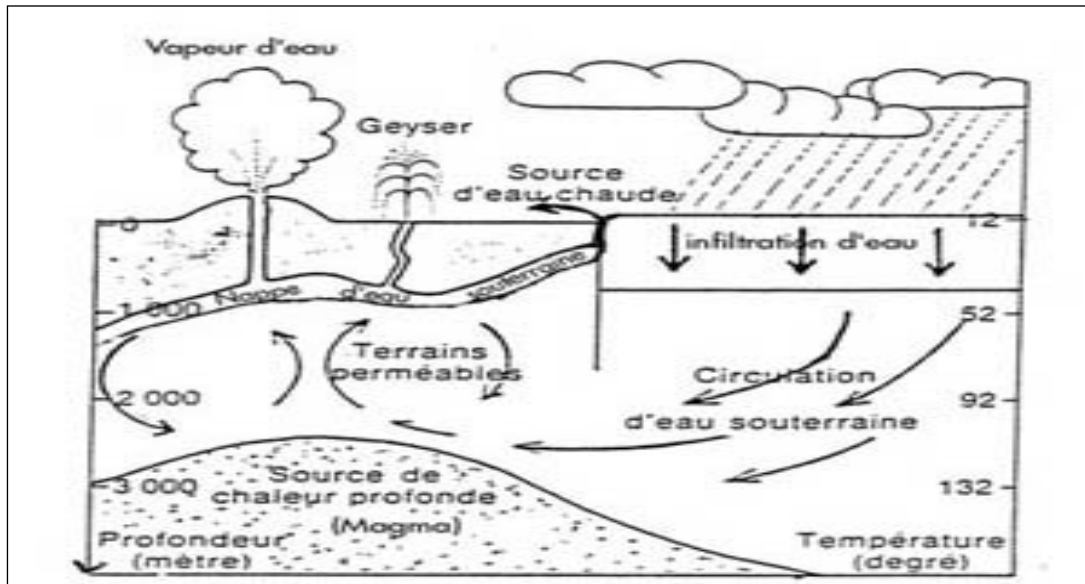


Figure 03 : relation entre profondeur et température de l'eau souterraine (Buotiba.A)

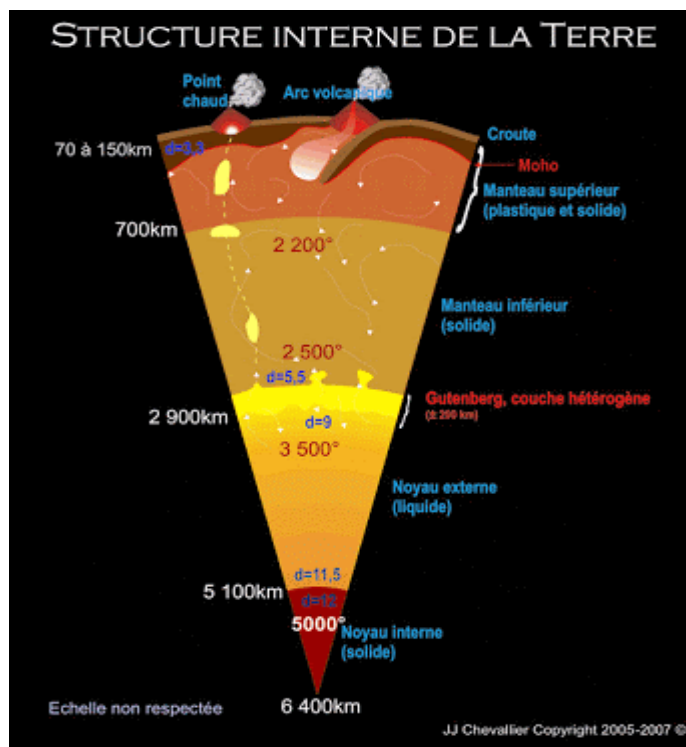


Figure 04 : structure interne de globe

I.2.3.1. Types de gisements géothermiques :

Un gisement géothermal est constitué de trois éléments principaux :

- Une source de chaleur
- Une roche réservoir
- Un fluide.

A travers le monde, il existe trois catégories de gisements géothermiques :

➤ Les gisements géothermiques des zones volcaniques récentes : Ce type de gisement se caractérise par l'existence en profondeur d'une chambre magmatique très chaude (1300°C) qui représente la source de chaleur naturelle. Cette chambre magmatique cède sa chaleur aux couches géologiques superficielles. Dans ce cas, les eaux sont très chaudes; elles sont plus adaptées à la production d'électricité.

Parmi les pays concernés par ce type de gisements, on peut nommer la Nouvelle-Zélande et l'Islande

➤ Les gisements des zones de plate forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires. Dans ce type de gisement il n'existe pas de source de chaleur particulière en profondeur, mais la chaleur est uniquement due au gradient géothermique. Dans ce cas les réserves sont généralement très profondes et leur exploitation nécessite la réalisation de forages.

Ce type de gisements est rencontré en France (les bassins parisien et aquitain) et en Algérie (le bassin du Sahara septentrional.)

➤ Les gisements géothermiques des zones continentales actives : Dans ce troisième cas, les eaux résultent de la circulation d'eau thermique à travers les failles et les discontinuités géologiques et arrivent en surface sous forme de sources.

On retrouve ce type de gisement en Algérie, à travers les diverses sources thermales qui jaillissent au Nord.

Exemple : Hammam Bouhadjar

Suivant leurs thermalismes, ces gisements géothermiques sont classés en deux types de champs géothermiques :

Les champs hyperthermiques : Concernent la première catégorie de gisements correspondants aux gisements géothermiques des zones volcaniques récentes.

Les champs semi-thermiques : Concernent la deuxième et la troisième catégorie de gisements correspondant aux gisements des zones de plate forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires et aux gisements géothermiques des zones continentales actives (**Ouali, 2005**).

I.2.3.2. Principaux paramètres caractérisant la ressource géothermale :

➤ **Porosité** : c'est une caractéristique intrinsèque des terrains ; elle est égale au rapport du volume des vides sur le volume total de la roche ; elle s'exprime en pourcentage. La porosité totale d'une roche est très variable : de 1 à 50 %. Elle renseigne sur le volume d'eau qu'est susceptible de contenir une roche, mais ne permet pas de connaître le volume qu'elle pourra libérer.

➤ **Perméabilité** : c'est une notion dynamique qui implique la présence d'eau. Elle représente l'aptitude que possède un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'une différence de pression. Elle s'exprime par le coefficient de perméabilité K , en mètres par seconde, lié au débit de fluide par unité de surface de roche traversée V et au gradient de pression exercé par le fluide dP/dx , par la relation : $V = K dP / dx$

➤ **Transmissivité** : ce paramètre est égal au produit de la hauteur productrice h par la perméabilité moyenne sur cette hauteur. Elle s'exprime en m^2/s . Ce paramètre est fondamental pour déterminer la productivité d'un aquifère.

➤ **Pression statique du gisement** : la pression statique du gisement correspond à la pression de l'aquifère dans les conditions naturelles, sans pompage, ni réinjection. La pression en tête de puits est aussi fonction de l'altitude. Si celle-ci est positive, ce qui est souvent le cas, le puits sera artésien.

➤ **Température** : la température est fonction du gradient de température local. La température en tête de puits est toujours légèrement inférieure à celle du réservoir, selon la profondeur et le débit exploité.

➤ **Caractéristiques physico-chimiques du fluide géothermal** : le fluide géothermal peut contenir en solution, des sels et des gaz dissous. Ces composés sont soit sous forme ionique (Na^+ , Ca^{+2} , SO_4^{-2} ...), soit sous forme moléculaire (O_2 , CH_4 , SiO_2 ...). La concentration d'un composé dissous s'exprime en g /L, p.p.m, ou mol / l. La composition chimique est parfois traduite en équivalent NaCl, exprimé en g /L.

D'autres indicateurs peuvent avoir un rôle dans l'exploitation :

- $pH = - \lg H^+$ dont le rôle est prépondérant dans certaines réactions ;
- Eh qui définit le caractère oxydant ou réducteur du fluide ;
- GLR ou « gasliquid ratio » qui mesure la quantité de gaz libéré par l'eau à pression atmosphérique.
- PB pression de point de bulle, pression au-dessous de laquelle il y a séparation de phase entre le liquide et les gaz dissous.

I.2.3.3. Utilisations des ressources géothermales :

La température de la ressource est l'élément déterminant pour les applications envisageables à partir de la chaleur géothermale. Le diagramme de la (figure 05) distingue, entre 20 et 200 C°, deux grandes catégories d'applications, les applications thermiques jusqu'à environ 110-120 C° et la production d'électricité à partir de 120 C°.

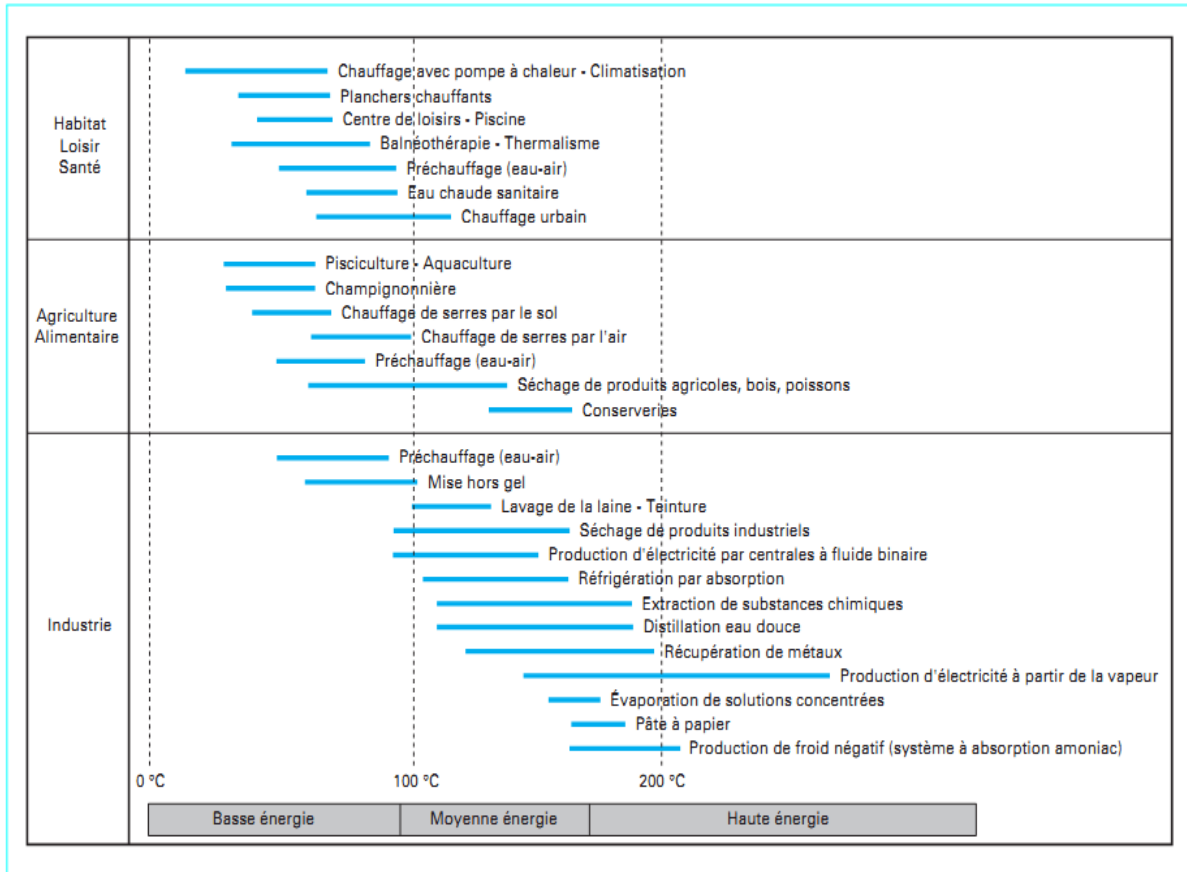


Figure 05 : Principales utilisations de la géothermie en fonction de la température (d'après B. Lindal)

I.2.4. Les avantages et Les inconvénients de la géothermie :

I.2.4.1. Les avantages de la géothermie :

- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport.
- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement.
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelées.
- Énergie de base, généralement, indépendant des conditions climatiques (HEINTZ, 2008).

I.2.4.2. Les inconvénients de la géothermie :

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés.
- L'utilisation de la géothermie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques.

➤ Risque de glissement de terrain (HEINTZ ,2008).

I.2.5. Les différents types de l'énergie géothermie :

L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisements et du fluide géothermique existant, ainsi, se distingue trois types de géothermie dans le monde :

I.2.5.1. La géothermie à haute énergie :(haute enthalpie, haute température, profonde)

Se caractérise par des gisements dont la température est supérieure à 150°C. Elle est rencontrée dans les régions volcaniques ou sismiques ou dans les zones de roches fracturées. Elle est destinée principalement à la production d'électricité. (Ouali, 2015)

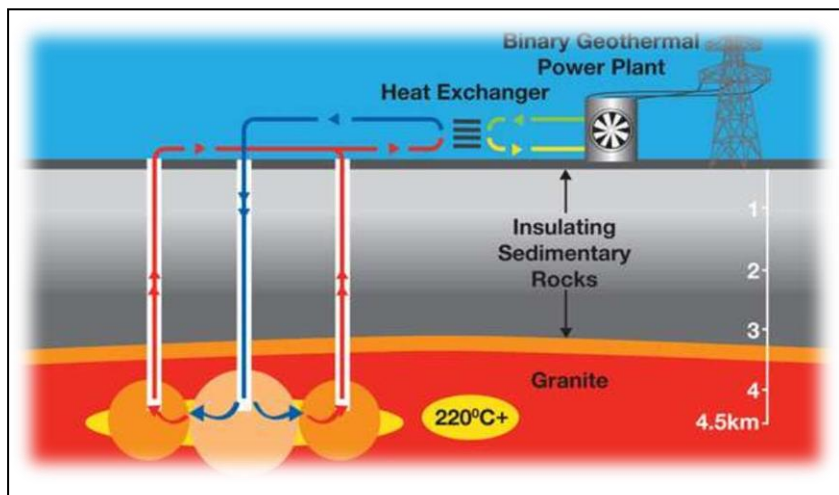


Figure 06 : Géothermie à haute énergie (HEINTZ ,2008).

I.2.5.2. La géothermie à basse énergie :

Se caractérise par l'exploitation de la chaleur du sous-sol ou des aquifères superficiels (de 0 à 600 m de profondeur) dont la température est inférieure à 30°C. Elle est principalement utilisée pour le chauffage et la climatisation grâce aux systèmes de pompe à chaleur. (Ouali, 2015)

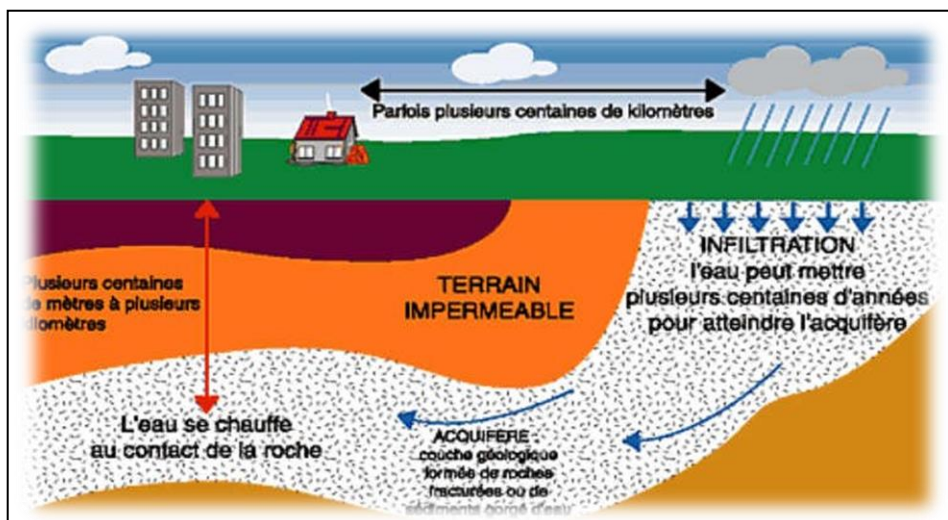


Figure 07 : Géothermie à basse énergie (HEINTZ ,2008).

I.2.5.3. La géothermie à très basse énergie :

C'est une géothermie utilisée au chauffage individuel pour des faibles profondeurs de 30 à 120 mètres, elle concerne généralement les aquifères. La température des sources est de l'ordre de 10 à 30°C. (Alami ,2018)

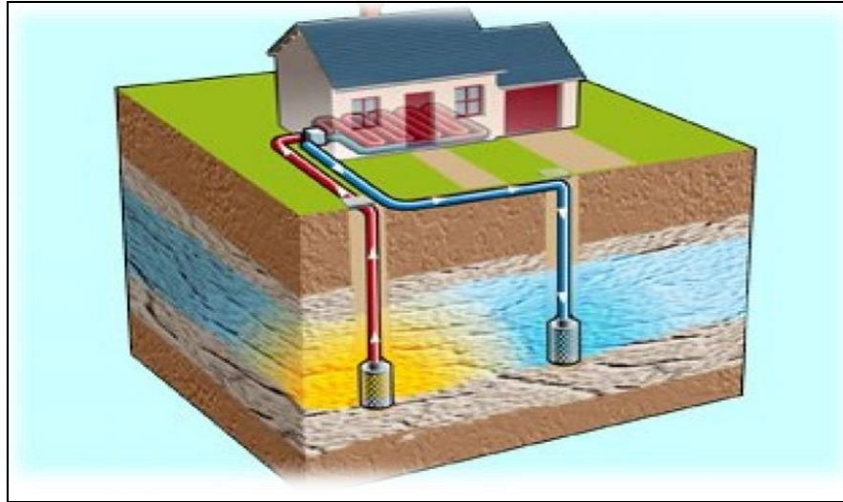


Figure 08 : Géothermie à très basse énergie (HEINTZ ,2008).

I.2.5.4. La géothermie à moyenne énergie :

Se caractérise par des gisements profonds (1600 à 2000 m), dont la température varie entre 30 et 150°C, localisés dans les régions continentales stables ou actives. Elle est principalement destinée aux applications directes : séchage de produits agroalimentaires, pisciculture, chauffage de locaux, etc. (Ouali, 2015)

I.2.6. La géothermie en Algérie:

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Énergies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980)

I.2.6.1. L'exploration :

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien, Carte Géothermique Préliminaire du Nord de l'Algérie.

Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales.

Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord algérien, majoritaires au Nord-est .Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskhoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l’Algérie, plus particulièrement dans les régions de l’Oran, de la Kabylie et du Constantine. (Ouali, 2005)

Tableau 03: Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l’Algérie.

Sources thermales	wilaya	Température (°C)	Résidus Secs (mg/l)	Débit (l/s)	Faciès chimique
Hm. Ouled Aïcha	Batna	35	7143	4	Chloruré sodique
Hm. Sillal	Bejaia	46	2221	10	Chloruré sodique
Hm. Chegua	Biskra	50	6210	20	Chloruré sodique
Hm. Boughrara	Tlemcen	43	398	60.5	Chloruré magnésien
Hm. Charef	Djelfa	42	1670	38	Chloruré calcique
Hm. Sokhna	Sétif	50	2052	-	Sulfaté sodique
Hm. Sidi Aïsa	Saïda	44.5	2502	5	Sulfaté sodique
Hm. Salah bey	Constantine	23	25582	-	Chloruré sodique
Hm. Touansa	Médéa	22	8970	5	Sulfaté sodique
Hm. Delaa	M’Sila	42	1980	25	Sulfaté sodique
Hm. Bouhanifia	Mascara	66	2012	23	Chloruré sodique
Hm. Ain Franine	Oran	35	5343	-	Chloruré sodique
Hm. Sidi Trad	El Tarf	63	542	1.8	Chloruré sodique
Hm. Sidi Slimane	Tissemsilt	42	2374	5	Chloruré sodique
Hm. Essalihine	Khenchela	70	2082	60	Chloruré sodique
Hm. Serghine	Tiaret	40	4400	12	Chloruré sodique
Hm. Righa	Ain Defla	68	2466	2.5	Sulfaté sodique
Hm. Ksenia	Bouira	60	3520	50	Chloruré sodique

Source : (Ouali et al 2018)

I.2.6.2. L’exploitation :

En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l’époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits. Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation

des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales. Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

Depuis 1990, une récente application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara algérien. C'est dans la région de Touggourt qu'une première installation d'équipements destinés aux chauffages des serres est assurée par l'équipe du laboratoire Thermique du C.D.E.R.

Bien que cette application ait donné de bons résultats, elle ne s'est pas encore généralisée et reste très modeste en rapport avec le potentiel géothermique du Sud algérien.

Il reste cependant à noter que l'exploitation de l'énergie géothermique peut être facilitée considérablement au Sud de l'Algérie grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le sous sol saharien (Ouali, 2005).

I.2.7. Les zones géothermiques en Algérie :

Le Nord de l'Algérie renferme de nombreuses sources thermales classées de basse à moyenne température et réparties d'Est en Ouest, avec une plus forte concentration dans la région Est. Comme le montre la figure 3, les températures mesurées à l'émergence des varient de 22 °C à 98 °C. Les sources thermales dont la température est comprise entre 22 et 45 °C sont les plus nombreuses, suivies par celles dont la température est comprise entre 45 et 60 °C et enfin par celles dont la température est supérieure à 60 °C.

A l'Est de l'Algérie, les sources thermales sont nombreuses dans toute la région qui s'étend de Sétif à Constantine et qui atteint Biskra vers le Sud. L'eau thermale de Hammam el Biban à Sétif, émerge à une température de 80 °C. A Bejaïa, l'eau thermale de Hammam Sidi Yahia Al Aidli arrive en surface à une température de 58 °C et celle de Hammam Sidi Trad à El Kala jaillit à une température de 63 °C.

La plus renommée de ces sources est celle de Hammam Meskhoutine de Guelma (figure4) qui est surtout connue pour être classée la source thermale la plus chaude au monde (98 °C).

Le Centre de l'Algérie compte aussi de nombreuses sources thermales de température variant entre moyenne à chaude, les plus connues sont, Hammam Righa (60 °C) à Ain Defla, Hammam Melouane (38 °C) à Blida et Hammam Ksena (60 °C) à Bouira.

A l'Ouest de l'Algérie, dans le département de l'Oranie, sont comptées plus d'une trentaine de sources thermales, leurs températures sont pour la plupart inférieures à 45 °C. Les plus importantes sont les sources de Hammam Rabbi (47 °C) à Saïda, Hammam Boughrara (43 °C) à Tlemcen et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara (Ouali et al 2018).

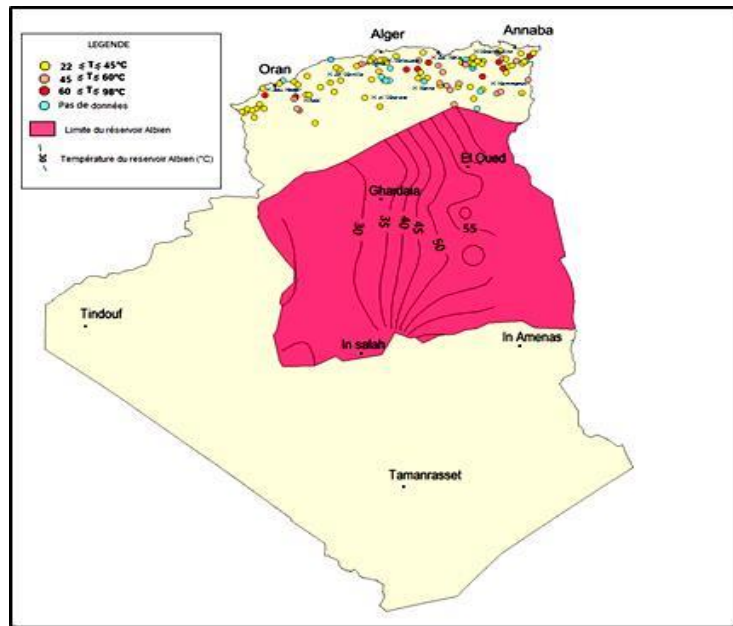


Figure 09: Localisation et température des ressources géothermiques de l'Algérie (Ouali .s et al 2018).

I.2.8. Possibilité d'utilisation de l'énergie géothermale :

I.2.8.1 L'électricité géothermique :

La production d'électricité d'origine géothermique consiste à utiliser le fluide géothermique contenu dans des réservoirs profonds pour actionner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur, qui produit un courant électrique. Suivant le type de gisement géothermique, deux types de centrales sont développées, les centrales géothermiques dites conventionnelles qui utilisent un fluide géothermique à état vapeur sec ou vapeur humide dont la température est supérieure à 150°C , et les centrales géothermiques à cycle binaire qui utilisent un fluide géothermique à l'état (eau + vapeur) dont la température est inférieure à 150°C , exemple

KALDARA Green Energy, qui a été installé en 2010 en Algérie. Cette entreprise prévoit d'installer la première centrale à cycle binaire dans la zone de Hammam Meskhoutine (Bouaicha ,2018).

I.2.8.2. L'aquaculture géothermique :

Cette activité est encouragée par le gouvernement qui fournit un soutien financier jusqu'à 80% du coût total du projet. Trois piscicultures ont été construites par des particuliers sur différents sites en Algérie. La ferme piscicole de Saida (Ain Skhouna) comprend 33 étangs couvrant une surface totale de 49500 m^2 et d'autres installations telles que : éclosérie, laboratoire, étangs préliminaires, etc. Un forage foré fournit 60 L/s d'eau chaude (30°C) pour nourrir la pisciculture. 200 tonnes de poissons Tilapia ont été produites en 2008. La

production annuelle attendue est de 500 tonnes. Les deux autres sites sont situés dans les localités d'Ouargla et Ghardaïa (Sahara).

Les forages fournissent 44 L/s d'eau à 21°C pour Ouargla et 150 L/s d'eau à 28 °C pour Ghardaïa. Environ 1500 tonnes de poissons Tilapia sont produites par an. Les espèces cultivées sont Tilapia Nilotica et Tilapia rouge (**Bouaicha ,2018**).

I.2.8.3. Pompes à chaleur géothermique :

Les pompes à chaleur géothermiques sont parmi les plus rapides applications de l'énergie renouvelable au développement dans le monde aujourd'hui. Elles représentent une technologie relativement nouvelle, mais déjà bien établie, utilisant d'énormes quantités d'énergie stockées dans la terre. Cette forme d'utilisation directe de l'énergie géothermique est basée sur la température relativement constante du sol, ou des eaux souterraines, dont la gamme de température est comprise entre 4°C et 30°C, pour fournir le chauffage et le refroidissement pour les maisons, les écoles, les usines et les bâtiments. Les systèmes de pompes à chaleur permettent de chauffer et de refroidir avec le même équipement (**Ouali 2015**).

Probablement la wilaya de Saïda est le premier site en Algérie, qui utilise une pompe à chaleur géothermique. Cette pompe à chaleur réversible de 34KW est utilisée pour chauffer et climatiser 12 salles de classe, la bibliothèque et le restaurant d'une école primaire. L'eau chaude (46 °C) passe d'abord par la pompe à chaleur avant d'être utilisée pour la baignade. L'eau sort à 39 °C.

Ce système permet d'avoir des températures confortables d'environ 30 ° C pendant la période froide et de 15 ° C en été (**Bouaicha ,2018**).

I.2.9. Conclusion:

Les eaux exploitées par les stations thermales sont majoritairement d'origine météorique. Elles présentent différents types de fonctionnement lié au mode de réchauffement des eaux (gradient géothermique simple ou accentué par la topographie, le magmatisme et/ou la tectonique) et du moteur de la remontée en surface (la pression hydrostatique, le gaz-lift et/ou la différence de densité). L'acquisition de ces différents types de minéralisation est très fortement liée au contexte géologique de chacun des sites (nature des roches encaissantes, fracturation, contexte tectonique...). Fortes de cette diversité, les eaux thermales algériennes occupent une place économique non négligeable.

Chapitre II : Cadre géographique, géologique et structurel

Définit la structure géologique, géomorphologique et structurelle, Dans ce but, les formations géologiques et géomorphologiques sont décrites, et la structure du remplissage quaternaire dans la zone d'émergence est précisée.

II. Présentation générale de la région de khenchela :

II.1. Situation géographique :

La wilaya de Khenchela est située à l'Est de l'Algérie contrefort des monts des Aurès, dans une aire géographique comprise entre 34° 06' 36' et 35° 41' 21' l'altitude nord ; et entre 06° 34' 12' et 07° 35' 56' de longitudes Est ; elle est limitée géographiquement par :

- Nord : par la wilaya d'Oum el Bouaghi.
- Sud : par la wilaya d'el Oued.
- Est : par la wilaya de Tébessa.
- Ouest : par la wilaya de Batna.
- Sud-ouest : par la wilaya de Biskra. **(Khabtane, 2010)**

II.2. Cadre administratif : Actuellement le territoire de la wilaya est composé de 21 communes regroupées 8 Daïra (dont 05 Daïra créées en 1990). **(Bouafia, 2015)**

Tableau N° 04: Division administrative de la Wilaya de Khenchela. (Bouafia, 2015)

Daïra	Communes
Khenchela (C.L.W)	Khenchela
El Hamma	El Hamma, Nsigha, Tamza, Baghai
Ain Touila	Ain Touila, Mtoussa
Kais	Kais, Taouzient, Rmila
Bouhamama	Bouhamama, Chelia, Msara, Yabous
Babar	Babar
Chechar	Chechar, Djellal, Kheirane, Ouldja
O Rechache	Ouled Rechache, Mahmel

Son étendue territoriale couvre une superficie totale de 9715 Km².

Sur le plan géographique, la région de Khenchela appartient à l'ensemble naturel des Hauts Plateaux, un ensemble occupant la partie médiane du territoire national et bien individualisé géographiquement par les deux chaînes montagneuses de l'Atlas : l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud. De par ses spécificités physiques, liées à ses caractéristiques géographiques, cette wilaya présente une particularité, qui fait d'elle, avec la wilaya de Batna, l'une des wilayas uniques dans son genre. En effet, la surrection des Aurès au quaternaire donne à cette partie de l'Atlas saharien une physionomie très proche des espaces montagneux du nord, et de ce fait la région se distingue par ses milieux physiques et naturels très diversifiés et à facettes multiples, alliant entre :

Paysages tellien (zones de haute montagne, bien arrosées et bien boisées à paysages verdoyants) : monts des Aurès occupant la partie ouest de la wilaya;

Paysages de hautes plaines (hautes plaines céréalières semi-arides) pour la partie nord de la wilaya.

Paysages steppiques et sahariens composés : de monts totalement dénudés et érodés (monts des Némemchas à l'Est), d'oasis (Siar, Khirane et El Ouedja) et de basses plaines (El Meita et Ouazerne). Elle est caractérisée par sa vocation agro-sylvo-pastorale où la superficie agricole représente 22% les forêts 12%, et la steppe représente 49%, de la superficie totale (Anonyme, 2001).

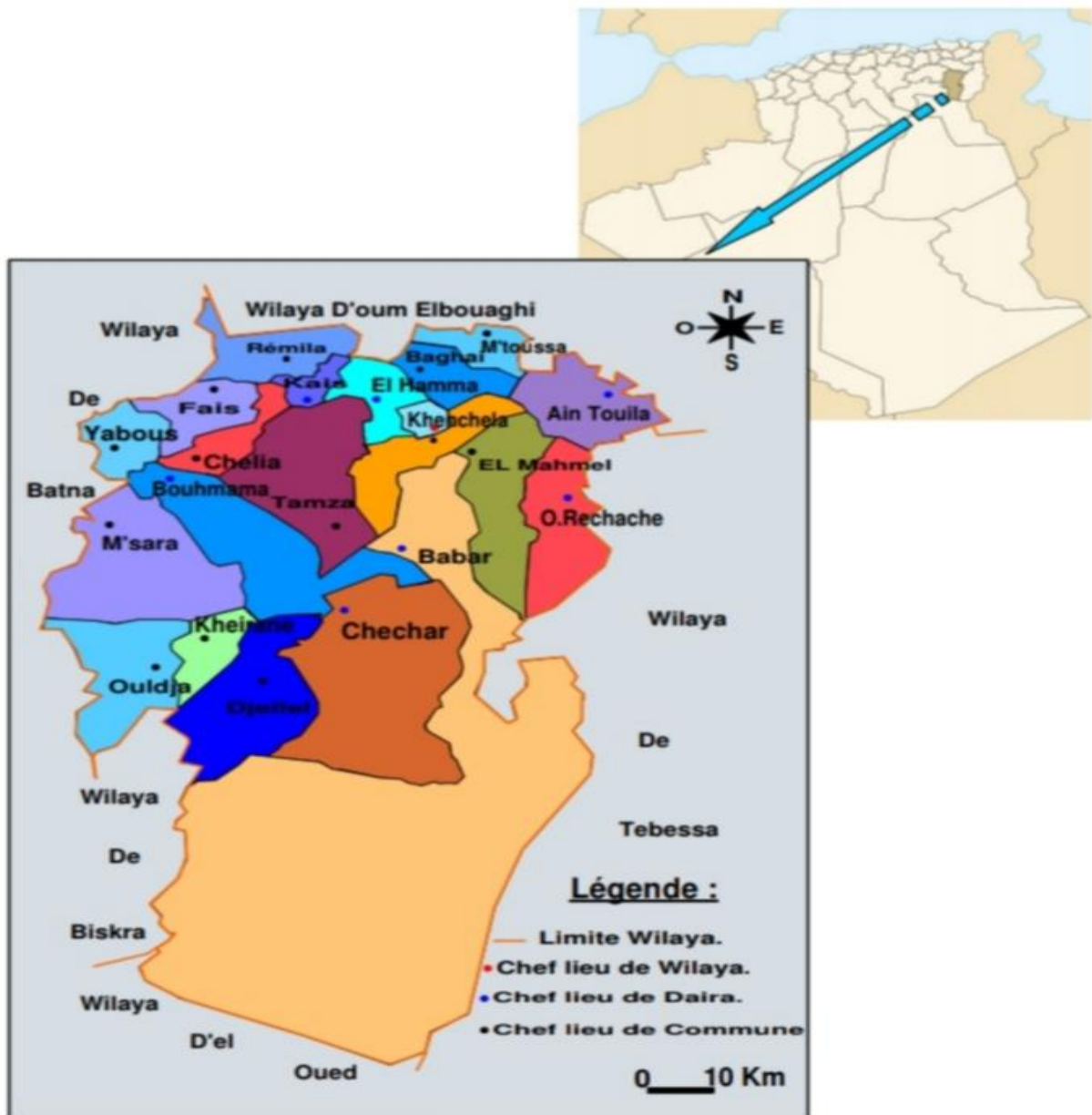


Figure 10 : Carte administrative de la Wilaya de Khenchela.

II.3. 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 évoluée au rythme de la croissance nationale, avec une population estimée à 384 268 habitants en 2008, dont 30% en milieu rurale. **(Bouafia, 2015)**

II.4. Industrielle et l'agriculture :

Pour l'industrie le secteur est faiblement représenté et les entreprises publique 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 ha soit 24.10% de la superficie agricole totale de la wilaya, la superficie irriguée est de 196.104 ha ,l'arboriculture est prédominante se propage au niveau de la zone des Hauts- plateaux et des plaines, la production arboricole connait 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.5. Présentation de site d'étude :

La station thermale Hammam Essalihine le sous bassin versant d'oued el Kissane (source thermale Hammam Essalihine) fait partie de sous bassin Gareat el Tarf qui appartient de grand bassin versant des hauts plateaux constantinois.

La station est située dans la commune d'el Hammam à 7 km au nord ouest de chef-lieu de la wilaya de Khenchela dans une dépression montagneuse sur une altitude de 1063 m aux coordonnées suivantes :

Longitude : 7°05 00.85 "Est.

Latitude : 35° 6' 3.78" Nord (Figure 11).

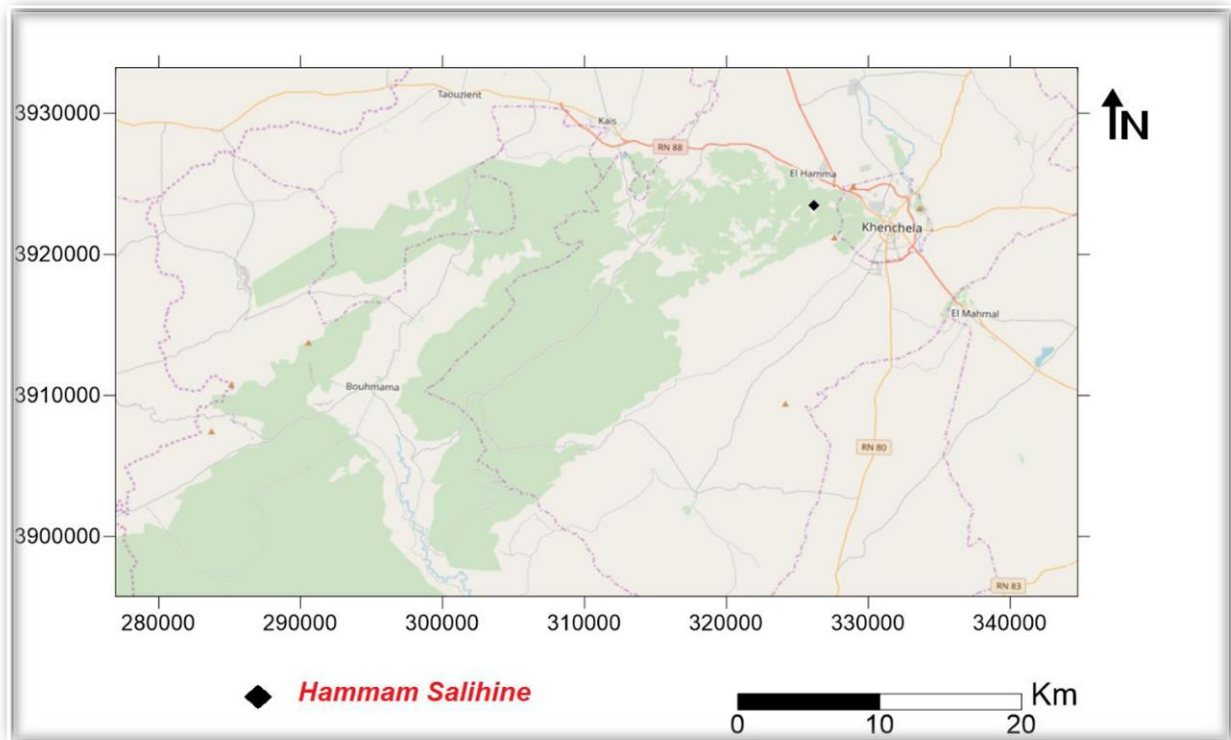


Figure 11 : Représentation du point d'échantillonnage de hammam Essalihine khenchela.

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

L'eau de cette source est efficace contre les affections dermatologiques (eczéma, kératose, psoriasis...).elle sont aussi efficace pour l'augmentation de flux sanguin et comme effet analgésique et inti inflammatoire ; indiquée aussi pour les affections de l'appareil locomoteur tel que les contractures musculaires. **(Etude d'Aménagement du site de hammam Amamra El Hamma khenchela.63, 64, 65, 72.)**



Figure 12 : Vue de l'intérieur de la station thermale hammam Essalihine, (Derction de tourisme, 2007).



Figure 13 : Le complexe de la station thermale hammam Essalihine au fond des Aurès, (Derction de tourisme, 2007).

II.6. Les sources de la région :

Les historiens, les géographes et les sociologues s'accordent sur un point commun que la création de Khenchela s'est faite autours de l'eau.

La wilaya de Khenchela est à cheval sur plusieurs régions naturelles, car elle se trouve à une sorte de la partie dont nous allons parler, s'inscrit entre la djahfa de sud, le djebel chetaia à

l'Est, le djebel Menchar au Nord. Elle renferme plusieurs groupes de sources intéressantes au point de vue hydraulique. Au Sud, nous avons la plaine de Ain Fredj ; l'Ouest, sont les vestiges particulièrement intéressantes d'Aquae Flaviana au fond de la vallée de Oued El Kissane.

De Khenchela à Frengal, au pied de Ras Serdoune apparaissent plusieurs petites sources dont deux au moins ont été captées anciennement; leurs eaux servaient probablement à des irrigations locales et peut être bien qu'il n'y ait pas de trace d'aqueducs pour alimenter les petits hameaux des M'hachas qui se trouvaient dans la plaine à quelques centaines de mètres à l'aval de ces sources.

Les ressources les plus importantes de cette plaine étaient Ain Frengal et Ain Tamaiourt. D'une très grande qualité minérale, elles sont comme Ain Silane, El Menchar, Ain Kerma et Ain Chabor, les principales sources qualitatives à sauvegarder absolument. Ces eaux doivent être intégrées dans le traitement de la cure thermale aux sources même. **(Etude d'aménagement du site de Hammam Amamra El Hamma Khenchela.63, 64 ,65 ,72.)**

II.7. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de la zone est de type endoréique, il est assez dense sur la quasi-totalité du territoire. (Figure 14)

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 ; Aourès 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 Essalihine, 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 chottes environnantes surtout le chott du Garat- Tarf. **(Bouafia, 2015)**

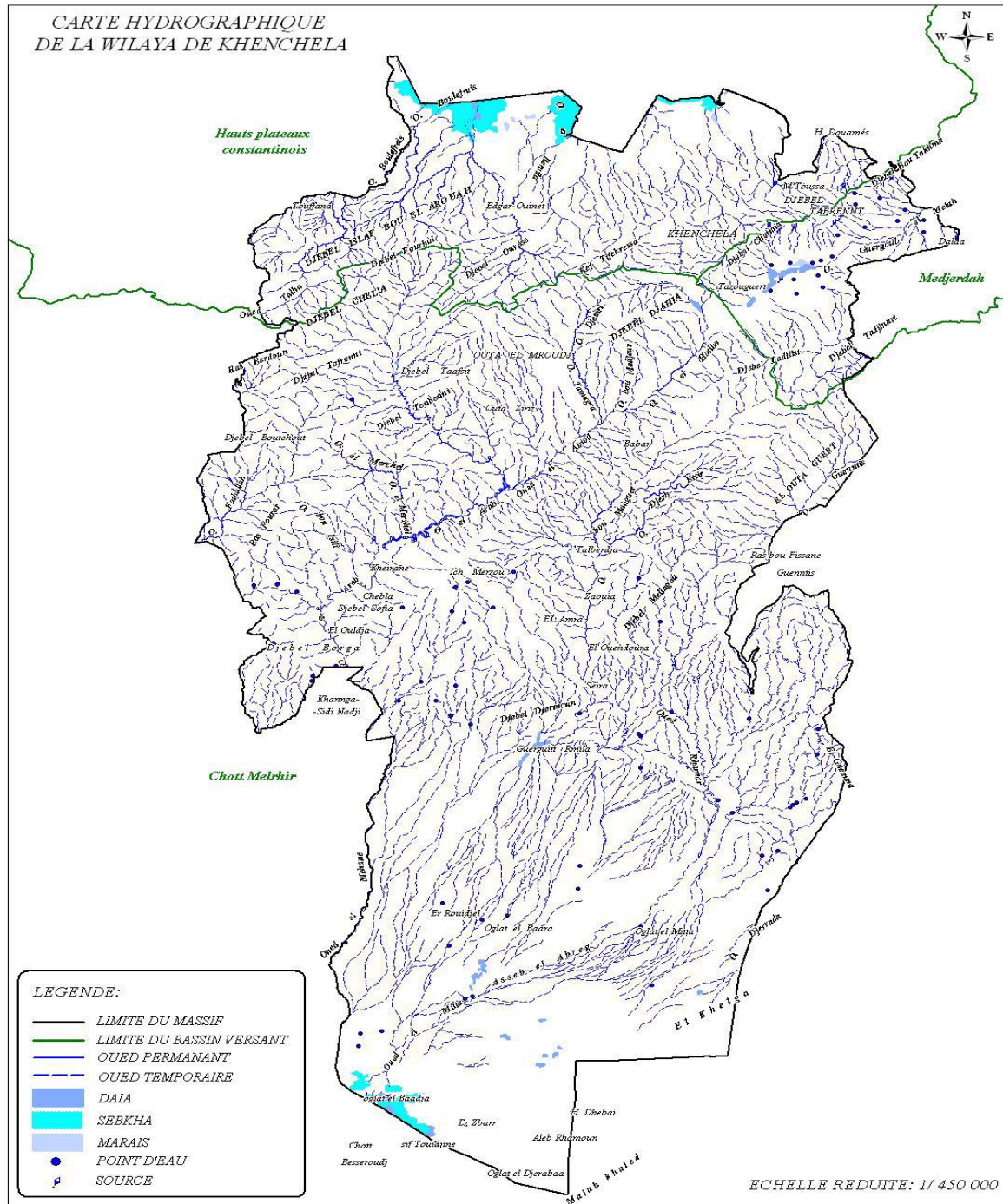


Figure 14 : Ressources hydrographique de la wilaya de Khenchela, (Derction de tourisme, (2007).

II.8. Végétation et activité humaine :

Les zones forestières occupent les reliefs montagneux des communes de la zone. La commune d’El Hamma 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.

On trouve au niveau des montagnes entourant la station thermale, culmination de 1200 à 1900 m pour KafAmalal (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, 2011)**

II.9. Aperçu pédologique sur les principaux sols de la région :

Compte tenu de la diversité des caractéristiques morphologiques, lithologiques, et climatiques du territoire de la wilaya, il en résulte un large éventail de sols, dont la formation est conditionnée par la couverture végétale. La carte pédologique de l'Algérie, établie par JH DURAND, confortée par des études ponctuelles plus récentes, permet de cerner d'une manière assez générale les principaux sols rencontrés au niveau de la wilaya. La carte des sols, dressée à l'échelle du 1/500 000 par DURAND J. H. 1954, a dénombré six classes de sols, auxquelles il convient d'ajouter la classe des sols minéraux brut (affleurement de la roche mère) et la classe des sols halomorphes (sols salés) (Figure 15):

- **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;

➤ **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 Faïs en passant par Kais 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. **(CENEAP, 2009)**

➤ **Les sols éoliens d'ablation** : Ces sols sont rencontrés au Sud de la wilaya, sur les piémonts des monts Nementchas, dont l'altitude est située entre 200 et 500 mètres.

Les sols éoliens d'accumulation : Ils sont localisés uniquement dans la zone sud de la wilaya, près du chott Melghir (Sols sablonneux).

➤ **Les sols alluviaux basiques** : Ces sols sont localisés sur des zones de changement de pente, c'est à dire les zones où la pente devient plus douce. On les rencontre principalement dans les plaines entourant les dépressions (dépression de Gâaret et Tarf, cuvette du bas Sahara, et la dépression de Tazougart), mais aussi au niveau des vallées encaissées de Babar, de Bouhmama et de la plaine de Guentis.

➤ **Les sols salins ou solontchak** : Ces sols caractérisant les dépressions sont rencontrés au niveau des zones d'accumulation. Ils sont le résultat d'une hydrologie à écoulement endoreïque ou de la présence de roches triasique (gypse : roche saline). **(Khabtane, 2015)**

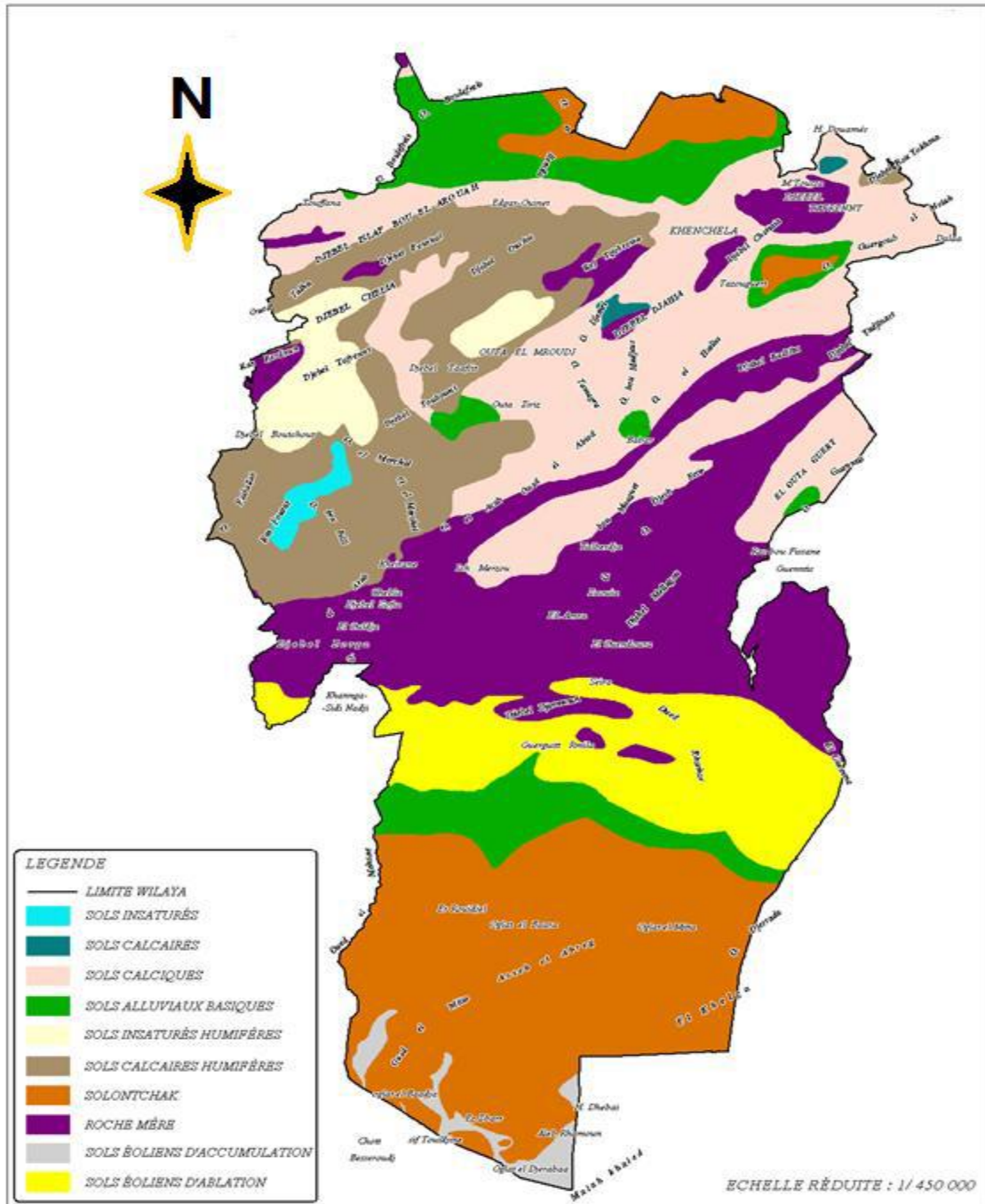


Figure 15 : la carte des classes des sols de la région de Khenchela de Durand. G. H, 1954.

II.10. Cadre géomorphologique et structural :

II.10.1. Le relief :

Le relief est la résultante de la combinaison entre deux facteurs : l'altitude et la pente ; cette dernière, par ses effets handicapants, constitue l'un des facteurs les plus contraignants pour l'aménagement du territoire en général et la mise en valeur agricole en particulier. (Figure 16)

Le relief de la zone d'étude présente, d'une manière générale, trois compartiments distincts :

➤ **Une zone de hautes plaines**, au nord, qui se singularise par une altitude d'ensemble oscillant entre 825 et 900 mètres et une pente généralement faible (inférieure à 3%). Ces hautes plaines, sorte de belvédère, constituent un prolongement Nord aux affleurements calcaires du site naturel du Hammam et occupée par la plaine de Rémila.

➤ **Une zone de montagnes :**

Au centre de la wilaya, formée par le massif des Aurès et Néménchas, dont le point culminant atteint 2169 m sur le Djebel Chélia, ce qui fait de lui l'un des sommets les plus élevés de l'Atlas Algérien. Cette zone, dont l'altitude oscille entre 1000 et 2169 mètres, est entrecoupée par des vallées étroites, de direction générale Nord-est.

➤ **Une zone de plaines steppiques et présahariennes :**

Au sud, dont une partie se situe au-dessous du niveau de la mer (Oglat El Djerabaa : moins 26 m). De topographie relativement plane, elle appartient à la grande cuvette du bassin de chott Melghir où se situe le grand Erg oriental. (DPAT. Khenchela, 2012), (Figure 17).

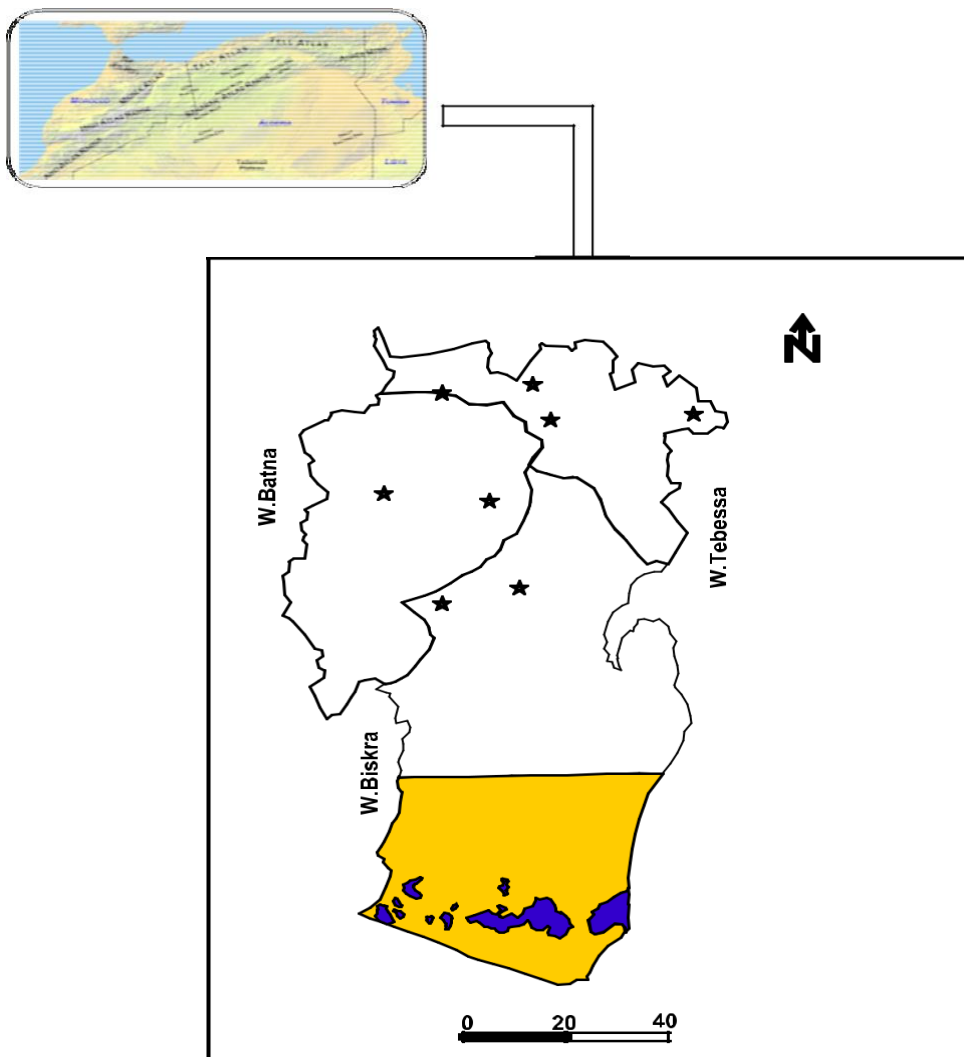


Figure 16: Carte des reliefs de la wilaya de Khenchela.

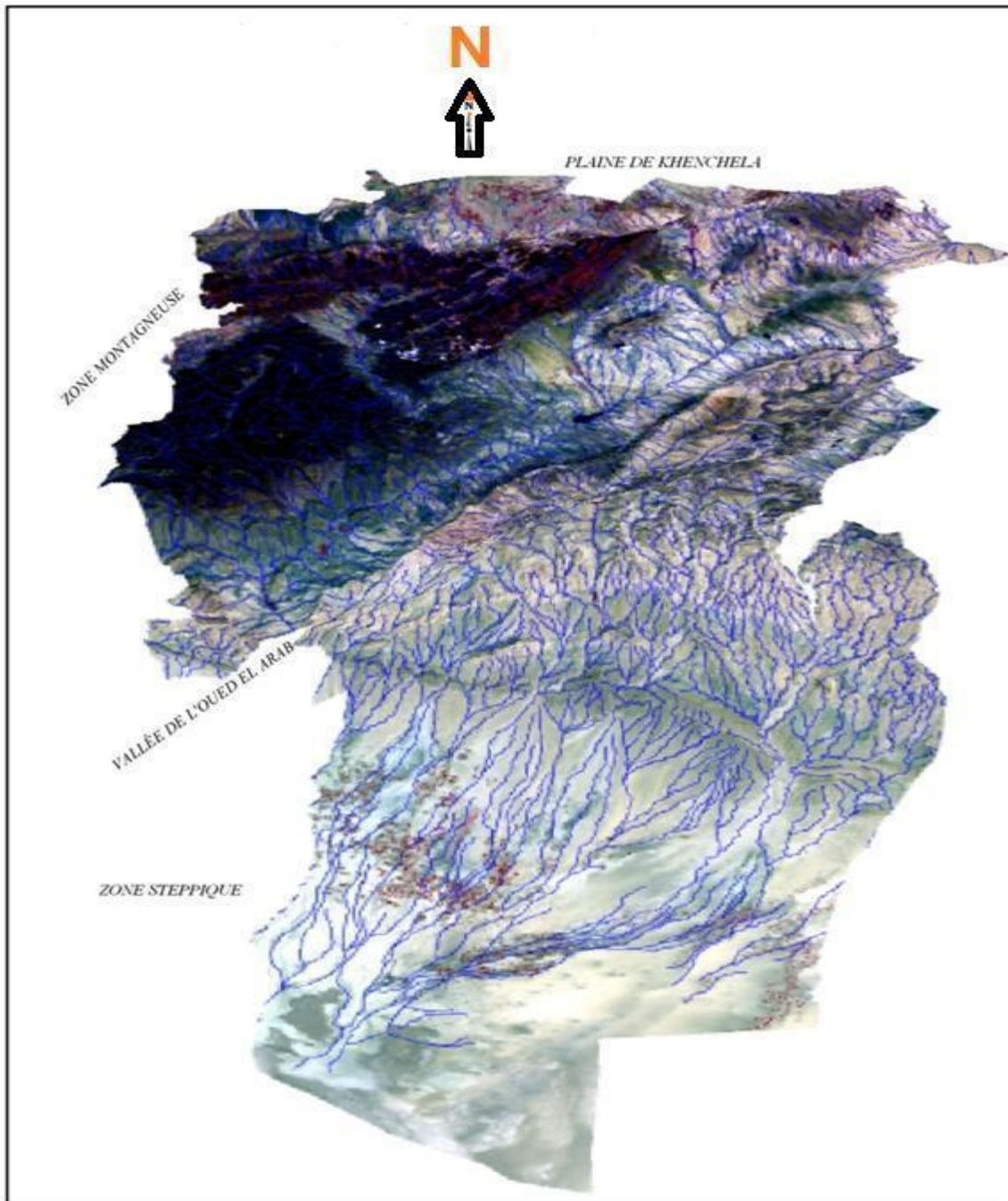


Figure 17 : Modèle numérique du terrain de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009)

II.10.1.1. 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 sudest 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. (Figure 18).

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.

➤ La classe d'altitude comprise entre 400 et 800 mètres. Cette classe, qui correspond à la zone de piémonts des Némemchas, 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.

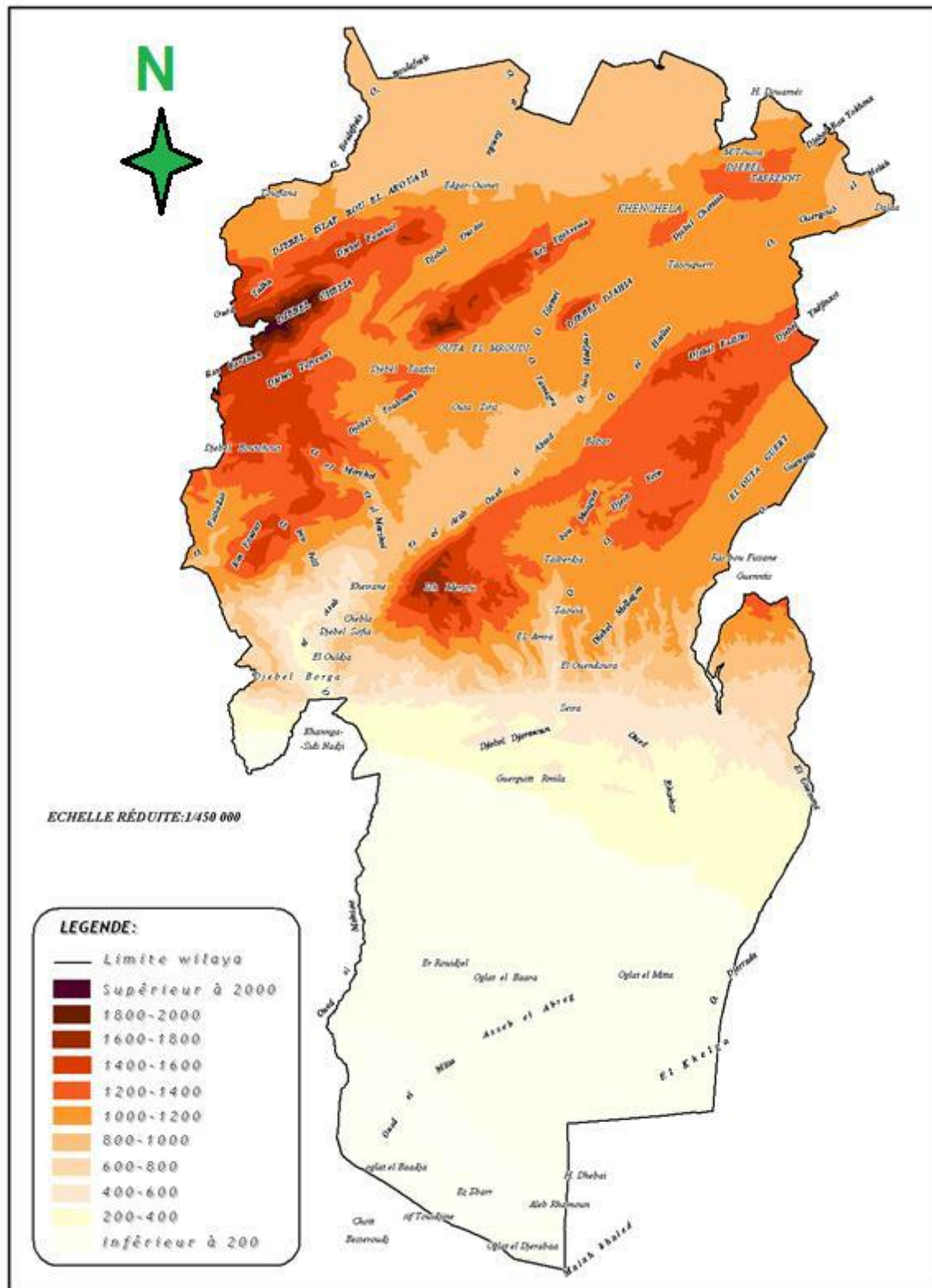


Figure 18 : la carte des altitudes de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009)

I.10.1.2. La pente :

Comme pour les classes d'altitude, une carte des classes de pente caractérisant le territoire de la wilaya a été dressée, sur la base de la grille retenue par le MATET pour le classement des zones de montagnes. Cette grille, qui tient compte de l'utilisation souhaitable des terres, préconise 04 classes (Figure 19):

Classe 1 : pente comprise entre 0 et 3,5% :

C'est une classe à topographie relativement très favorable à l'intensification agricole (mécanisation et irrigation) et à la réalisation d'infrastructures techniques, sociales et économiques à moindre coût, car facilement accessible et ne nécessitant pas d'aménagements particuliers.

Cette classe correspond aux hautes plaines du Nord, les vallées et les replats, ainsi que la basse cuvette du Sahara. Elle occupe une superficie totale de 422 500 ha, ce qui représente 44,14 % du territoire de la région ;

Classe 2 : pente comprise entre 3 et 12,5% :

Cette classe présente une pente modérée. Moyennant des techniques et mesures antiérosives, elle est favorable au développement d'une agriculture intensive à semi intensive (selon l'intensité de la pente). Sur les sols à structure géologique plus ou moins stable, c'est aussi une classe favorable à la réalisation d'infrastructures techniques, sociales et économiques, mais avec coûts légèrement plus onéreux qu'en classe 1. Elle correspond généralement aux terres de bas piémonts, où l'agriculture reste possible et où l'écoulement des eaux (ruissellement) est important. Elle occupe une superficie totale de 216 977 ha, ce qui représente 22,67 % du territoire de la région ;

Classe 3 : pente comprise entre 12,5 et 25% :

Cette classe présente une pente relativement importante. Au plan agricole, l'utilisation souhaitable des terres relevant de cette classe doit privilégier l'arboriculture fruitière et autres cultures pérennes fixatrices du sol au détriment des cultures annuelles et notamment les grandes cultures, dont les travaux du sol favorisent l'érosion et accélèrent son processus. Les mesures et techniques antiérosives au niveau de cette classe sont non seulement recommandées mais impératives.

Concernant les infrastructures sociales, économiques, et les installations techniques, leur réalisation devra prendre en considération les spécificités locales, ce qui suppose des aménagements appropriés et des surcoûts souvent considérables.

Elle correspond aux piémonts à utilisation agro-sylvo-pastorale. L'écoulement des eaux est très important, et cause souvent des dégâts considérables aux sols cultivés (érosion). Elle

occupe une superficie totale de 151 712 ha, ce qui représente 15,85 % du territoire de la région ;

Classe 4 : pente supérieure à 25% :

C'est une classe qui présente une pente excessivement marquée, constituant de ce fait une contrainte majeure pour la pratique des activités agricoles et un handicap pour la réalisation des infrastructures socioéconomiques. A ce titre, l'occupation du sol au niveau de cette classe doit privilégier la sylviculture. Elle correspond en général aux territoires de haute montagne. Elle occupe une superficie totale de 166 061ha, ce qui représente 17,35 % du territoire de la région ;

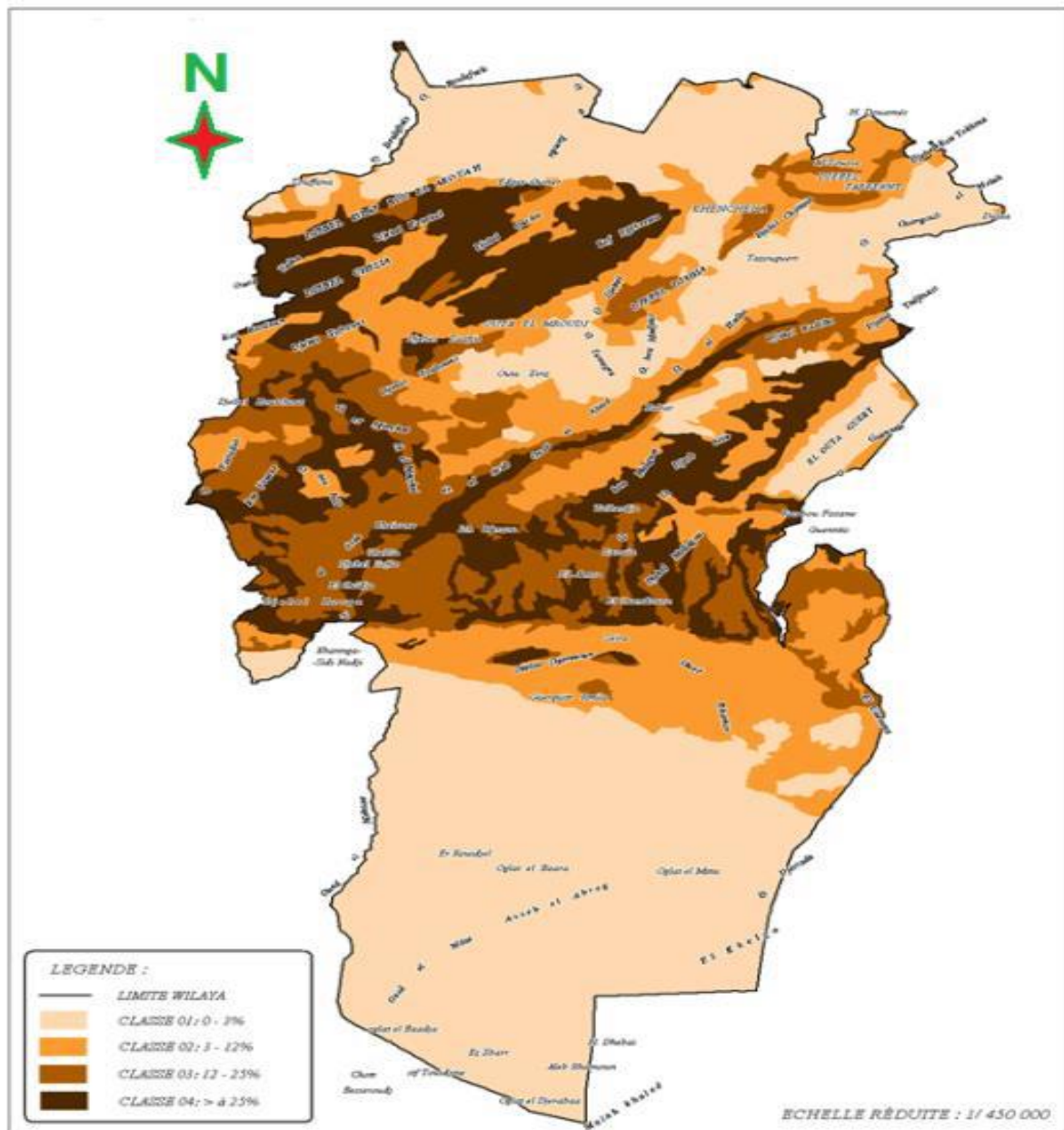


Figure 19 : la carte des pentes de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009)

Géomorphologie de la dépression de Hammam Essalihine La station thermale Hammam Essalihine se situe dans un étroit graben, entouré par des reliefs de tout bord. Dont on peut citer Dj. Aidel au Sud, Dj. Aurès et son prolongement dj Feraoun à l'Ouest de La commune d'El-Hamma au Nord et une chaîne de collines à l'est.

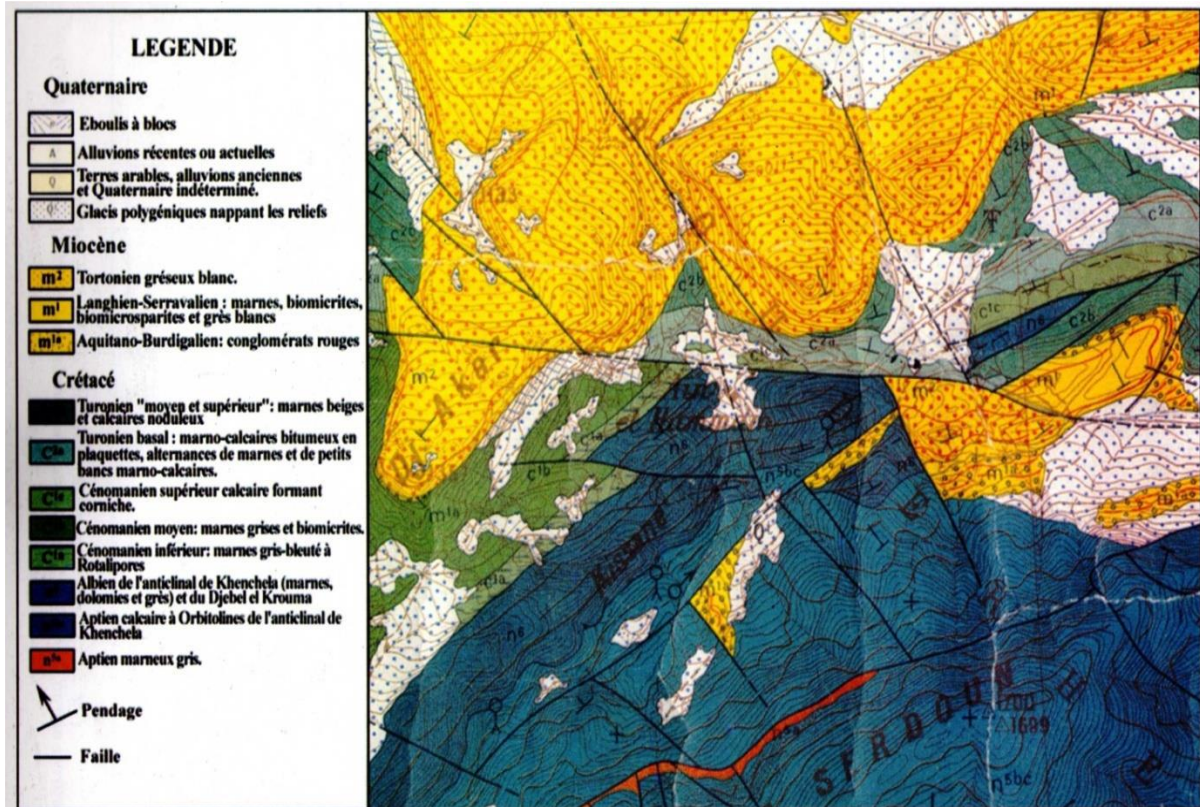


Figure 20 : carte géologique de Hammam Essalihine, Khenchela, « extrait de la carte géologique de khenchela au 1/50000 (sonatrach.1997) ».

II.9.2. Cadre structural :

La zone d'étude est caractérisée par un anticlinal naissant sous forme de repli à 70 Km à l'ouest de Khenchela, dans des terrains nummulitiques du synclinal des Rassira, mais il est à peine sensible, il se continue vers le Nord-Ouest au milieu des terrains de crétacé supérieur en s'accroissant légèrement.

A partir du Djebel Tanout à 45 Km à l'ouest de Khenchela, l'anticlinal subit un abaissement d'axe et un faible décrochement correspondant à l'accident du Djebel Chélia. Plus loin, à partir d'Ain Giuiguel, un relèvement d'axe rapide fait apparaître le crétacé inférieur, où le synclinal du djebel Aidel fait apparaître la base du barrémien ou le sommet de l'interviens.

Sur le plan sud du djebel Aidel, au sein des quartzites particulièrement durs du barrémien, on voit un repli synclinal très aigu, contrastant avec l'allure tranquille de l'ensemble de

l'anticlinal, se repli est particulièrement visible lorsque, de chentagoum au Sud-Ouest de Khenchela (2119 m), on regarde le versant sud-est du Djebel Aidel. Ce dispositif semble un cas particulier.

Vers le Nord-ouest, l'anticlinal subit un abaissement d'axe et les terrains crétacés inférieurs disparaissent aux environs de Khenchela. Dans cette région, l'anticlinal est accidenté de failles qui précipitent la disparition du crétacé inférieur sur son plan nord.

La présence de ces failles est marquée par la présence de thermes (Aqua-Flavianus), situés à 7 Km à l'Ouest de Khenchela, dont l'eau riche en chlorure de sodium et sulfate de calcium, sort à la source à une température de 70 °C. L'origine de cette eau doit être recherchée dans le trais qui forme en effet, le proingement de cet accident à 4 Km vers le Nord-est. **(Berkani, 2011)**

II.10.2.1. Localisation et âge de mise en place du trias :

Le pointement triasique se trouve dans les marnes et calcaires du cénomaniens supérieur du turonien. L'absence du relief et la présence d'un manteau d'alluvions quaternaires assez épais, rendent difficile l'observation des contacts précis du trias et des terrains encaissant. **(Berkani, 2011)**

II.11. Cadre géologique

Nos connaissances géologiques sur la région d'étude sont largement inspirées des travaux et études régionaux et des synthèses sur le massif des Aurès sur les hautes plaines steppiques et sur les zones humides. La plupart de ces études ont été axées sur les caractères Stratigraphiques, géomorphologiques, sédimentologiques et structurales **(R. Laffitte1939, R. Guiraud 1973, C.G.G. 1969, J. M. Vila 1977, B. Houha 1996 et 2007)**.

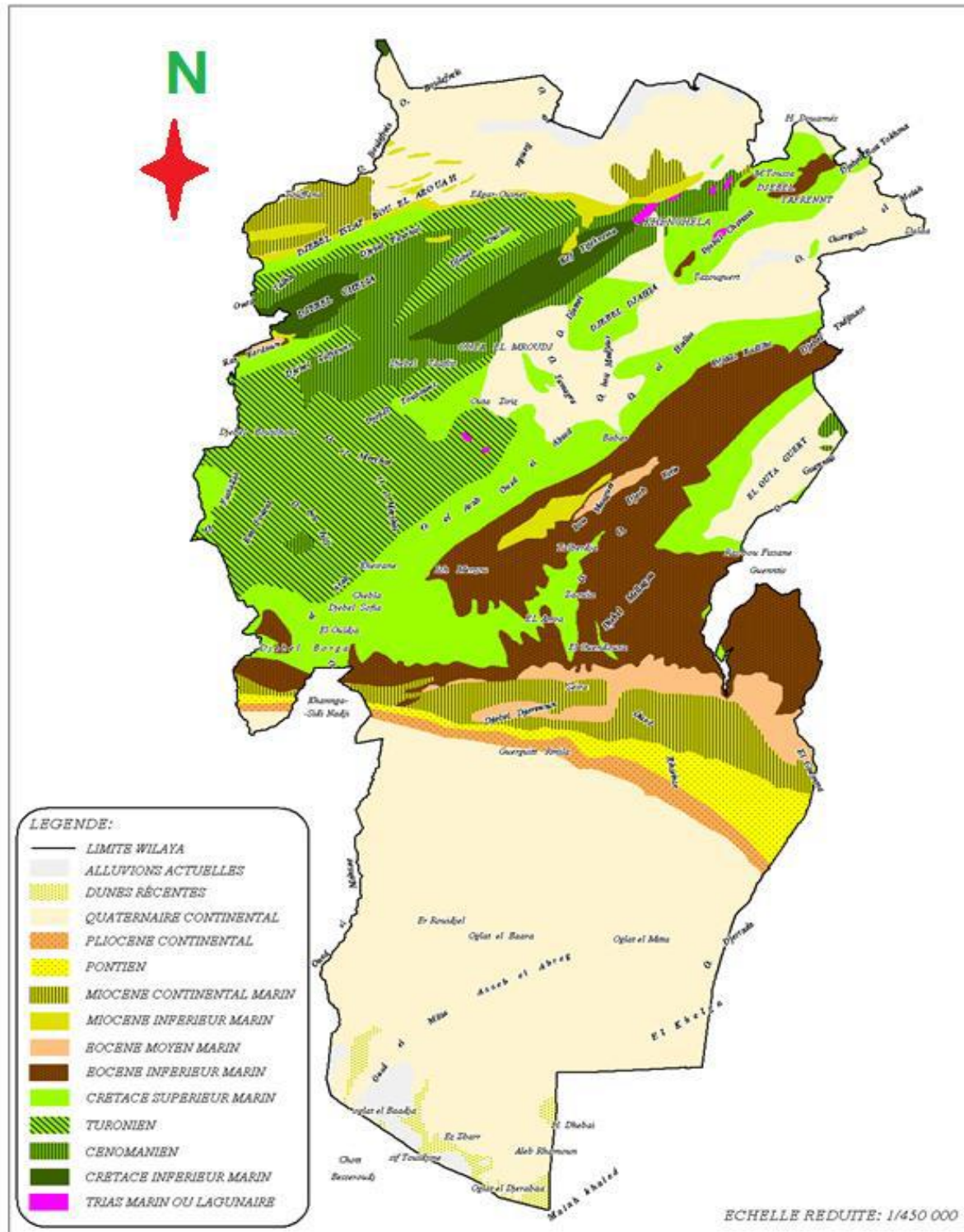


Figure 21 : la carte géologique de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009)

II.11.1. Litho stratigraphie

La puissante série stratigraphique du bassin étudié est composée à sa base par un socle mésozoïque sur lequel repose, en discordance, une couverture sédimentaire allant du Trias supérieur jusqu'au Quaternaire. (Houha, 2007), (Figure 23).

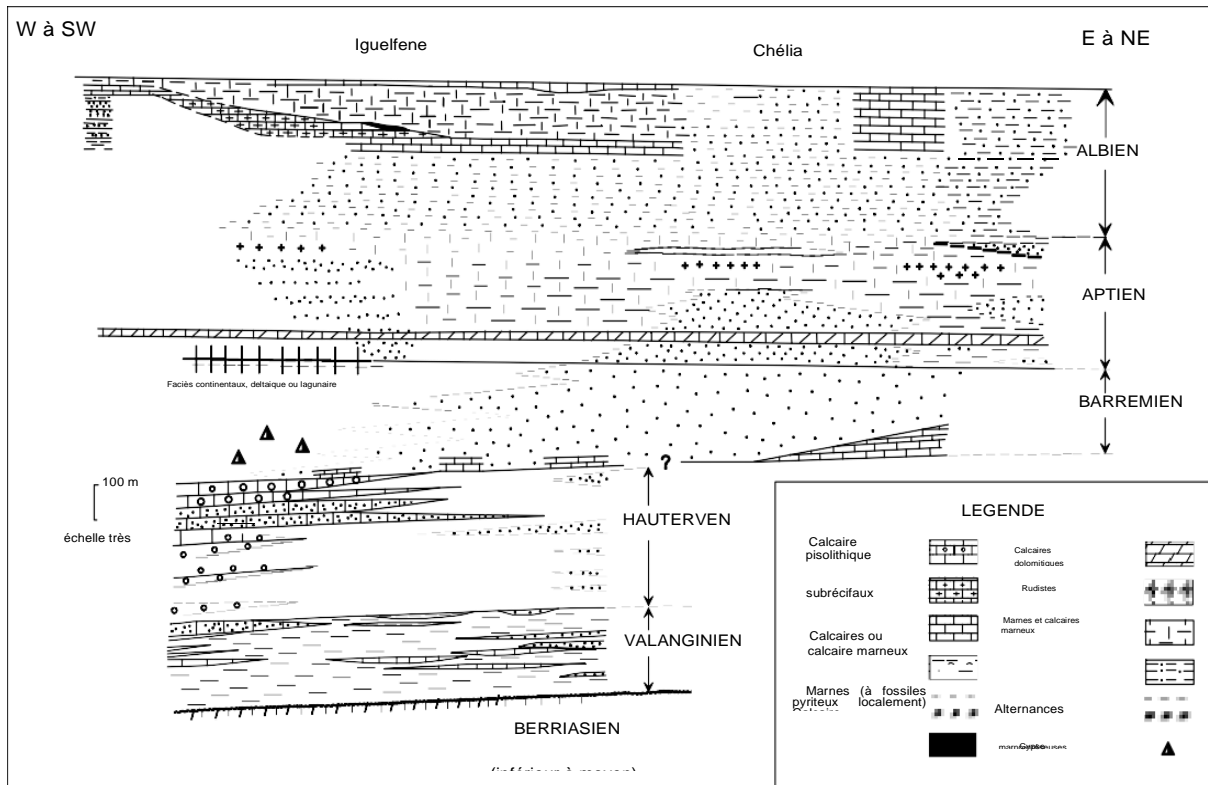


Figure 22: Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de d'après R. Laffitte (1939) et modifié par R. Guiraud (1973).

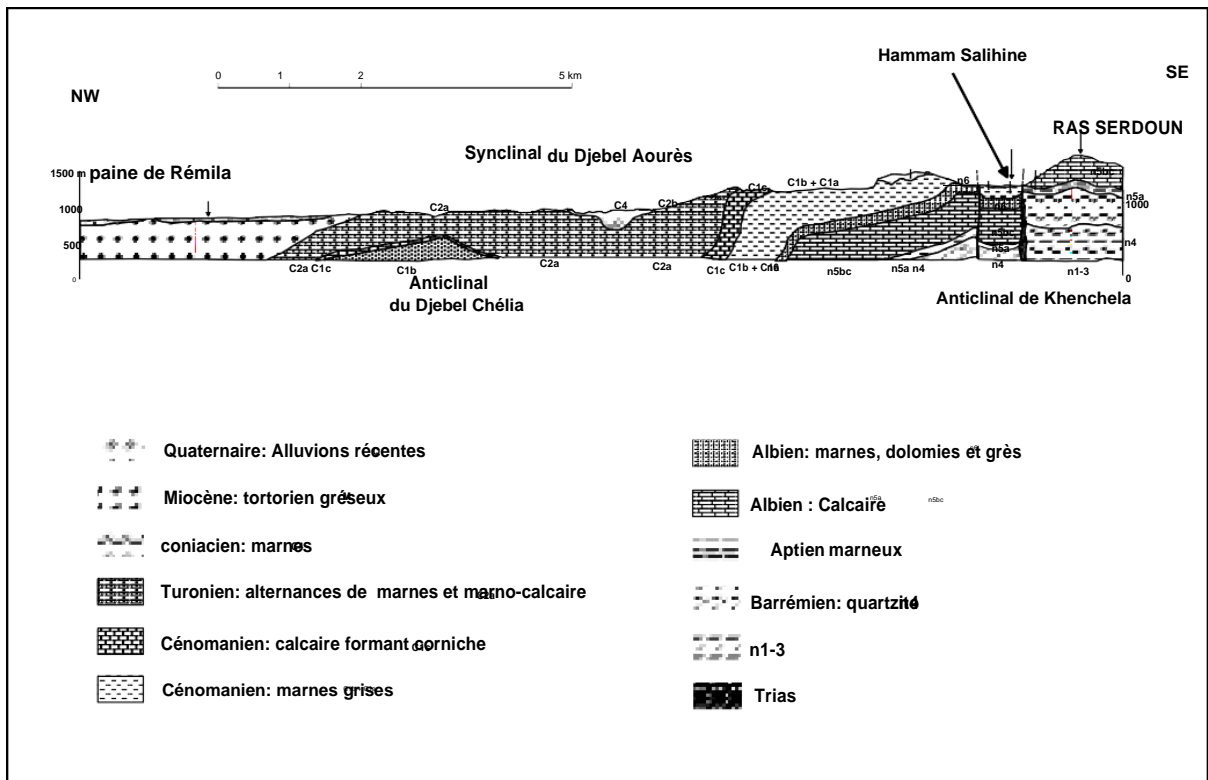


Figure 23: Coupe interprétative dans le bassin de Rémila (VILA, 1977)

II.11.1.1. Le Mésozoïque :**A. Trias :**

Dans les régions qui entourent la dépression de Hammam Essalihine 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 de 300 à 400 m de large et, du côté de Ain Silen en contact anormal avec l'Albien.

La série triasique comportait probablement à l'origine, de la base vers le sommet : une formation évaporitique épaisse, en particulier sous la forme d'amalgames intensément replissés, représentent les indices les plus sûrs de la présence du Trias.

Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux. (Houha, 2007)

L'abondance du sel caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela et Ain Silen, 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 anté-miocènes, il a disparu depuis longtemps. 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 bleuté à noirâtre, généralement bien stratifiés et présentant parfois quelques passées marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques.

B. Le Crétacé :**B.1. Crétacé inférieur :**

Dans le vaste massif de l'Aurès, le Crétacé inférieur constitue l'essentiel des reliefs les plus élevés : Dj. Chelia et Dj. Aidel (Figure 23).

R. Laffitte (1939) a soigneusement décrit la plupart des faciès et c'est à partir de ses descriptions, modifiés ou complétés en quelques points, que R. Guiraud (1973) a établi la qui résume de façon schématique les principales variations observables.

On notera dans l'Aurès le développement important des dépôts gréseux aux dépens des dépôts carbonatés.

B.1.1. Barrémien- Aptien :

Dans le sud-ouest du massif de l'Aurès, le Barrémien est représenté par un faciès continental net grès à dragées, marnes rouges, montant jusque dans l'Aptien. Lorsque l'on se déplace vers le Nord-Ouest, les couches passent à des marnes fossilifères (Aptien inférieur) au sommet.

Dans le S.E présentent, surtout à la base de l'étage, des intercalations de calcaires marins (Djebel Aidel), l'épaisseur de l'étage varie de 400 m environ (Sud) à 250 m (Nord).

Les couches précédentes sont surmontées par des marnes puis par des masses calcaires avec rares intercalations marneuses. Une barre de calcaire dolomitique roux, reconnu à ce niveau dans le massif de Khenchela. Viennent ensuite des calcaires à Orbitolines, pouvant alterner avec des marnes et surtout des grès. (Houha.B, 2007)

Enfin R. Laffitte a remarqué la présence assez constante, au-dessus des calcaires à Orbitolines d'un niveau peu épais (quelques dizaines mètres au maximum) de marnes ou calcaire marneux.

B.1.2. Albien :

L'Albien débute dans l'Aurès (Figure 23), selon la description de R. Laffitte, par des alternances de grès et de marnes atteignant le plus souvent 150 à 200 m d'épaisseur. Puis les calcaires, assez rares jusque-là, tendent à se substituer aux grès, sur une cinquantaine de mètres environ. Au-dessus de ces assises viennent des alternances de calcaires et de marnes (40 m environ)

L'Albien affleure dans les anticlinaux de l'Aurès (Figure 23), en bordure Sud du bassin de Rémila au cœur de Djebel Aidel dans l'anticlinal de Khenchela où l'on distingue un ensemble à dominante marneuse surmonté par des grès fins. le passage aux marnes cénomaniennes étant assez progressif.

B.2. Crétacé supérieur :

Le Crétacé supérieur forme l'essentiel des affleurements mésozoïques dans les confins de l'Aurès.

B.2.1. Cénomaniens :

Le Cénomaniens comporte une série de marnes grises dans lesquelles s'intercalent des calcaires fins argileux, une partie médiane formée de marnes grises, vertes ou ocre, contenant parfois du gypse diffus ainsi que des passées argileuses (Figure 23).

Le Cénomaniens est présent dans tous les anticlinaux de l'Aurès (Figure 23). Il est essentiellement calcaro-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.

B.2.2. Turonien :

Le Turonien comporte, en effet, au-dessus des marno-calcaires de base, un ensemble de marnes beige et calcaires. Dans le Djebel 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 300 mètres dans les calcaires.

B.2.3. Sénonien :

Le sénonien est présent au Sud de la plaine de Rémila, sur le flanc Nord de l’Anticlinal du Djebel Chélia avec un faciès principalement marneux. Son épaisseur peut être très importante et atteindre 1000 à 2000 m.

II.11.1.2. Le Cénozoïques :

A. Le Néogène :

Le Néogène est assez bien conservé au Nord de l’Aurès dans un bassin qui s’étend approximativement de Batna à Khenchela (Figure 23).

Reposant en discordance sur le Crétacé on observe généralement à la base de la série des conglomérats et calcaires à Algues, dont la puissance dépasse rarement une vingtaine de mètres. Au-dessus viennent des alternances de marnes gréseuses gris-brun et de grès calcareux qui, d’après R. Laffitte (1939), peuvent se poursuivre aux environs 250 m entre Lambèse et Timgad et 300 m entre Khenchela et Kais sur la bordure Nord du massif de l’Aurès, où elles sont surmontées par 250 m de marnes gréseuses grises. 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.

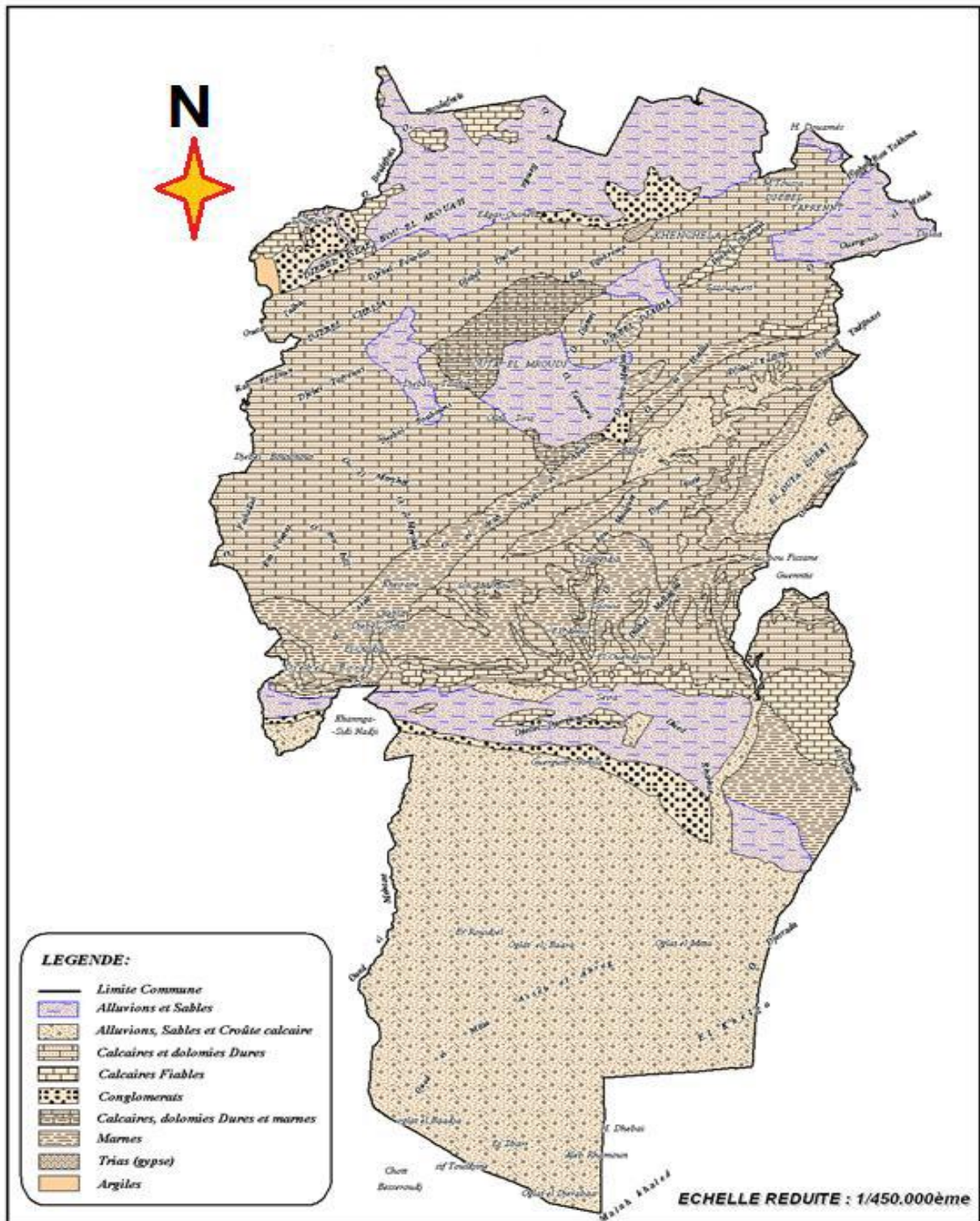


Figure 24 : la carte lithologique de la région de Khenchela (source CENEAP P.A.D.D de la wilaya de Khenchela, 2009)

II.11.1.3. Quaternaire:

Le Quaternaire ne comporte que des formations continentales généralement épaisses par endroits, souvent en présence de croûtes calcaires.

CGG (1970), Laffitte (1939), Lessard (1951), Gasmi (1989) et Durozoy (1948) (VILA J.M., (1977) ont eu le mérite de présenter successivement de courtes synthèses dans lesquelles les principaux problèmes étaient abordés.

Mais la seule analyse stratigraphique, Tectonique et morphologique assez poussée publiée est celle de R. Laffitte (1939) qui est, malheureusement, limitée au voisinage de l'Aurès et ses confins.

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 (Figure 23).

Les piémonts sont ici généralement modelés en glacis à couverture détritique peu épaisse, dont le plus visible est situé au sud d'El Hamma et Kais, à matériel grossier. Ces glacis sont constitués au voisinage immédiat des reliefs par des alternances de couches de cailloutis et blocailles et de colluvions avec un enrichissement en calcaires dans les horizons superficiels. (HOUHA, 2007)

Lorsqu'on s'éloigne du piémont l'épaisseur des couvertures de glacis diminue rapidement. Les formations anciennes sont constituées par des alternances de conglomérats et de sables surmontés par des sédiments fins argilo sableux, rouge au sommet desquels apparaît une croûte calcaire.

Des alluvions récentes constituent la plaine de Rémila ainsi que les bas-fonds des principales vallées provenant des reliefs environnants.

L'examen de quelques coupes de forges, montre que la sédimentation est en majeure partie argileuse et marneuse, avec une proportion importante de gypse et présente un maximum d'épaisseur au centre de la plaine et au voisinage du Chot.

Au Sud du bassin, dans la région de Kais à El hamma, le Plio-Quaternaire est constitué d'alluvions récentes formé de graviers et galets roulés à éléments gréseux sur une épaisseur de 3m 50cm. En dessous on trouve des alluvions marneuses d'épaisseur inconnue d'une épaisseur de 7m 50cm.

Les éboulis sont constitués par des blocs de grès toutes tailles. Un cône de déjection torrentiel qui occupe la partie Sud-est et est formé de cailloux gréseux et d'argile sableuse d'une épaisseur de 3m. (Houha, 2007).

II.12. 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 III

étude hydro climatique

Traite des aspects hydrodynamiques du système. Les entrées du système (infiltration ET pertes du réseau hydrographique) sont quantifiées et également l'aspect climatologique est étudié et le climat de la région est analysé.

III. Introduction

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

Le relief caractérisé par les derniers chaînons de l'Atlas saharien et formant une barrière aux influences méditerranéennes accentue les contrastes climatiques entre l'Atlas saharien et la plate forme saharienne.

Les aires climatiques semblent, donc se superposer sur les grands ensembles morpho structuraux. Ainsi, les derniers chaînons de l'Atlas saharien marquent la limite du climat aride.

L'étude des données climatiques permet d'analyser les facteurs du climat de cette zone qui nous informera sur :

- Le type du climat;
- Les caractéristiques de bilan hydrique du bassin versant ;
- La structure de variation temporelle des termes du bilan (Pluies, évaporation) ;
- Le comportement hydro-climatologique du bassin versant.

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

III.1. La station météorologique

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 une gamme thermique large, et une variation pluviale d'une année à l'autre (D.H.W., 1987).

Pour caractériser la nature des variations climatiques mensuelles et interannuelles dans notre région d'étude nous avons choisi la station météorologique, d'El Hamma. Nous disposons pour cette station des données, étalant sur une durée de 10 ans d'observation.

Tableau 05 : Données géographiques de station météorologique avec la série d'observation.

Stations	Latitude	Longitude	Altitude	Série d'observation
El Hamma	35°20'N	07°-05° E	982.5m	2008-2018

Source: station météorologique d'Elhamma

III.2. Les paramètres climatiques :

Les données de température et de précipitation correspondent à des hauteurs mensuelles des pluies et de température qui ont été recueillies à la station de l'office national de météorologie (ONM) d'El Hamma situées à 890 m d'altitude suivant une période de mesures de 10 ans.

III.2.1. Les précipitations :

Les précipitations permettent la constitution d'un stock d'eau qui va être soumis à plusieurs processus et particulièrement les processus d'évapotranspiration, de ruissellement de surface et de pertes par infiltration (**Chaponnière, 2005**). Pour cela toute étude climatologique nécessite une analyse détaillée de ce paramètre, du fait que la pluie est un facteur qui conditionne l'écoulement saisonnier et par conséquent le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes.

En dehors de la région montagneuse du Nord-Ouest (DJ.Chelia et DJ.Aidel) qui reçoit entre 700 et 1200 mm de pluies par an et du sud (les parcours sahariens) qui reçoit moins de 200 mm de pluies par an (Oued EL Maita) ; le reste du territoire de la wilaya est compris entre les isohyètes 200 et 600 mm (de pluies par an) (**ANDI, 2013**)

III.2.1.1. Variations moyennes mensuelles des précipitations

Les régimes des précipitations mensuelles sont à l'origine de l'écoulement saisonnier, des régimes de cours d'eau, de l'adaptation de la végétation et du développement de l'agriculture.

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de 10 ans (2008 /2009 -2017/2018), montre que le mois de septembre est le plus pluvieux, avec 51 mm, alors que le mois de juillet est le plus sec, avec 11 mm et la saison la plus pluvieuse c'est l'automne avec 126 mm. L'amplitude de précipitation est de 40 mm.

Tableau 06 : Précipitations moyennes mensuelle durant la période (2008-2018)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
P en (mm)	38,96	36,48	48,44	48,45	66,90	22,58	16,63	35,55	50,47	47,96	27,75	27,84

Source: station météorologique d'Elhamma

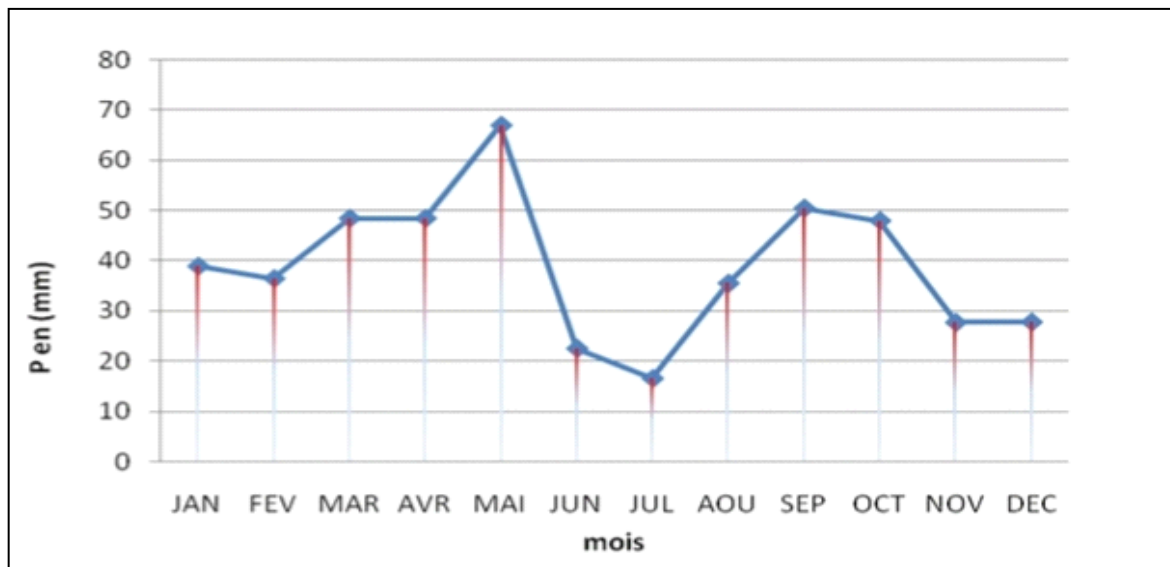


Figure 25 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station d'El Hamma pour la période (2008/ 2009 -2017/2018)

III.2.1.2. Variations interannuelles des précipitations

Variations interannuelles des précipitations Pour étudier ces données, nous nous sommes basés sur une série de mesures s'étalant sur la période allant de 2008 à 2018. Cette série permet de dire que: La répartition des précipitations interannuelles à la station d'El Hamma est extrêmement irrégulière d'une année à l'autre. Le maximum de la pluviométrie a été observé en 2011 avec 626,3 mm et alors que le minimum a été enregistré en 2017 avec 273 mm. Le module pluviométrique interannuel est égal à 449,65 mm

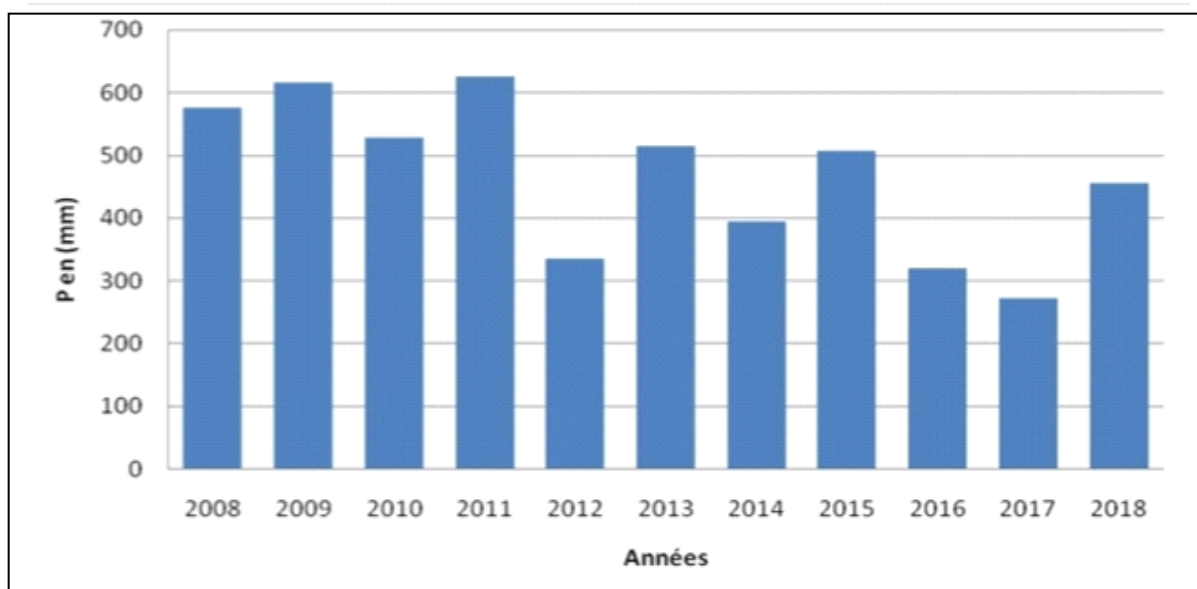


Figure 26 : Evolution des précipitations annuelles à la station d'El Hamma pour la période (2008/2009 -2017 /2018)

III.2.2. Les températures :

La température est un facteur essentiel dans l'évolution du déficit d'écoulement qui entre dans l'estimation hydrogéologique, ce paramètre est indispensable à la climatologie, vu de son pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées, et qu'il est à l'origine du bon fonctionnement du cycle de l'eau.

III.2.2.1. Variations de la température moyenne mensuelle :

La température moyenne mensuelle présente de très variations saisonnières elle atteint leur minima au mois de février avec 6,8 °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 27,30 °C.

L'amplitude maximale des variations des températures mensuelles moyennes interannuelles s'observe entre ces deux mois avec 17,74 °C.

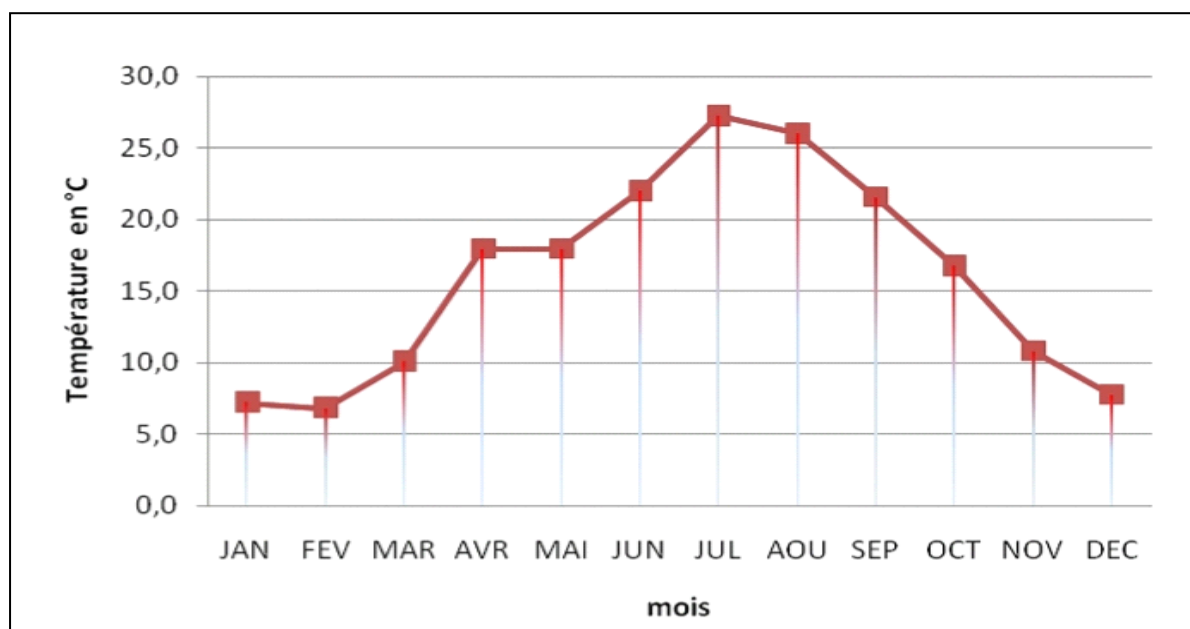


Figure 27 : Variation de la température moyenne mensuelle d'El Hamma pour la période (2008/2009-2017/2018)

III.2.2.2. Variations des températures moyennes annuelles :

Les histogrammes représentant la variation annuelle de la température, sur une période de 10 ans (2008/2009-2017/2018), montre que l'année la plus chaude est l'année 2016/2017 avec une moyenne de 20,10 °C, et l'année la plus froide est l'année 2015/2016, avec une moyenne de 15,20 °C. Signalons que la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 16,00 °C.

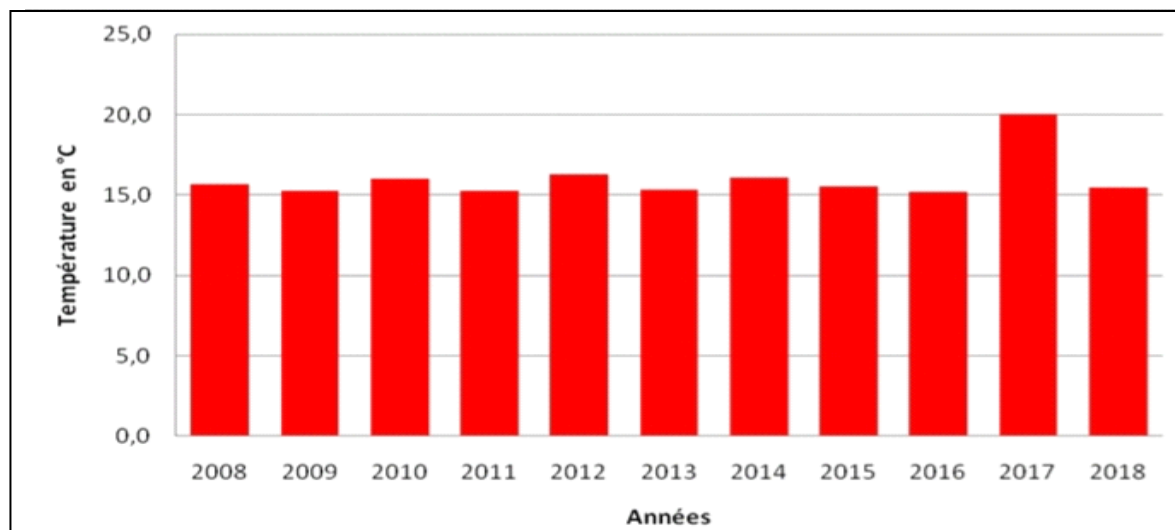


Figure 28 : Evolution de la température moyenne annuelle à la station d’El Hamma pour la période (2008/2009-2017/2018)

III.2.3. Le vent :

Les vents sont caractérisés par leurs direction, leurs vitesses et leur intensités, dans notre région les vents prédominants sont de direction Nord-Ouest qui soufflent surtout en hiver apportant des pluies, et Sud-ouest (sirocco) c’est le vent chaud et sec qui engendre des fortes évapotranspirations, dont la vitesse moyenne est de 2.7 m/s. (Bouafia.H, 2015)

III.3. Synthèse climatique

La combinaison de deux principaux facteurs climatiques: la température et les précipitations permettent de déterminer les périodes sèches et humides ainsi que la localisation de l’étage bioclimatique bien définie d’une région donnée à l’aide du Diagramme ombro-thermique et du coefficient pluviométrique d’EMBERGER (Qp). (Ladlani I. 2007)

III.3.1. Diagramme Ombrothermique de Gausсен.

D’après la courbe pluvio-thermique, on peut distinguer la période humide de la période sèche.

Selon Gausсен une période sèche est une période pendant la quelle les précipitations totales inférieures ou égales au double de la température : $P \leq 2T$ (période sèche).

Une période humide est une période pendant la quelle les précipitations totales égales au double de la température : $P=2T$.

Avec ; P : précipitations moyenne mensuelle en mm.

T : température moyenne mensuelle en °C.

Le diagramme de Gaussen, fourni une représentation plus concrète du climat au cours de l'année.

Tableau 07 : Précipitations moyennes mensuelles et températures moyennes mensuelles de la période (2008-2018)

MOIS	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
P en (mm)	38,96	36,48	48,44	48,45	66,90	22,58	16,63	35,55	50,47	47,96	27,75	27,84
T Moy °C	7.2	6,8	10,10	14,30	18,0	22,0	27,3	26,0	21,6	16,8	10,8	7,7

La figure : Montre que la période sèche de la fin de mai jusqu'au début de septembre. L'analyse des températures et des précipitations permet de tracer le diagramme ombrothermique, suivant :

$$P = 2T$$

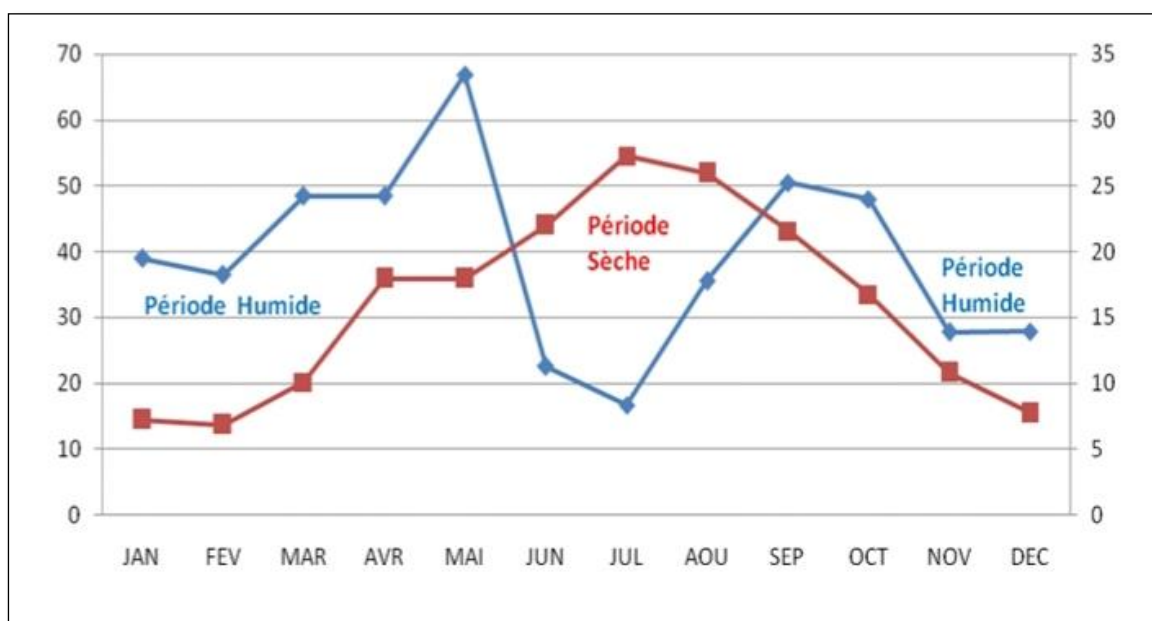


Figure 29 : Diagramme Ombrothermique de la station d'El Hamma

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.

III.3.2. Indice d'aridité de Martonne

En 1925 Emmanuel De Martonne a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité (Ia). 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. Ce paramètre se calcule selon la formule suivante $I_a = P / T + 10$

Avec :

Ia : indice d'aridité

P : précipitations cumule annuelles (mm).

T : températures moyennes annuelles (°C).

Les valeurs de l'indice permettent de déterminer le climat selon le classement suivant :

Quand

$I < 5$: le climat est hyperaride.

$5 < I < 7.5$: le climat est désertique.

$7.5 < I < 10$: le climat est steppique.

$10 < I < 20$: le climat est semi-aride.

$20 < I < 30$: le climat est tempéré.

$I > 30$: le climat est humide. (Aouidane, 2017)

Dans notre cas, la moyenne des précipitations interannuelles est : 468,01 mm. Alors que la température moyenne annuelle est de : 15,7 °C

Ce qui donne : $I = 18,21$

Nous avons trouvé que la valeur de (I) est comprise entre 10 et 20, ce qui permet de dire que la station d'El Hamma bénéficie d'un climat semi-aride.

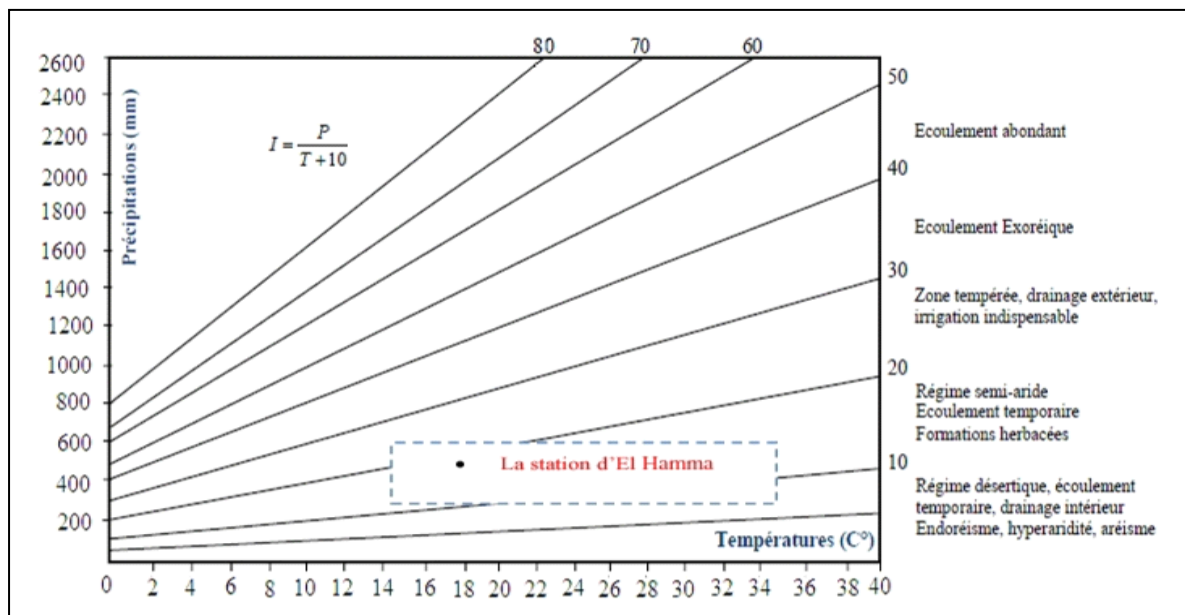


Figure 30: Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne

III.4. Étude de l'évapotranspiration:

L'évapotranspiration constitue l'élément le plus important du bilan hydrologique après les précipitations, représentée par une quantité d'eau et restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur. L'évapotranspiration englobe l'ensemble des phénomènes d'évaporation (physique) et transpiration (biologique).

Le phénomène d'évapotranspiration réelle et potentielle peut être mesuré directement sur le terrain à partir d'un bac d'évaporation ou d'un évaporomètre, grâce également à des lysimètres, ou calculer par des formules empiriques telles que celle de Turc ou de Thornthwaite ...etc. (Boubelli, 2009)

III.4.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

III.4.1.1. Méthode de Turc Cette méthode est applicable :

À tous les climats et elle est en fonction des précipitations et des températures moyennes mensuelles. La formule est la suivante :

Où: ETR : Évapotranspiration réelle annuelle en mm.

P : Précipitation moyenne annuelle, en mm.

$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$: pouvoir évaporant de l'atmosphère.

T : Température moyenne annuelle (en °C).

Soit ETR = **491 ,31 mm (Bekhouche, 2018)**

III.4.1.2. Formule de Thornthwaite :

Le bilan de Thornthwaite fait intégrer, d'une part l'ETP, et d'autre part les précipitations. Pour calculer l'ETR, deux cas sont considérés :

Si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP ; l'ETR est égale à l'ETP et on a alors un excédant en eau : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

Si les précipitations mensuelles sont inférieures à l'ETP, le sol restitue l'eau emmagasinée jusqu'à l'épuisement des réserves : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

Le déficit du bilan égal à $ETP - P$.

$ETR = ETP - \text{déficit agricole} = P - \text{excédent}$. (Bouafia, 2015)

III.4.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

III.4.2.1. Formule de Thornthwaite :

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales. Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, nous avons appliqué la formule de Thornthwaite.

$$ETP = 16(10 T/I)^a \cdot K$$

$$i = (T/5)^{1.514} \quad I = \sum 1^{12} i \quad , \quad a = (1.6/100) I + 0.5$$

ETP: Évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm

T : Température moyenne du mois considéré en °C.

K : Coefficient d'ajustement mensuel (donné en fonction de l'altitude et du mois considéré).

I : indice thermique annuelle. (Boubelli, 2009)

Les résultats sont portés dans le tableau suivant :

Tableau 08 : Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite

	sept	oct	nov	dec	Jan	fev	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Août	Total
P (mm)	50,47	47,96	27,75	27,84	38,96	36,48	48,44	48,45	66,90	22,58	16,63	35,55	468,01
T (°C)	21,60	16,80	10,80	7,70	7,20	6,80	10,10	14,30	18,00	22,00	27,30	26,00	
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,21	1,15	
ETP (mm)	100,50	62,17	26,32	14,78	13,52	12,00	28,19	53,84	87,03	122,74	174,66	152,99	848,74

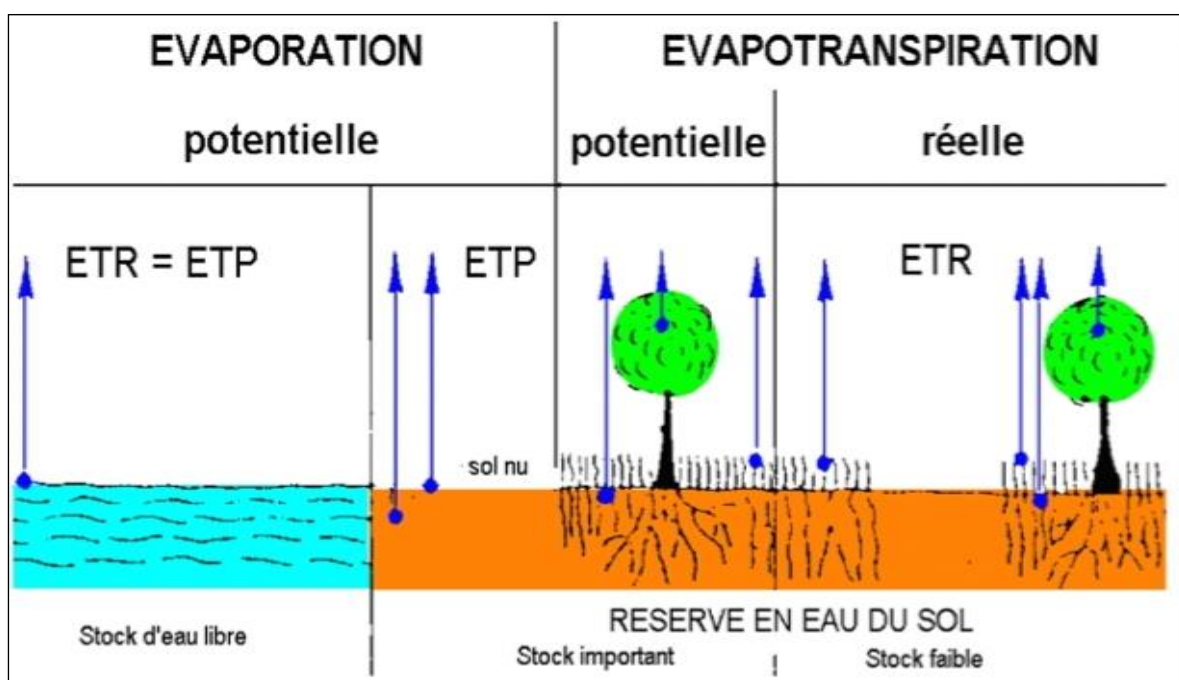


Figure 31 : évaporation et évapotranspiration potentielle et réelle

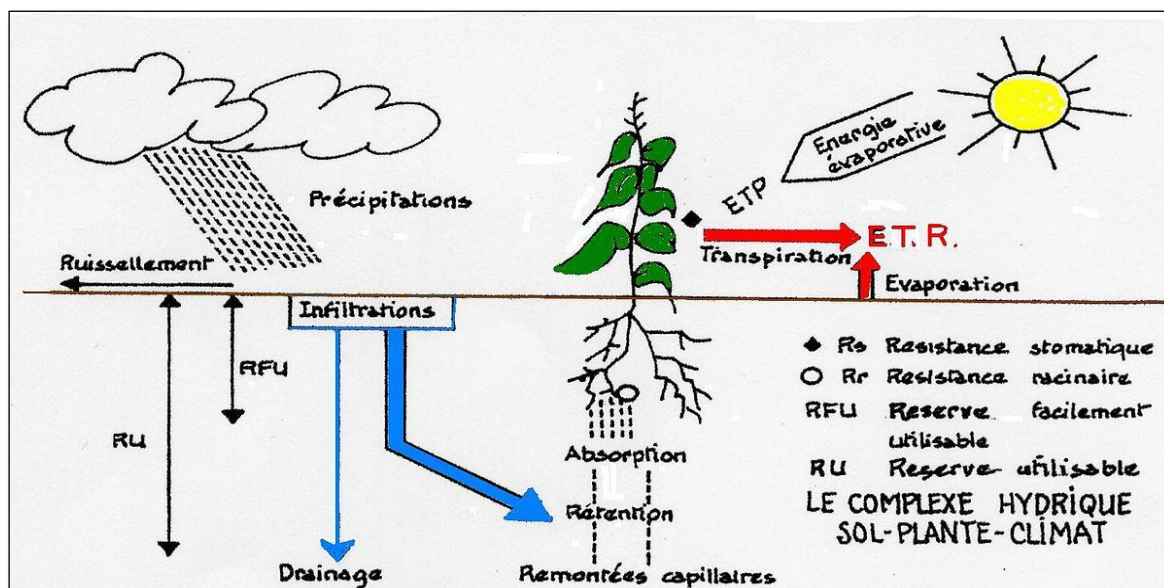


Figure 32 : le complexe hydrique SOL-PLANTE-CLIMAT

Tableau 09 : Bilan hydrologique moyen (2008/2009-2017/2018) à la station d’El Hamma par la méthode de Thornthwaite

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Total
P (mm)	50,47	47,96	27,75	27,84	38,96	36,48	48,44	48,45	66,90	22,58	16,63	35,55	468,01
T (°C)	21,60	16,80	10,80	7,70	7,20	6,80	10,10	14,30	18,00	22,00	27,30	26,00	162,60
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,21	1,15	
ETP (mm)	100,50	62,17	26,32	14,78	13,52	12,00	28,19	53,84	87,03	122,74	174,66	152,99	848,74
P-ETP	-50,03	-14,21	1,43	13,06	25,44	24,48	20,25	-5,39	-20,13	100,16	158,03	117,44	
RFU (mm)	0,00	0,00	1,43	14,49	39,93	64,41	84,66	79,27	59,14	0,00	0,00	0,00	
ETR (mm)	50,47	47,96	26,32	14,78	13,52	12,00	28,19	53,84	87,03	47,05	16,63	35,55	433,35
EX (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,41	20,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34,66
DA (mm)	50,03	14,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75,69	158,03	117,44	415,39

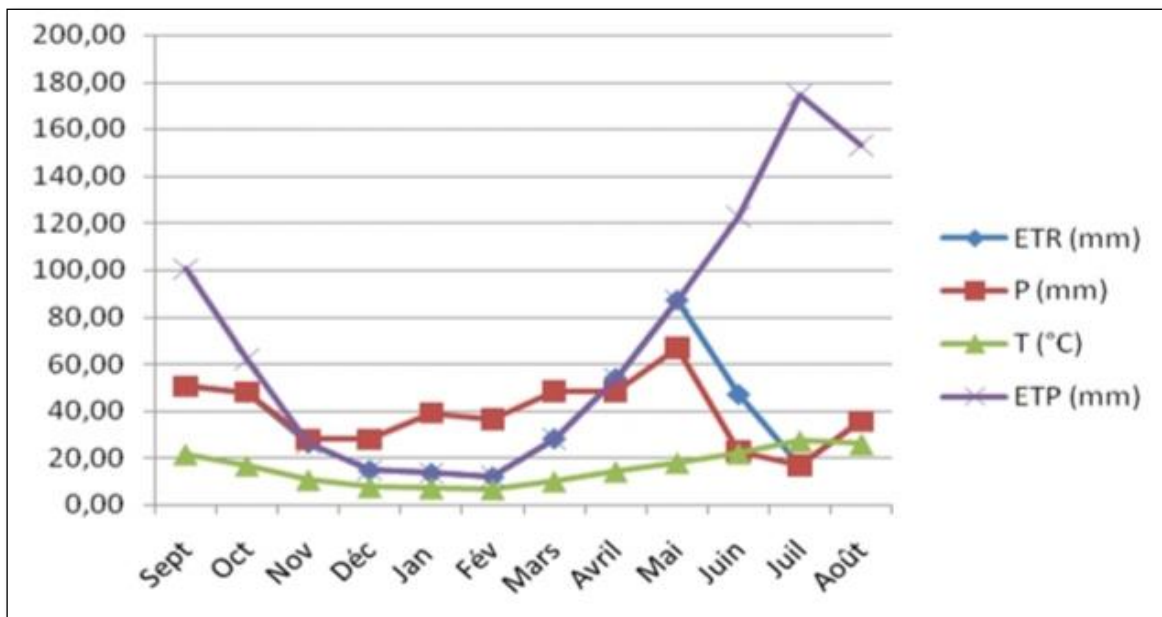


Figure 33 : Diagramme variation mensuelle des éléments climatique

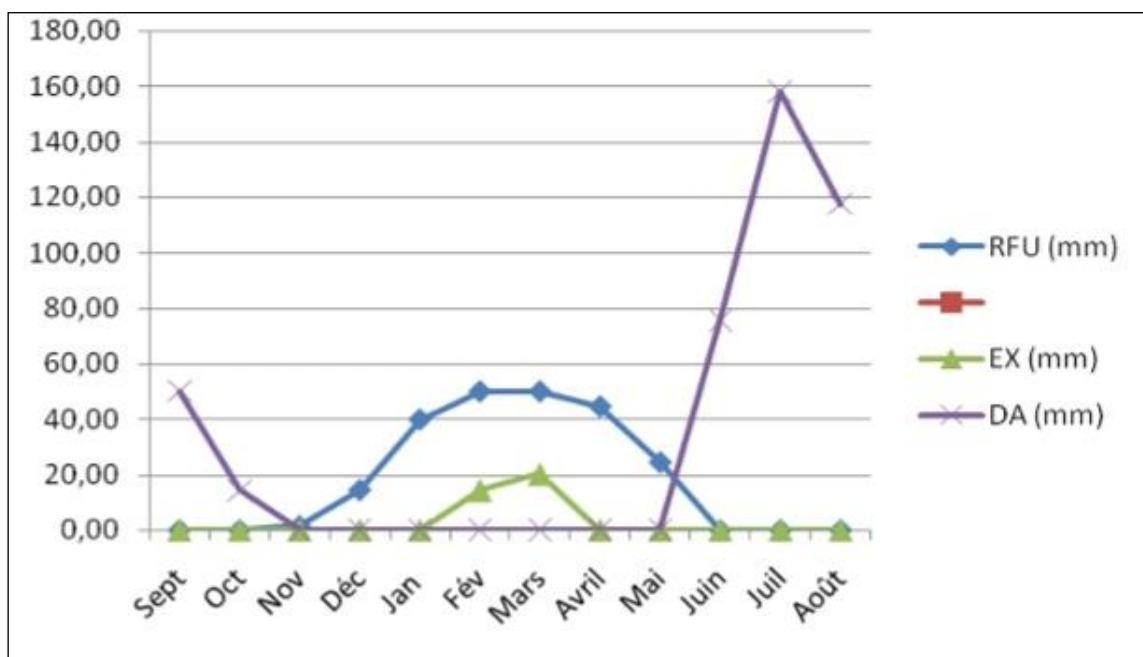


Figure 34 : Variation mensuelle des résultats du bilan hydrique

III.4.2.2. Interprétation du bilan hydrologique :

Ce graphe montre que l'évapotranspiration atteint son maximum au mois de juillet ce qui produit un déficit agricole et nécessite une irrigation pour les zones de culture. Par contre on observe une recharge de la nappe à partir du mois de novembre jusqu'au mois de mai. Au mois de novembre la RFU commence à augmenter et atteint son maximum avec 50 mm à partir du mois de décembre jusqu'à avril pour la station de Khenchela et jusqu'au mois mars.

Chapitre IV

L'Hydrochimie des eaux de Hammam Essalihine

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité de potabilité, suivre l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et de déterminer leurs origines géologiques.

Elle a aussi pour but d'identifier les zones d'alimentation ainsi que le sens des circulations des eaux.

L'objectif principal de ce chapitre, est de déterminer le faciès chimique des eaux concernées.

IV. Hydrochimie :**IV.1. Introduction :**

L'hydrochimie des zones semi-arides endoréiques est marquée par les phénomènes de concentration des solutions et de salinisation sous l'influence de l'évaporation. Dans ce contexte les mécanismes responsables de la variation et de l'acquisition de la qualité chimique des eaux sont souvent nombreux et complexes : apports météoriques (pluie et évaporation), l'acquisition des éléments chimiques par dissolution ou l'altération des minéraux de l'aquifère, lixiviation de solutés, les échanges de cations et par processus biogéochimiques. Apprécier la diversité des mécanismes responsables des variations hydrochimique d'une région aride nécessite l'identification de la concentration de chaque élément chimique par rapport à la minéralité globale des eaux.

Aucune étude hydro chimique sérieuse ne peut reposer sur des données chimiques non fiables ou de mauvaise qualité.

L'étude hydro chimique a porté sur l'analyse et l'interprétation de trois sources thermales. Le chimisme des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjours. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ), les concentrations des ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface.

Les échantillons conduits en Mai 2011, ont permis d'échantillonner l'eau thermale, dans ce chapitre, nous présentons brièvement les méthodes de prélèvement des échantillons, de mesure des paramètres physico-chimiques et géothermiques des eaux thermales et les techniques appliquées pour déterminer la composition chimique de ces dernières.

IV.1.1. Prélèvement :**IV.1.1.1. Considérations générales sur l'échantillonnage :**

L'échantillonnage des eaux dépend du but envisagé et constitue une étape primordialement qu'on doit mener avec une grande précaution pour aboutir à des échantillons représentatifs et des analyses fiables.

Le prélèvement des eaux est une opération délicate et destinée aux analyses physico-chimiques pour caractériser la composition chimique des eaux, leur fonctionnement et leur faciès chimique.

Pour aboutir aux résultats souhaités, nous avons tout d'abord effectué une visite de reconnaissance des points d'eau chaude dans la zone concernée ensuite nous avons effectué une campagne d'échantillonne.

IV.1.1.2. Les étapes de l'échantillonnage :**a. Préparation du matériel :**

Les échantillons d'eau destinées aux analyses physico-chimiques sont prélevées dans des flacons en polyéthylènes (plastic) stériles et bien rincées avec l'eau à échantillonnée.

Comme règle générale, le matériel de terrain consiste en une série de bouteilles d'échantillonnage, une glacière, un échantillonneur (lorsque l'accessibilité au site et/ou la profondeur du cours d'eau l'exige) et des instruments de mesure, tels qu'un multi paramètre. Thermomètre, un oxymètre et un pH-mètre.

Le volume des flacons à utiliser ainsi que le volume d'eau à prélever dépendent des paramètres qui doivent être analysés.

b. Calibrage des appareils

Lorsque des instruments de mesure sont utilisés sur le terrain, leur calibrage est une étape essentielle à l'obtention de données exactes et précises. Les appareils les plus communément utilisés sont Le multi paramètre, le thermomètre, l'oxymètre et le pH-mètre. Dans le cas d'un thermomètre digital un calibrage doit être effectué à quelques reprises au cours de l'année, mais cet exercice n'est pas nécessaire avant chaque campagne d'échantillonnage. Par contre, l'oxymètre et le pH-mètre doivent être calibrés avant chaque sortie sur le terrain.

c. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons d'eau peut s'effectuer de plusieurs façons, selon la taille du cours d'eau et l'accessibilité au site et la température de site. Dans les sources moins chaudes, l'idéal est de se placer au centre du cours d'eau et de remplir les bouteilles à la main, au milieu de la colonne d'eau, en faisant face au courant. Lorsque la température élevée empêche le prélèvement à la main, nous utilisons des supports et/ou des gants résistants à la chaleur.

L'utilisation d'un pont est la façon la plus facile d'avoir accès au centre du cours d'eau. L'intégrité des échantillons envoyés au laboratoire détermine en grande partie des caractéristiques des résultats d'analyse. Des précautions doivent donc être prises pour protéger les échantillons de toute contamination ou altération.

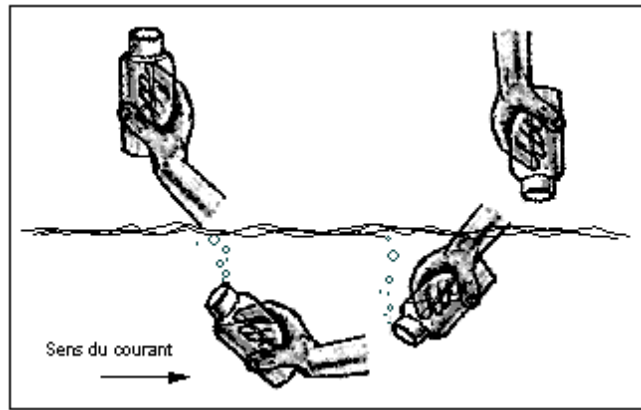


Figure 35 : Échantillonnage Dans les sources moins chaudes

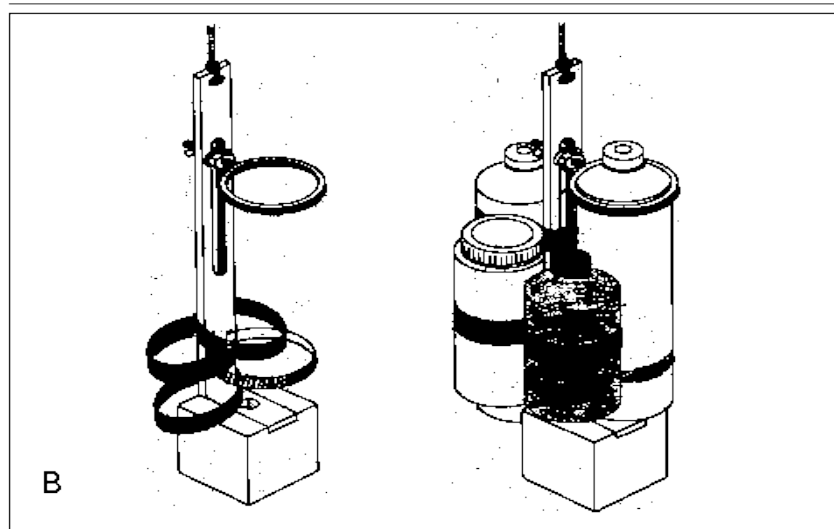


Figure 36 : Échantillonnage Lorsque la température élevée

d. Conservation des échantillons

Le processus de conservation permet de préserver l'intégrité des échantillons prélevés entre le moment de l'échantillonnage et celui de l'analyse en laboratoire. Cette étape est nécessaire puisque plusieurs paramètres peuvent subir des modifications physiques ou des réactions chimiques dans le récipient, ce qui altère la qualité originale de l'échantillon. Afin d'obtenir des analyses fiables. Il est recommandé de conserver les échantillons à l'obscurité et à une température de 4°C dans une glacière.

IV.1.2. Mesures In Situ : Paramètres Physiques :

Pour aboutir aux résultats souhaités, nous avons tout d'abord effectué une visite de reconnaissance des points d'eau chaude dans la zone concernée ensuite nous avons effectué une campagne d'échantillonnage.

Quatre éléments ont été mesurés, la température de l'eau, le pH, la conductivité électrique, potentiel d'oxydoréduction et le potentiel d'oxydoréduction. On a utilisé un multi paramètre pour réaliser ces mesures.

IV.1.2.1. Mesure de la température :

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc.

Les mesures de la température de ces sources nous permettent de classer selon leur température en :

Tableau 10 : classification des eaux étudiées, selon leur température (Bekhouche, 2018)

Point de l'eau	Température (°C)	classification
Hammam Essalihine S1	73	Eaux hyperthermales
Hammam Essalihine S2	90	Eaux hyperthermales

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, donc sur la conductibilité. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, c'est l'un des facteurs qui influe sur la vitesse des réactions chimiques, On remarque que les températures élevées témoignent d'une origine profonde des ces eaux.

IV.1.2.2. Mesure du pH :

Le potentiel hydrogène mesure l'activité des ions H^+ dans une eau, plus simplement, il mesure l'acidité ou l'alcalinité d'une solution.

Les valeurs du pH mesurées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Valeurs du pH mesuré (Bekhouche, 2018)

Site	Hammam Essalihine S1	Hammam Essalihine S2
pH	7,2	7.1

Le pH de toutes les eaux est voisin de la neutralité et varie de 6,8 à 7,20, avec un caractère plus ou moins alcalin. Ces valeurs témoignent des variations de la CO_2 , dissous dans l'eau et aussi de la diffusion du gaz carbonique atmosphérique

IV.1.2.3. Mesure de la conductivité électrique :

Comme pour la mesure de pH, le conductimètre nécessite un étalonnage régulier. L'incertitude de la mesure est bien évidemment fonction de la minéralisation de l'échantillon. Elle est classiquement fixée à $\pm 5\%$.

La corrélation entre C.E. et différence de potentiel n'étant pas exactement linéaire, seuls deux étalons peuvent être employés pour l'étalonnage. Une mesure sortant de la gamme étalon impose à l'utilisateur un réétalonnage de l'appareil dans une gamme mieux adaptée. Cette démarche a été appliquée sur le terrain.

Les valeurs la conductivité électrique mesurées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Valeurs de la conductivité électrique mesurées (Bekhouche, 2018)

Site	Hammam Essalihine S1	Hammam Essalihine S2
Conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$)	2420	2600

Toutes Les valeurs mesurées de la conductivité indiquent une minéralisation élevée car elles sont toutes globalement supérieures à 1500 $\mu\text{S/cm}$, cela traduit la grande solubilité des sels à des grandes températures.

Ces valeurs indiquent que les eaux thermales de Khenchela sont minéralisées et auraient traversé les terrains triasiques gypso-salifères et sont liées à la grande solubilité des sels (Na Cl, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaSO_4 et Na_2SOH).

IV.1.2.4. Mesure du potentiel d'oxydoréduction :

La mesure de ce potentiel est très utile pour prévoir l'état d'oxydoréduction des espèces Chimiques et de là, pour prévoir leur réactivité chimique. Le potentiel redox est une grandeur empirique exprimée le plus souvent en millivolts (mV) et notée Eh en référence au couple H^+/H_2 utilisé comme standard en géochimie.

Les valeurs mesurées du potentiel d'oxydoréduction d'une eau doivent être prises avec beaucoup de précaution. De nombreux travaux mettent en évidence la différence de valeur redox obtenue en fonction de la méthode de mesure : directe (emploi d'une électrode) ou bien calculée sur la base des teneurs en solutés d'un même couple redox (Langmuir, 1997).

La mesure du potentiel d'oxydoréduction est donc plus à considérer comme une valeur qualitative que quantitative. Néanmoins, comme toutes les mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions (immersion totale de l'électrode), les différences entre elles sont significatives.

Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction mesurées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Valeurs du potentiel d'oxydoréduction mesurées (Bekhouche, 2018)

Site	Hammam Essalihine S1	Hammam Essalihine S2
Potentiel d'oxydoréduction(MV)	198	201

Ces valeurs dénotent de la grande aération des eaux et de la nitrification par oxydation des eaux.

IV.1.3.Mesures en laboratoire: éléments chimiques majeures et mineurs :

IV.1.3.1.Les éléments majeurs :

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

Les résultats d'analyses chimiques en éléments majeurs effectuées sur les échantillons prélevés des six points d'eau de la zone d'étude sont reportés dans le (tableau 15).

Tableau 14 : Analyses chimiques en éléments majeurs (mg/l) (Bekhouche, 2018)

Point d'eau	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Hammam ES1	119	52	602	31	785	311	285	6
Hammam ES2	200	61	522	22	780	318	244	5

Les analyses chimiques effectuées sur les échantillons prélevés des deux points d'eau thermale de la zone d'étude, montrent des teneurs variables des différents éléments dosés d'un point à un autre, l'examen de l'analyse montre que :l'anion Cl⁻, SO₄⁻² est prédominant sur les ions HCO₃⁻, NO₃⁻ et les cations Ca⁺², Na⁺ est prédominant sur les ions K⁺, Mg⁺².

A. Discussion des résultats :

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 $\text{CaSO}_4 + 2(\text{H}_2\text{O}) \rightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{+2} + 2(\text{H}_2\text{O})$.

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.

Ces concentrations indiquent que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et les formations gypseuses contenues dans les terrains salifères du Trias.

❖ **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 :



Quant 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.

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.

❖ **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.

❖ **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 thermale.

Sur notre terrain la teneur en potassium dans les eaux Hammam Essalihine et est presque de l'ordre de **22mg/l**

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, Sebkhass), 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.

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 Sebkhha 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.

❖ **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.

❖ **Les nitrates NO_3^- :**

Les nitrates, représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble. L'apport atmosphérique en nitrates est faible, la teneur naturelle des eaux thermale en cet élément est également faible; elle dépend des types de sols, de la végétation qui les recouvrent ainsi que du taux d'oxygénation dans la zone noyée. On peut dire aussi que l'origine des nitrates dans les eaux thermale est essentiellement externe (apports anthropiques). Les nitrates sont utilisés comme indice de pollution.

B. Faciès chimique :

Représente les minéraux (Anions et Cations) les plus abondants dans l'eau. Donc il renseigne sur la tendance minéralogique.

a. Diagramme de Piper :

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 cotés 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.

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet une classification et une comparaison facile des eaux.

Le principe consiste à représenter dans chaque triangle équilatéral les quantités en réaction pourcent de chaque ion par rapport à la somme des ions de même signe, ainsi dans chaque triangle, nous obtenons un point indiquant la dominance d'un cation ou d'un anion.

Les deux parallèles supportant ces deux points se recoupent en un point unique dans le losange représentatif de la nature et du faciès chimique de l'eau. (Benhamza.M, 2007)

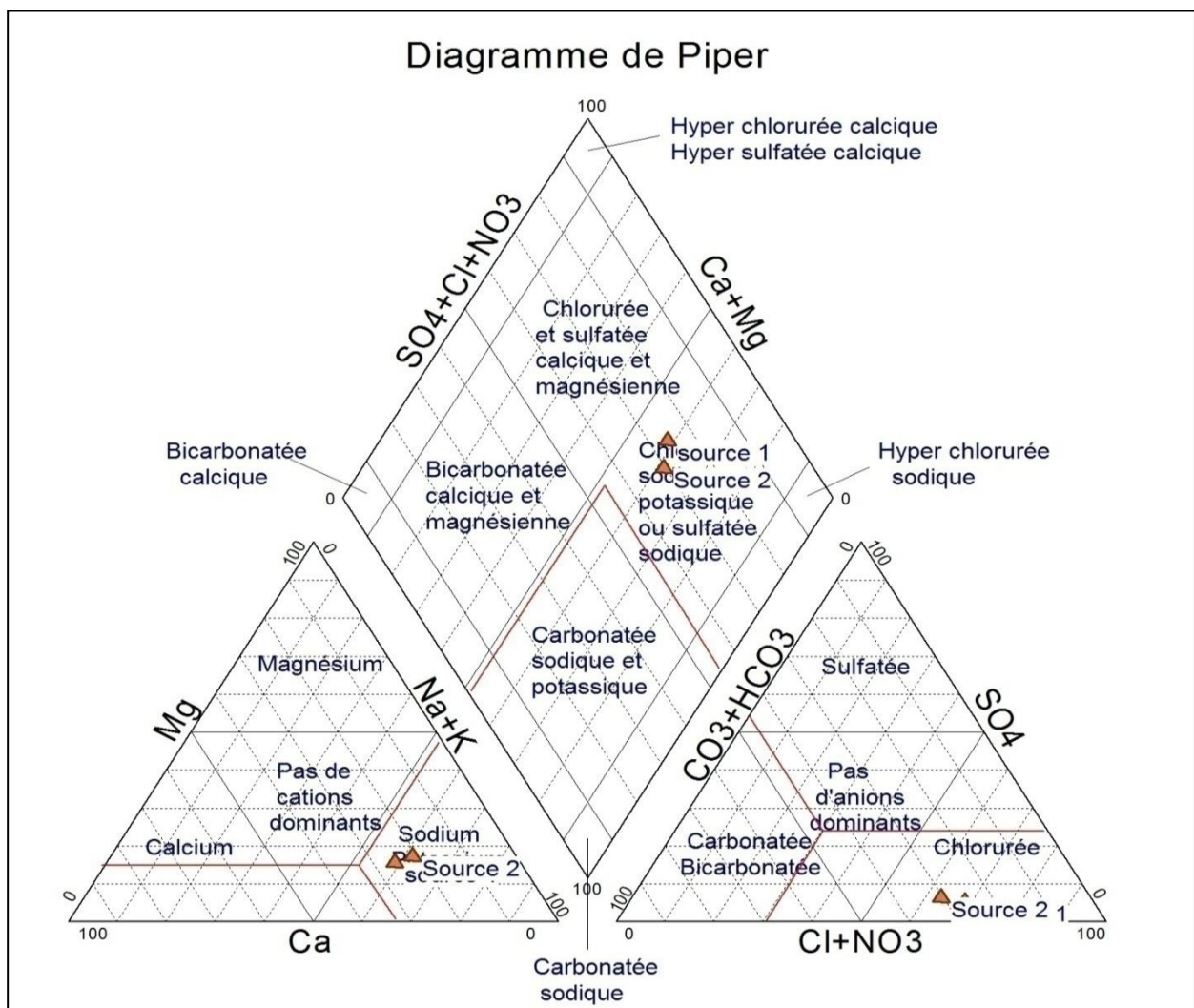


Figure 37 : Représentation graphique sur le diagramme de Piper

b. Diagramme de Schoeller – Berkaloff :

Cette classification est basée sur la représentation des résultats des analyses chimiques sur un diagramme mis au point par Schoeller en 1932 et révisé par Berkaloff en 1952.

Ce diagramme se compose de sept échelles logarithmiques verticales correspondant aux principaux ions analysés. Tous les éléments chimiques analysés sont reportés directement en mg/l. Ce type de diagramme permet de représenter sur même diagramme plusieurs eaux, ce qui facilite leurs comparaisons mutuelles.

Cependant, il présente un risque d'interprétation abusive de la conformité de deux échantillons, du fait que les rapports graphiques se font sur une échelle logarithmique. En plus, ce diagramme ne peut contenir que dix analyses à la fois. (BENHAMZA, 2007)

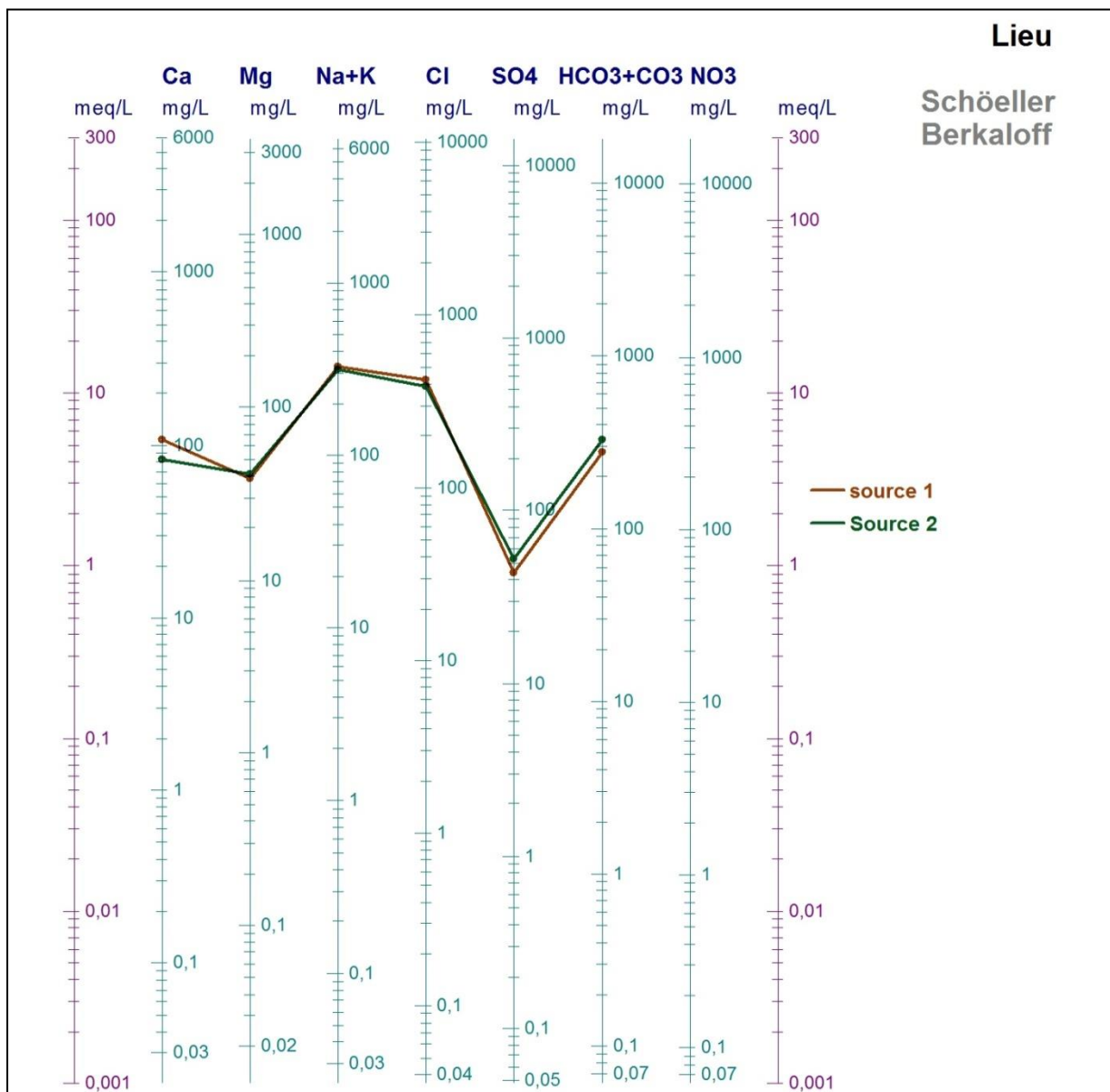


Figure 38 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff

IV.2. La Géothermométrie chimique :

L'objectif de ce chapitre est de connaître la température des eaux dans le gisement hydrothermal et cela par des calculs en utilisant des géothermomètres qui ont fait leur preuve. Comme il serait utile de calculer la profondeur à laquelle les eaux auraient subi ce réchauffement.

IV.2.1. Introduction:

Le terme Géothermie vient du grec géo (terre) et thermos (chaud), elle désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe ainsi que les processus industriels qui visent à l'exploiter, pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur.

La géothermométrie chimique a été créée pour contribuer à l'appréciation des températures atteintes dans les réservoirs géothermales. Les méthodes de géothermométrie chimique permettent, à partir de l'analyse des eaux des sources chaudes, de calculer la température à laquelle elles ont été portées dans le sous-sol "au niveau de leur gisement". Ces méthodes, mises au point pour la prospection de gisements d'énergie géothermique entre 1960 et 1980, ont donné lieu à de nombreuses publications et applications. Elles sont maintenant couramment utilisées dans les études ayant trait aux eaux chaudes.

Les géochimistes éminents, inventeurs des différentes méthodes de géothermométrie chimique ont contribué notablement à faire progresser les outils de la prospection géothermique.

A partir des paramètres de l'analyse chimique d'échantillons de surface, la littérature spécialisée fournit de nombreuses méthodes permettant d'estimer la température atteinte en profondeur par une eau souterraine, existent dans la littérature ; appliquées au début pour les études géothermiques, elles le sont maintenant couramment pour les eaux thermales.

Les rapports de cations sont utilisés comme géothermomètres et peuvent indiquer la température du réservoir hydrothermal, c'est un paramètre important pour déterminer les profondeurs maximales atteintes par les circuits d'alimentation.

IV.2.2. Principe de la géothermométrie chimique :

Les eaux des gisements géothermiques, sont d'origine météorique; les eaux de pluie infiltrées en profondeur dans le sous-sol, subissent un réchauffement sous l'influence du gradient géothermique local. La température maximale à laquelle elles ont été portées dans le sous-sol et la profondeur qu'elles ont atteinte sont donc liées.

Au cours de leur trajet souterrain sous l'effet de la température, de la pression et de la présence éventuelle de gaz, elles entrent en réaction avec les minéraux constitutifs des roches traversées, qui s'altèrent; l'eau acquiert ainsi sa minéralisation au dépend de ces minéraux et,

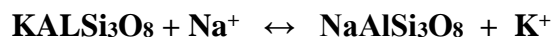
avec le temps, il s'établit un équilibre chimique qui est essentiellement fonction de la température atteinte. Par conséquent, si ces eaux arrivent à remonter jusqu'en surface sans que leur composition chimique n'ait été trop perturbée, elles peuvent fournir des indications qualitatives ou quantitatives sur le niveau de température auquel elles ont été portées dans le sous-sol. Celles-ci peuvent être extrêmement élevées; des valeurs supérieures à **300°C** ont été mesurées dans certains champs géothermiques.

L'utilisation des géothermomètres à cations suppose l'atteinte d'un équilibre chimique eau-roche en profondeur (dissolution). Les eaux à caractère thermal semblent partiellement équilibrées dans cette représentation.

Dans ces conditions, il existe essentiellement deux minéraux ou associations minérales intéressants à cet effet :

La silice, ubiquiste, dont la solubilité augmente rapidement avec la température ;

Le couple feldspath potassique-feldspath sodique (albite) dont le rapport de solubilité peut être représenté par la réaction :



Ces deux feldspaths n'étant pas miscibles, la loi d'action de masse correspondante montre que le rapport Na/K ne dépend que de la température ; en toute rigueur ce rapport dépend également de la pression, mais, dans les domaines de pression considérés, l'influence de ce paramètre est faible devant l'influence de la température.

Minéraux de néoformation ↔ Eau minéralisée ↔ Minéraux altérés.

Ainsi, le rapport $[K^+]/[Na^+]$ évolue avec la température selon le rapport des produits de solubilité (avec la température) de deux feldspaths, à condition bien sur que les eaux thermales soient en équilibre simultané avec ces deux minéraux.

La géothermie a donné naissance à deux filières qui se distinguent par des technologies et des applications différentes : la production de chaleur pour la basse et très basse température et la production de l'électricité pour la haute et moyenne température

IV.2.3. gradient géothermique :

La température des roches augmente avec la profondeur, c'est ce qu'on appelle le gradient géothermique. Il varie selon les couches traversées.

Le gradient géothermal **G** ($\mathbf{K \cdot m^{-1}}$) mesure l'augmentation de la température en fonction de la profondeur (figure 39) et la densité de flux de chaleur terrestre est la quantité de chaleur transmise par conduction puis dissipée par unité de surface et de temps ($\mathbf{W \cdot m^{-2}}$).

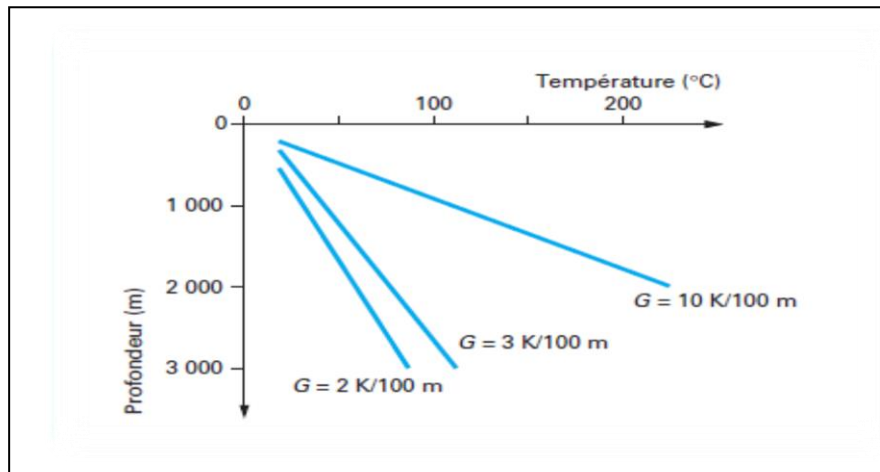


Figure 39 : température en fonction de la profondeur selon plusieurs valeurs du gradient géothermal

La chaleur produite et accumulée dans les profondeurs de la Terre se transmet donc vers la surface mais sous une forme et avec des intensités très différentes qui dépendent notamment de la localisation du point considéré.

Dans les régions géologiquement calmes, c'est-à-dire en général en dehors des frontières de plaques, l'énergie est essentiellement transmise par conduction, avec un gradient géothermal de valeur moyenne ($3 \text{ C}^\circ /100 \text{ m}$) et assez régulièrement réparti ; bien que dans certaines régions.

Le gradient géothermique observé dans la croûte continentale varie largement d'un endroit à un autre, bien que la valeur normale soit de l'ordre de $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, néanmoins certaines régions enregistrent plus de $100^\circ\text{C}/100\text{m}$ comme à Larderello en Italie ; alors que d'autres ne dépassent pas $1^\circ\text{C} /100 \text{ m}$ comme à Padoue.

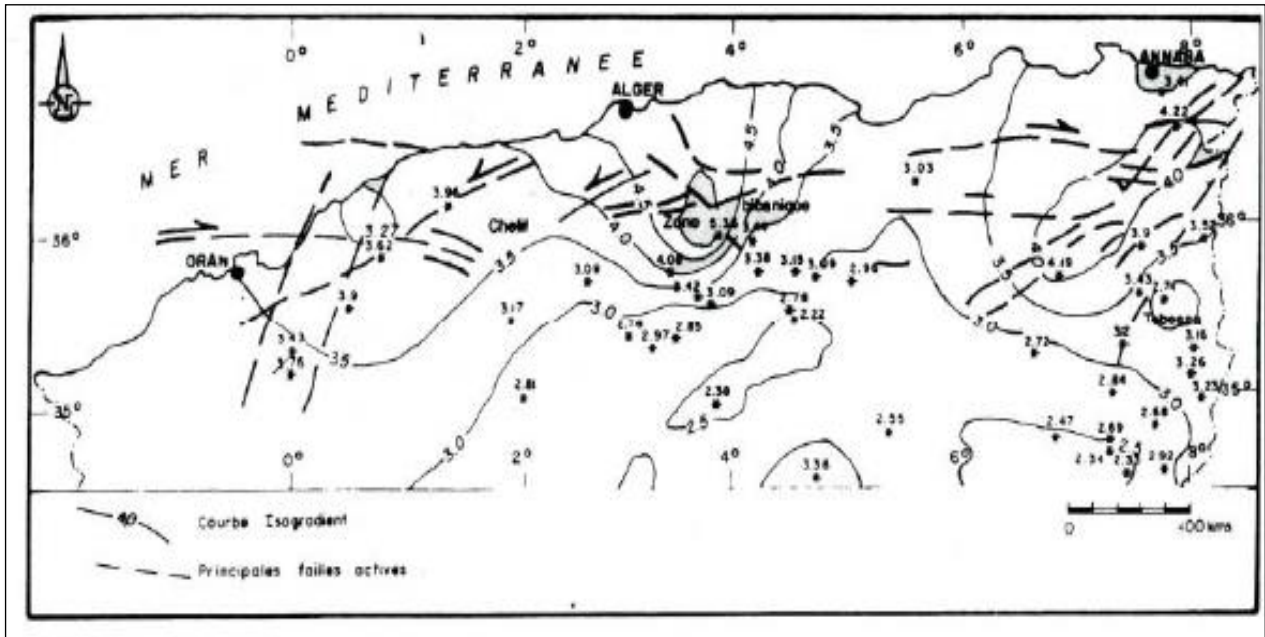


Figure 40 : Carte du gradient géothermique de l'Algérie du Nord d'après A. Issaâdi et F.Z. Haouchine (1994).

IV.2.4. Géothermie au Nord Est Algérien :

Les températures calculées dans les deux sources thermales, par les géothermomètres d'Ellis, Fournier Trusdell et Arnorson.

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.

Nous constatons que pour la source de Hammam Essalihine ; plus les eaux descendent en profondeur plus elles se chauffent sous l'action du gradient géothermique et de l'énergie 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 Essalihine 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.

IV.2.5. L'origine de la chaleur :

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**

IV.2.6. Les géothermomètres à silice et à cations :

Les géothermomètres employés utilisent des rapports de concentration : Na/K (Fournier, 1979 ; Trusdell, 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 : $\frac{|\text{Na}^+|}{|\text{K}^+|} \mathbf{K(T)}$

Les équations correspondantes sont :

Géothermomètre Na/ K

- **A.J. Ellis (1970):**
$$T = \frac{908}{0.700 + \log \frac{Na}{K}} - 273.15$$
- **R.O. Fournier (1979) :**
$$T = \frac{1217}{1.483 + \log \frac{Na}{K}} - 273.15$$
- **A.H. Trusdell (1975) :**
$$T = \frac{856}{0.857 + \log \frac{Na}{K}} - 273.15$$
- **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.

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

$$T(C^\circ) = \frac{1309}{5,19 - \text{Log SiO}_2} - 273,15$$

(C concentration en mg/l)

➤ **Calcul de la profondeur**

Pour chaque source thermale, 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)

T_{cal} : température calculée par le géothermomètre (°C).

T_{air} : 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 important dans cette profondeur Ce qui diminue progressivement avec la montée grâce à divers phénomènes.

Tableau 15: Températures et profondeurs du gisement hydrothermal calculées par les différents géothermomètres (Houha 2007)

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	152	3245	144	3052	100	2008	111	2266

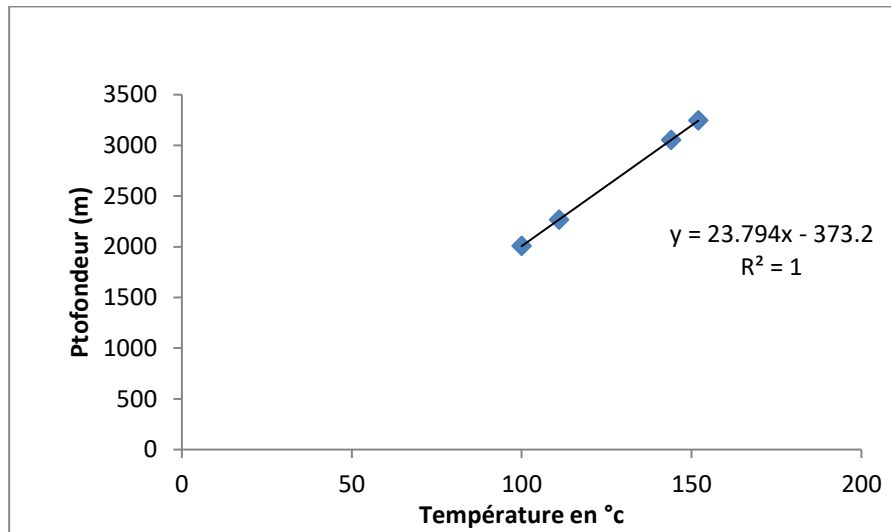


Figure 41: variation de la température en fonction de la profondeur

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.

IV.2.7. La géothermie est écologique :

Une exploitation géothermique produit peu de rejets. La quantité moyenne de CO2 émise dans l’atmosphère par les centrales géo-thermo-électriques dans le monde (estimation faite sur 73% du parc mondial) est de 55 g/kWh, alors qu’une centrale au gaz naturel en produit 10 fois plus. Ce niveau peut être ramené à des valeurs nulles par la ré-injection des fluides géothermaux dans les réservoirs dont ils sont issus d’une technique largement répandue aujourd’hui.

C’est donc une énergie propre qui ne participe pas à la dégradation du climat comme le font les énergies fossiles.

IV.2. 8. Avantages et inconvénients du géothermomètre :

Faisant intervenir un rapport de concentration, ce géothermomètre est insensible aux processus de concentration ou de dilution, en particulier au mélange avec des eaux superficielles qui sont le plus souvent 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.

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 surface des 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.

IV.2.9. Conclusion :

Les sources thermales de Khenchela sont situées dans un anticlinal au pied mont de Ras Serdoun. Dans ce secteur les terrains qui affleurent s'étendent du Trias au Quaternaire. La température des eaux de jaillissement varie de 42 à 61°C, la conductivité oscille entre 1800 et 3700 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Le gradient géothermique estimée dans la région des Aurès est de 4.78°C /100 m, la température moyenne annuelle de l'air est 16°C (B. Houha 2007)

L'utilisation des géothermomètres chimiques permet de remonter à la température du filon hydrothermal et à la profondeur de réchauffement des eaux. Les géothermomètres d'Ellis et Fournier d'une part et de Trudell et Arnoson 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.

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

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE :

Nous avons essayé, par ce travail d'étudier la source thermale de Hammam Essalihine, notre étude est une contribution à la compréhension du thermalisme à la région des Aurès.

Dans notre zone d'étude le climat est caractérisé par une très grande variabilité climatique, les données de mesures de 10 années d'observation ont donné une température moyenne annuelle de 162.60°C, des précipitations de l'ordre de 468.01mm/an et une évapotranspiration réelle de 433,35 mm/an.

L'étude climatologique a montré que la région d'étude appartient au climat semi-aride. Le bilan hydrique de cette région est déficitaire.

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

L'étude des ions majeurs montre que les teneurs des différents éléments sont conformes aux normes. La représentation graphique des résultats des analyses a donné un faciès chimique (Nom chimique des eaux) chloruré sodique et potassique, pour les deux sources thermales.

La source thermale émerge 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

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 conductivité électrique et le potentiel redox. La température est variée de 73 à 90 °C, le pH est varié de 7.1 à 7.2, la conductivité électrique varie de 2420µS/cm à 2600, et le potentiel d'oxydoréduction est varié de 198 à 201 MV.

L'amplitude thermique, montre que les eaux ont une origine très profonde, les valeurs élevées de conductivité traduisent que la solubilité des sels s'est faite sous de grande température. Les mesures de pH indiquent que les eaux sont acides influencées par la présence du CO₂ dissous et la foresterie. Les valeurs positives du potentiel redox indiquent

Conclusion générale

que les eaux son bien aérée. La représentation graphique de Piper montre que les eaux sont de nature chloruré sodique. Les équations de Trusdell, Ellis, Fournier et Arnorson ont données des valeurs de températures assez dispersées mais qui restent dans la normal en tenant compte du gradient géothermal, des réactions chimiques endogènes, de la désintégration radioactive de l'activité sismique et enfin dure Ainsi les températures du gisement hydrothermale est de 144°C à une profondeur de 3052m pour Hammam Essalihine, selon Fournier, et de 152°C avec une profondeur de 3245m selon Ellis.

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.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Alami.A, (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, 13p.

Anonyme, (2001) : Monographie de la Wilaya de Khenchela, Direction Générale du Budget DPAT de la Wilaya de Khenchela, 166p.

Anonyme, (2008) : la carte topographique au 1/200000 de Khenchela, jumelage de cartes au 1/5000 de couvrant la Wilaya, édition 2008, Direction de l'hydraulique de la Wilaya de Khenchela, Algérie.

ANDI, (2013) : agence nationale de développement de l'investissement 2013, 06, 10p.

Aouidane, (2017) : Origines de la salinisation des eaux et des sols d'une zone à climat semi-aride : Cas de Remila (W. Khenchela), 38p.

Athamena.M (2006) : Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud Sétifien.Mémoire de Magister. Départ.Hydrolique.Univ.Batna.130 pages.

Burille.J, 2006 : Influence de la formation sur l'identité professionnelle et sur les pratiques des hydrothérapeutes dans les stations thermales françaises. Spécialité formation et encadrement dans le secteur sanitaire et le travail social. Université de Provence Aix-Marseille I, 14, 15p.

Bekkouche. M F, (2016) : Caractéristique hydro chimique des sources thermales de l'extrême Nord-est Algérien. Thèse de doctorat en science, université Badji Mokhtar-Annaba.103, 104, 169p.

Bekhouche.O, (2018) : Caracteristiques physico-chimiques et therapeutiques des eaux thermales de hammam essalihine wilaya de khenchela Mémoire de mester universite abbés laghour khenchela.

Berkani. C., (2011) : étude hydrochimiques des sources thermales des Aurès. Mémoire de mester universite abbés laghour khenchela, 13, 15, 17p.

Bouafia.H, (2015) : Hydrodynamique souterraine et transfert des réservoirs profonds (couplage architecture stratigraphique vulnérabilité et risque de pollution) dans la région de Khenchela.03, 04, 31, 34p.

Boubelli.S, (2009) : Identification et mise en évidence des formations hydrogéologiques de la wilaya de khenchela (nord-est algérien) analyse et synthèse de données.33, 34p,

Boutiba.A : Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci. Mémoire de Magister. Université M'HAMED BOUGARRA BOUMERDES.

Références Bibliographiques

Benhamza Moussa. (2007) : Contribution de la géophysique à l'étude hydrogéologique de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba), Nord Est Algérie. Conséquences de l'exploitation des gisements mercuriels sur l'environnement. Thèse de doctorat d'état de l'université d'Annaba, Algérie.28, 29, 30p.

Bouaicha.F, (2018) : Le géothermalisme de la région de Guelma. Thèse de doctorat en science, UNIVERSITÉ DES FRERES MENTOURI-CONSTANTINE 1-.150, 153, 155p.

Bouchareb-Houcine F. Z. (1993) : Apport de la géothermométrie et de données de forages profondes à l'identification des réservoirs géothermiques de l'Algérie du Nord.mémoire de Magister.IST.USTHB. Alger 105pages.

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.

Chaponniere, (2005) : Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride : cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Paris (FRA) ; Toulouse : INA-PG ; CESBIO, 268 p. multigr. Th. : Hydrol. et Télédétection, INA-PG : Paris ,17

Dib.H, (2008) : Guide pratique des sources thermales de l'Est Algérien. Publication du service Géologique National.14, 15, 40p.

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

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., (2007) : étude de fonctionnement hydrogéologique et salin d'un bassin semi-aride Remila-khenchela. Thèse doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, 114p.

Houha. B., (1996) : quantité et qualité des eaux souterraines de la région de khenchela (garat tarf). Mémoire de magister, f.s.t annaba, algérie,

Heintz Julien (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d informations) "janvier 2008.

Hamel. A(2009) : Hydrologie des systèmes aquifères en pays montagneux à climat semi aride. Cas de la vallée d'oued El Abioud. Mémoire de Magister. Départ.Sciences.. de la terre. Univ.Batna.179 pages

Issaâdi. A, 1992 : Le thermalisme dans son cadre géo structural. Apports à la connaissance de l'Algérie profonde et de ressource géothermales.

Références Bibliographiques

Khabtane.H., (2010) : contribution à l'étude du comportement ecophysiologique du Genre tamarix dans différents biotopes des zones arides de la région de kenchela. Mémoire magister. Université de Constantine.

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 KENCHELA (EST ALGERIEN).20p

Laffitte. R., (1939) : étude géologique de l'Aurès. Thèse, Paris, Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2e série, 484p.

Ouali .S, (2005) : Étude géothermiques du sud de l'Algérie. Mémoire de magister en géophysiques. UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGUERRA BOUMERDES.13, 14, 18, 19p.

Ouali .S, (2008) : Les sources Thermales en Algérie. Division Énergie Solaire Thermique et géothermie. Recherche et développement.16p.

Ouali .S, (2015) : Contribution à l'étude de quelques réservoirs géothermiques en Algérie. Thèse de doctorat en science, Université Des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène.19, 20p.

OUALI .S, Hadjiat.M.M, AIT-OUALI.A, Salhi. K, Malek. A, (2018) : Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l'Algérie. Centre de Développement des énergies renouvelables, CDER.57, 58p.

SCHWENKE .A, (2007) : De l'usage de l'eau thermale en nébuliseur. Thèse de doctorat en pharmacie, université Henri Poincaré- Nancy 1.63, 64, 65p.

Théibaud.E (2008) : Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie).Mémoire de doctorat.Univ.Savoie. 207pages.

VILA J.M., (1977) : carte géologique de l'Algérie et notices explicatives.

VILA J.M. (1973) : La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat Es Sciences Naturelles. Université Paris VI. 665 pages