



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABBES LAGHROUR –KHENCHELA-

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

Département d'Ecologie et Environnement

Mémoire de fin d'étude
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Master Académique

FILIERE : Ecologie et environnement
OPTION : Ecologie et environnement

Thème :

Etude comparative de deux sources thermales : la source Djaarir et la source Tamersit

Présenté par

HAMADOU Soltana

DJEHAICHE Manel

Soutenu le : 12 Juin 2016

Jury de soutenance :

Présidente : KADI Kanza

M.C.A Université Abbès Laghrou -Khenchela-

Promotrice : DELLAA Yasmina

M.A.A Université Abbès Laghrou -Khenchela-

Examinatrice : HALASSI Ismahan

M.A.A Université Abbès Laghrou -Khenchela-

Année universitaire : 2015-2016



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **DIEU** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce travail doit beaucoup à la collaboration de nombreuses personnes à la tête desquelles nous voudrions citer :

M^{elle} **DELLAA Yasmina** notre encadreur que nous félicitons pour sa rigueur, sa patience, et sa gentillesse, merci à vous pour les conseils, orientation, aide et disponibilité ;

Monsieur **HAMADA Yousef**, doyen de la faculté SNV qui nous a fourni l'essentiel du matériel pour rendre possible les stages dont nous avons en besoin ;

Et également à M^{me} **DIB Dounia** et M^{elle} **CHELIH Fatha** pour les informations et l'aide ;

M^{me} **HALASSI Ismahan** pour avoir accepté de faire part du jury et M^{me} **KADI Kenza**

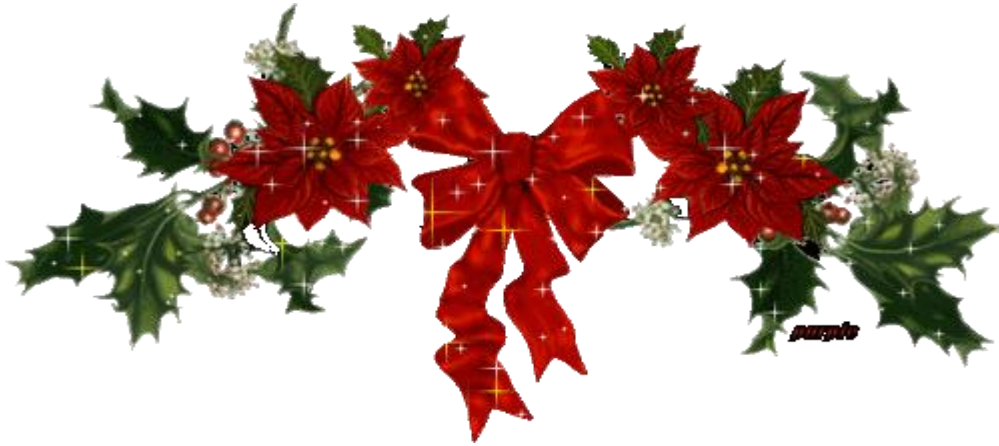
Pour accepter la présidence du jury ;

En ce qui concerne la partie analytique, rien n'aurait été possible sans l'accueil du laboratoire **R.N.A.M.S** à l'université d'Oum El boughi en particulier de M^{me} **DIB Dounia**, ainsi que le laboratoire d'**A.D.E** de Khenchela, qu'ils trouvent ici l'expression de notre grande gratitude ;

Les aides ont été nombreuses, un merci spécial à **la conservation des forêts et direction de l'environnement** pour toutes les informations de terrain qu'ils nous ont consacrées et pour sa connaissance infailible de la région ;

Un très grand merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué l'élaboration de ce travail.

DJEHAICHE Manel et HAMADOU Soltana



DÉDICACES

AVEC UN ÉNORME PLAISIR, UN CŒUR OUVRE ET UNE IMMENSE JOIE, QUE JE DÉDIE
MON TRAVAIL À :

MES PARENTS, MA MÈRE, MA VIE, BAHIDJA, MON PÈRE HOCINE, EN PARTICULIER.

ET À TOUTE LA FAMILLE.

MES FRÈRES : SALAH, NASRO, POLO, CHAMSO.

MES SŒURS : NAWEL, MINOUCHE.

MON MARIE HAMID QUE JE L'AIME TOUJOURS, SANS LIMITE.

MA PETITE, MON ONGE, MA JOIE, NAILA.

MA GRANDE MÈRE : HAFSIA.

MES COUSINES : SAKINA, DALILA, MALIKA, WARDA, HAFSIA.

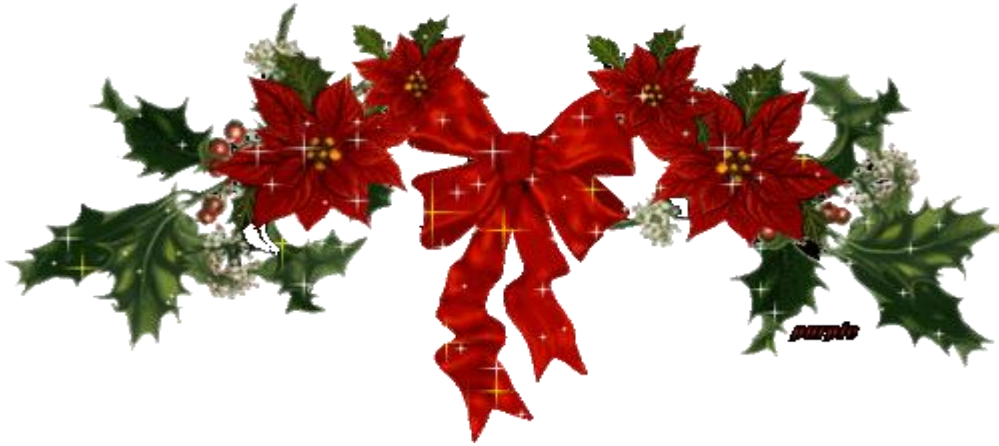
LES PETITS, MARWA, HIBA, JAKOB, SAFA. DIKRA, NOUSSA.

MA TANTE, FATIHA.

MES AMIES, HAKIMA, MANEL, IBTISSAME.

OUM NAILA





DÉDICACES

AVEC UN ÉNORME PLAISIR, UN CŒUR OUVRE ET UNE IMMENSE JOIE, QUE JE DÉDIE
MON TRAVAIL À :

MES PARENTS, MA MÈRE, MA VIE, HABIBA, MON PÈRE CHÆBANE, EN
PARTICULIER.

ET À TOUTE LA FAMILLE.

MES FRÈRES : AMINE, ANWAR..

MES COUSINES : ZINA, LATIFA, AHLAM, KHAWLA.

LES PETITS, TAHA, DADOUCHE, JOURI, NAILA.

MA GRANDE MÈRE.

MES TANTES, MES UNCLES.

MES AMIES, WISSAM, SOLTANA, SALMA, EL AID, ZOUHIR.

MANEL



Résumé

La wilaya de Khenchela, située à l'Est de l'Algérie, est l'une des Wilayas qui souffre d'une forte demande des ressources en eau dans ses différentes localités, en raison de l'importance de cette matière vivante. Le choix de ce sujet consiste à déterminer les caractéristiques physico-chimiques des deux sources thermales fortement utilisées par la population de la wilaya et par les autres wilayas pour la baignade. La première est la source thermale de Djaarir, située dans la commune de Bouhmama et la seconde source de Tamersit, située à la commune de Kheirane. Après quelques visites de la zone d'étude, nous avons effectué des prélèvements à analyser. Les données climatiques rassemblent températures, précipitations, ETR (évapotranspiration réelle), ETP (évapotranspiration potentielle), et déficit agricole sont effectuées pour déterminer l'équilibre hydrique. Une recherche spécifique est effectuée pour déterminer les différentes formations géologiques de la zone comprenant les deux sources. L'hydrochimie a permis de faire une classification de l'eau en utilisant les diagrammes de Piper, Stabler, Schoeler-Berkaloff, Wilcox et Riverside. L'interprétation des différents résultats et des diagrammes réalisés a été faite en les comparant aux normes de l'OMS et celles algériennes. La Configuration du climat et des formations géologiques affectent la qualité des eaux des deux sources qui sont non conformes pour l'usage humaine (potabilité) et pour l'irrigation des terres agricoles excepté pour la source Tamersit. Les populations utilisent les deux sources pour la cure thermique traditionnelle.

Mots clés : Hydrochimie, thermalisme, géologie, irrigation, Djaarir, Tamersit.

Abstract

The wilaya of Khenchela, located East of Algeria, has a high demand on water resources in their various localities, because of the importance of the living matter. The choice of this topic is to identify the physico-chemical characteristics of the two sources heavily used by the population of the province and other wilaya for swimming. The First thermal source studied is Djaarir, located in the municipality of Bouhmama. The second one is the Tamersit source, located in the municipality of Kheirane. After a few visits to the study area, we took samples to analyze. A gathering climate data (temperature, precipitation, ETR, ETP, and agricultural deficit) are performed to determine the water balance. Specific research is conducted to determine the different geological formations of the area comprising the two sources. The hydrochemistry helps us to classify water using diagrams such as Piper Diagrams, Stabler, Schoeler-Berkaloff, Wilcox and Riverside). The interpretation of different results and charts used was made by comparing these results with the WHO and Algerian standards. Climatic and geological configuration affects the water quality of the two sources which are unfit for human use (drinkable) and for irrigation of agricultural land except Tamersit source. People are used two sources for the traditional spa.

Key words : Hydrochemistry, thermal, geology, irrigation, Djaarir, Tamersit.

ملخص

ولاية خنشلة الواقعة شرق الجزائر تعد من بين الولايات التي يكثُر الطلب فيها على منابع المياه، بسبب أهميته واعتباره كمصدر حيوي. ان سبب اختيارنا للموضوع يعود لرغبتنا في تحديد المميزات الفيزيو-كيميائية للمنبعين الحراريين، كثيرا الاستعمال من قبل سكان الولاية و الولايات المجاورة والمستخدمان للاستحمام. المنبع الاول هو جعرير الواقع ببلدية بوحمامة، أما الثاني فهو منبع تمرسيت الواقع ببلدية خيران. بعد عدة زيارات للمنبعين تم أخذ عينات من أجل تحليلها. قمنا بدراسة بعض العوامل المناخية كالحرارة، التساقطات، التبخر المتوقع ETP، التبخر الحقيقي ETR، و العجز الزراعي من أجل دراسة التوازن المائي بالمنطقة. قمنا أيضا بدراسة المنطقة من حيث الخصائص الجيولوجية لكل منبع.

الهيدروكيمياء تسمح بتصنيف المياه، استعملنا عدة رسومات تخطيطية منها بيبير، ستابلر، شولر، ريفرسيد و ويلكوكس. تحليل مختلف النتائج المتحصل عليها ومقارنتها بمعايير المنظمة العالمية للصحة والمعايير الجزائرية، أوصلنا الى أن للعوامل المناخية و الجيولوجية تأثير في تمعدن مياه المنبعين، المنبعان غير صالحان للاستعمال الأدمي (مياه غير صالحة للشرب)، منبع جعرير غير صالح للسقي أما مياه تمرسيت فهي قابلة للإستعمال في ميدان الزراعة. المنبعين يستعملان من قبل الأشخاص من أجل التداوي الحموي التقليدي.

الكلمات المفتاحية : الهيدروكيمياء، الجيولوجيا، الحراري، السقي، جعرير، تمرسيت.

Table des matières

Table des matières

| | |
|---|------|
| Remerciements | |
| Dédicaces | |
| Résumés | |
| Liste des abréviations..... | i |
| Liste des tableaux..... | v |
| Liste des figures..... | vi |
| Liste des photos..... | viii |
| Introduction générale..... | 1 |
| I. Partie bibliographique | |
| Chapitre I : Généralités sur les eaux | |
| Introduction..... | 3 |
| I. Aperçu sur les eaux souterraines | 3 |
| I.1. Définition des eaux souterraines..... | 4 |
| I.2. Origine des eaux souterraines..... | 4 |
| I.2.1. Mécanisme de formation des eaux souterraines. | 4 |
| I.2.1.1. Cycle de l'eau..... | 4 |
| I.3. Alimentation des nappes..... | 5 |
| I.3.1. Mécanismes de l'infiltration..... | 5 |
| I.4. Ecoulement des eaux souterraines..... | 6 |
| I.5. Qualité de l'eau souterraine..... | 7 |
| I.5.1. Substance dissoutes..... | 7 |
| I.5.1.1. Composition d'un litre d'une eau souterraine..... | 7 |
| a) Eléments secondaires ou oligo-éléments et les éléments traces..... | 9 |
| b) Acidité de l'eau..... | 9 |
| I.5.1.2. Gaz dissous..... | 9 |
| I.6. Classification des eaux destinées à la consommation humaine..... | 9 |
| I.7. Eaux de source..... | 9 |
| I.7.1. Critères de qualité..... | 10 |
| I.7.1.1. Paramètres microbiologiques des eaux de source..... | 10 |
| I.8. L'eau minérale naturelle..... | 11 |
| I.8.1. Définition..... | 11 |
| I.8.2. Origine des eaux minérales..... | 11 |
| I.9. Eaux de sources thermales | 12 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| I.9.1. Définitions de l'eau thermale..... | 12 |
| I.9.2. Définition retenue dans le dictionnaire français d'hydrogéologie | 12 |
| I.9.3. Classification des eaux thermales..... | 12 |
| I.9.3.1. Selon l'origine..... | 12 |
| I.9.3.2. Selon la température..... | 12 |
| I.9.3.3. Selon l'origine géologique. | 13 |
| I.9.3.4. Selon la composition chimique..... | 14 |
| I.9.3.5. Selon la composition minérale..... | 14 |
| a. Eaux chlorurées sodiques..... | 14 |
| b. Eaux bicarbonatées (ou carboniques)..... | 14 |
| c. Eaux sulfatées..... | 14 |
| d. Eaux sulfurées..... | 14 |
| e. Eaux minéralisées (oligo métalliques)..... | 14 |
| I.9.4. Modes de fonctionnement des systèmes thermaux..... | 14 |
| I.9.5. Origine de la chaleur..... | 15 |
| I.9.5.1. Eau juvéniles..... | 15 |
| I.9.5.2. Réchauffement est minéralisation secondaires..... | 15 |
| a) Circulation profonde | 15 |
| b) Origine de la minéralisation..... | 15 |
| c) L'enrichissement en gaz..... | 16 |
| I.9.6. Thermalisme et Cure thermale..... | 16 |
| I.9.7. Sources thermales en Algérie..... | 16 |
| I.9.8. Stations thermales médicalisées en Algérie..... | 17 |
| Conclusion | 17 |

Chapitre II : La géothermie

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 18 |
| II.1. Principales sources d'énergies de la planète Terre..... | 18 |
| II.2. L'énergie géothermique..... | 18 |
| II.2.1. Définition de la géothermie..... | 19 |
| II.2.2. La pompe à chaleur..... | 19 |
| II.3. Sources de chaleur dans le globe terrestre, flux et gradient géothermique..... | 20 |
| II.3.1. Utilité de la géothermie..... | 21 |
| II.4. Types de géothermie..... | 21 |
| II.4.1. Géothermie peu profonde à basse température..... | 21 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| II.4.2. Géothermie profonde à haute température..... | 22 |
| II.4.3. Géothermie très profonde à très haute température..... | 22 |
| II.4.3.1. Géothermie haute énergie..... | 22 |
| II.4.3.2. Géothermie basse énergie..... | 22 |
| II.4.3.3. Géothermie très basse énergie..... | 23 |
| II.5. Principe de fonctionnement d'une installation géothermique..... | 23 |
| II.6. Avantages et inconvénients des installations de géothermie..... | 24 |
| II.6.1. Avantages..... | 24 |
| II.6.2. Inconvénients..... | 25 |
| II.7. Situation actuelle..... | 25 |
| II.8. Géothermie en Algérie..... | 25 |
| II.8.1. Données sur la géothermie en Algérie..... | 26 |
| Conclusion..... | 26 |
| Chapitre III : La zone d'étude | |
| Introduction..... | 28 |
| III. Présentation générale..... | 28 |
| III.1. Description générale et localisation de la wilaya de Khenchela..... | 28 |
| III.2. Caractères géomorphologiques, géologiques et pédologiques..... | 29 |
| III.2.1. Caractères géomorphologiques..... | 29 |
| III.2.1.1. Relief..... | 29 |
| III.2.1.1.1. Altitude..... | 30 |
| III.2.1.1.2. Pente..... | 30 |
| III.2.2. Géologie..... | 31 |
| III.2.2.1. Litho stratigraphie..... | 31 |
| III.2.2.1.1. Mésozoïque..... | 31 |
| a. Trias..... | 31 |
| • Jurassique..... | 31 |
| • b.1- Lias..... | 32 |
| • b.2- Dogger..... | 32 |
| • b.3- Malm..... | 32 |
| c. Crétacé..... | 32 |
| c.1- Crétacé inférieur..... | 32 |
| c.2- Crétacé supérieur..... | 32 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| c.2.1- Cénomanién..... | 33 |
| c.2.2- Turonien..... | 33 |
| c.2.3- Sénonien..... | 33 |
| c.2.4- Coniacien..... | 33 |
| c.2.5- Santonien..... | 33 |
| c.2.5.1- Le Santonien C4..... | 33 |
| c.2.5.2- Le Santonien C4r..... | 33 |
| c.2.6- Campanien..... | 33 |
| c.2.7- Maestrichtien..... | 33 |
| III.2.2.1.2. Cénozoïque..... | 34 |
| a- Paléogène..... | 34 |
| a.1- Paléocène..... | 34 |
| a.2- Eocène inférieur (Yprésien)..... | 34 |
| b- Néogène..... | 34 |
| b.1- Miocène..... | 34 |
| b.1.1- Aquitano-burdigalien..... | 35 |
| b.1.2- Langhien-serravalien..... | 35 |
| b.1.3- Tortorien..... | 35 |
| b.1.4- Tortorien supérieur..... | 35 |
| c. Le Quaternaire..... | 36 |
| III.2.3. Caractères pédologiques..... | 36 |
| III.3. Caractères hydrographiques..... | 37 |

II. Partie pratique

Chapitre IV : Etude climatologique de la zone d'étude

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 39 |
| IV .1 . Définitions..... | 39 |
| IV.1.1. Climat et climatologie..... | 39 |
| IV.2. L'information climatologique..... | 39 |
| IV.3. Brève description du système climatique..... | 40 |
| IV.4. La station de mesures..... | 40 |
| IV .5. Les facteurs climatiques..... | 40 |
| IV.5.1. La température..... | 41 |
| IV.5.1.1. Variations des températures moyennes annuelles..... | 41 |
| IV.5.1.2. Variations des températures moyennes mensuelles..... | 41 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| IV.5.1.3. Variations des températures minimales et maximales mensuelles..... | 42 |
| V.5.2. L'humidité..... | 43 |
| IV.5.3. Les précipitations..... | 43 |
| IV.5.3.1. Répartition mensuelle des précipitations..... | 44 |
| IV.5.3.2. Répartition annuelle des précipitations..... | 45 |
| IV.5.3.3. Le coefficient pluviométrique..... | 45 |
| IV.5.4. Facteurs secondaires..... | 46 |
| IV.5.4.1. Le vent..... | 46 |
| IV.5.4.2. La neige..... | 47 |
| IV.6. Caractérisation du climat..... | 47 |
| IV.6.1. Le diagramme ombrothermique de Gaussen..... | 47 |
| IV.6.2. Indice de Martonne..... | 48 |
| IV.6.3. Indice pluviométrique d'Emberger..... | 49 |
| IV.7. Régime saisonnier..... | 50 |
| IV.8. Le bilan hydrique..... | 51 |
| IV.8.1. Estimation de l'évapotranspiration..... | 51 |
| IV.8.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)..... | 52 |
| IV.8.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)..... | 52 |
| IV.8.2. Le bilan hydrologique selon Thornthwaite..... | 53 |
| Conclusion..... | 55 |
| Chapitre V : Matériel et méthodes | |
| Introduction..... | 56 |
| V. La zone d'étude..... | 56 |
| V.1. La source Djaarir..... | 56 |
| V.2. La source Tamersit..... | 57 |
| V.3. Caractères géomorphologiques, géologiques et pédologiques..... | 57 |
| V.3.1. Caractères géomorphologiques..... | 58 |
| V.3.1.1. Relief et altitude..... | 58 |
| V.3.1.1.2. Pente..... | 59 |
| V.3.2. Géologie des terrains comprenant les deux sources..... | 59 |
| V.3.3. Caractères pédologiques..... | 60 |
| V.4. Caractères hydrographiques..... | 60 |
| V.5. Prélèvement des échantillons..... | 61 |
| V.5.1. La source de Djaarir..... | 61 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| V.5.2. La source Tamersit..... | 61 |
| V.5.3. Prélèvement..... | 62 |
| V.6. Protocole expérimental..... | 63 |
| V.6.1. Matériels utilisés..... | 63 |
| V.7. Méthodes mesurés..... | 63 |
| V.7.1. Paramètres mesurés in situ..... | 63 |
| V.7.1.1. Température..... | 63 |
| V.7.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)..... | 64 |
| V.7.2. Paramètres mesurés au laboratoire..... | 64 |
| V.7.2.1. Conductivité (CE)..... | 64 |
| V.7.2.2. Salinité..... | 65 |
| V.8. Paramètres chimiques (cations et anions)..... | 65 |
| V.8.1. Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+}) par la méthode titrimétrique à l'EDTA..... | 65 |
| V.8.2. Sodium (Na^+) par la méthode spectrométrie à Flamm..... | 67 |
| V.8.3. Potassium (K^+) par la méthode spectrométrie à flamme..... | 68 |
| V.8.4. Chlorures (Cl^-) par la méthode de Mohr..... | 68 |
| V.8.5. Sulfates (SO_4^{2-}) par la méthode néphélométrique..... | 70 |
| V.8.6. Nitrates (NO_3^-) par la méthode spectrométrie d'absorption moléculaire..... | 70 |
| V.8.7. Nitrites (NO_2^-) par la méthode spectrométrie d'absorption moléculaire..... | 71 |
| V.8.8. Bicarbonate (HCO_3^-) alcalinité par la méthode titrimétrique de dosage du TA et TAC..... | 72 |
| Chapitre VI : Résultats et discussion | |
| Introduction..... | 74 |
| VI.1. Etude des paramètres physico-chimiques..... | 74 |
| VI.1.1. Paramètres physiques..... | 74 |
| VI.1.1.1. Température..... | 74 |
| VI.1.1.2. Potentiel d'Hydrogène (pH)..... | 75 |
| VI.1.1.3. Conductivité électrique (CE)..... | 76 |
| VI.1.1.4. Salinité..... | 77 |
| VI.1.2. Paramètres chimiques..... | 77 |
| VI.1.2.1. Cations..... | 77 |
| VI.1.2.1.1. Calcium (Ca^{2+})..... | 77 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| VI.1.2.1.2. Magnésium (Mg^{2+})..... | 78 |
| VI.1.2.1.3. Sodium (Na^{2+})..... | 79 |
| VI.1.2.1.4. Potassium (K^+)..... | 79 |
| VI.1.2.2. Anions..... | 78 |
| VI.1.2.2.1. Chlorures (Cl^-)..... | 80 |
| VI.1.2.2.2. Sulfates (SO_4^{-2})..... | 81 |
| VI.1.2.2.3. Bicarbonates (HCO_3^-)..... | 82 |
| VI.1.2.2.4. Nitrates (NO_3^-)..... | 83 |
| VI.1.2.2.5. Nitrites (NO_2^-)..... | 83 |
| VI.2. Paramètre organoleptique odeur..... | 83 |
| VI.3. Détermination du faciès chimique..... | 84 |
| VI.3.1. Diagramme de Piper..... | 84 |
| VI.3.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff..... | 85 |
| VI.3.3. Diagramme de Stabler..... | 86 |
| VI.4. Caractérisation des sources pour l'irrigation..... | 86 |
| VI.4.1. Qualité des eaux pour l'irrigation selon Riverside..... | 86 |
| VI.4.2. Qualité des eaux pour l'irrigation selon Wilcox..... | 87 |
| Conclusion et perspectives..... | 90 |
| Références bibliographiques..... | 92 |

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AVR : Avril

BHT: Bottom Hol Temperature.

B.R.G.M : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

CO₃H : Ions Bicarbonate.

C.E.N.E.A.P : Centre National d'Etudes et d'Analyses pour la Population et le Développement.

C.F : Conservation des Forêts.

CH₄ ; Méthane.

Cd : Cadmium.

Cu : Cuivre.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

Ca : Calcium.

Cl : Chlore.

Cl⁻ : Chlorure.

CO₃H : Bicarbonate.

°C : Degré Celsius.

C.E.E: Communauté Economique Européenne.

C.N.A.S : Caisse Nationale d'Assurance Sociale.

C.A.S.N.O.S : Caisse Nationale de Sécurité Sociale des Non-salariés.

D.E : Direction de l'Environnement.

D : Djaair.

D.P.A.T : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire.

D.S.P : Direction de la Santé et de la Population.

D.S.T : Direction de la Surveillance du Territoire (En France) .

D.H.W : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya.

E: EST Algérien.

EDTA : Sel di sodique de l'acide éthylène-diamine tétracétique.

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle.

ETP : Evapotranspiration potentielle.

Etc : Et cetera.

F.A.O : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Fév : Février.

F : Fluor.

Liste des abréviations

Fe : Fer.

Fig. : Figure.

GPS : Le Système de Positionnement Global.

g : Gramme.

Ha : Hectare.

H.A.P.E : Hiver, Automne, Printemps, Eté.

h : heure.

H₂ : Hydrogène.

H₂S : Sulfure d'hydrogène.

HR : Humidité relative

HCO₃⁻ : Bicarbonate.

H : Humidité.

H⁺ : ion d'hydrogène.

I : Iode.

I : indice d'aridité annuelle

Jan : Janvier.

Jui : Juin.

Juill : Juillet.

K⁺ : Potassium.

Km² : Kilomètre carré.

°K : Kelvin.

l : litre.

L : Un paramètre calculé en fonction de la température.

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud.

M.A.T.E.T : Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme.

mg : Milligramme.

ml : Millilitre.

m : Mètre.

moy : Moyenne.

moy max : Moyenne maximum.

moy min : Moyenne minimum.

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid.

Mg : Magnésium.

Mn : Manganèse.

Liste des abréviations

mm : Millimètre.

nm : Nanomètre.

NaOH : Hydroxyde de sodium.

N : Normalité.

Nov : Novembre.

Nbr : Nombre.

N : Nord Algérien.

NO_3^- : Nitrate.

NO_3^{-2} : Ion nitrate.

Na^+ : Sodium.

N_2 : Azote moléculaire.

NaCl : Chlorure de sodium.

NO_2^- : Ion de dioxyde d'azote.

NO_3^- : Azote nitrique.

NH_4^+ : Azote ammoniacal.

OH^- : ion hydroxyde.

OCT : October.

O.N.M.S.K : Office National Météorologique Station Khenchela.

O_2 : Oxygène moléculaire.

O.E.C.D : Organisation for Economic Co-operation and Development.

O : Ouest Algérien.

O.M.S : Organisation Mondial de la Santé.

pH : Potentiel de l'hydrogène.

P : Phosphore.

Pb : Plomb.

P : Précipitation.

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm).

Q : Indice pluviométrique d'Emberger.

R : Ruissellement.

RFU : Réserve facilement utilisable.

R.N.A.M.S : Ressources Naturelles et Aménagement des Milieux Sensibles.

SO_3 : Trioxyde de soufre.

SO_4^{-2} : Sulfate.

S.A.R : Sodium Absorption Ratio.

Liste des abréviations

S : Sud Algérien.

S/m : Siemens par mètre.

Sep : Septembre.

T Moy : Température moyenne.

T MIN : Température minimum.

T : Tamersit.

T° : Température.

TA : Taux d'alcalinité.

TAC : Taux d'alcalinité complet.

V : Volume.

W/m² : Watt /mètre carré (rapport).

X : Axe des X.

Y : Axe des Y.

Zn: Zinc.

Z : Axe des Z.

µg/l : Microgramme par litre.

% : Pourcentage.

< : Inferieur.

> : Superieur.

° : Degré.

' : Minute.

" : Seconde .

H : Coefficient pluviométrique.

µS/cm : Micros siemens par centimètre.

λ : Longueur d'onde.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| Tableau | Titre | Page |
|----------------|---|-------------|
| 01 | Concentrations admises en éléments majeurs | 8 |
| 02 | Concentrations admises en éléments acides | 8 |
| 03 | Limites de qualité microbiologique | 10 |
| 04 | Classification des eaux thermales selon Moret, (1946) | 13 |
| 05 | Solubilité des principaux gaz dans l'eau thermale | 16 |
| 06 | Différents types de géothermie | 23 |
| 07 | Les Coordonnées géographiques de la station de mesure | 40 |
| 08 | Classification climatique de Martonne | 49 |
| 09 | Valeur du quotient pluviométrique d'Emberger à Khenchela de 2005/2006 à 2014/ 2015 | 49 |
| 10 | Le régime pluviométrique saisonnier à la station d'El Hamma pour la période 2005/2006 à 2014/2015 | 50 |
| 11 | Teneurs en nitrites pour les eaux étudiées | 83 |
| 12 | Directive pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation | 87 |
| 13 | Classification des eaux à l'irrigation selon Wilcox | 89 |

Liste des figures

Liste des figures

| Figure | Titre | Page |
|---------------|--|-------------|
| 01 | Différents types d'eau sur la planète | 3 |
| 02 | Le cycle de l'eau | 5 |
| 03 | Ecoulement des eaux souterraines | 6 |
| 04 | Température des principales sources thermales en Algérie | 17 |
| 05 | Le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur | 20 |
| 06 | Technique d'exploitation d'une source géothermique | 24 |
| 07 | Ressources géothermales européennes identifiées | 25 |
| 08 | Carte de gradient géothermique du Sud algérien | 26 |
| 09 | Localisation géographique de la Wilaya de Khenchela sur la carte de l'Algérie | 28 |
| 10 | Situation de la wilaya de Khenchela | 29 |
| 11 | Carte administrative de la wilaya de Khenchela | 30 |
| 12 | Schéma structural simplifiée de la géologie de la wilaya de Khenchela | 35 |
| 13 | Carte des classes des sols de la wilaya de Khenchela | 37 |
| 14 | Carte hydrologique de la wilaya de Khenchela | 38 |
| 15 | Evolution de la température moyenne annuelle de la station de Khenchela pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 41 |
| 16 | Variation de la température moyenne mensuelle de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 42 |
| 17 | La répartition des températures moyenne de la station d'El Hamma pendant la période 2005/2006 à 2014/2015 | 42 |
| 18 | Evolution de l'humidité relative mensuelle moyenne de la station de Khenchela pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 43 |
| 19 | Carte de pluviométrie de la wilaya de Khenchela | 44 |
| 20 | Précipitation moyenne mensuelle de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 44 |
| 21 | Evolution des précipitations annuelles de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 45 |
| 22 | Les variations de coefficient pluviométrique de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 46 |
| 23 | Répartition moyenne du vent dans la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 46 |
| 24 | La répartition moyenne de la neige de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 47 |
| 25 | Diagramme ombrothermique de la station d'El Hamma | 48 |
| 26 | Climagramme d'Emberger de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 50 |

Liste des figures

| | | |
|----|---|----|
| 27 | Le régime pluviométrique saisonnier à la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 51 |
| 28 | Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques de la station de Khenchela pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 54 |
| 29 | Variation mensuelle des résultats du bilan hydrique de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015 | 54 |
| 30 | Carte de la localisation des deux sources | 56 |
| 31 | Photo satellitaire de la source de Djaarir par Google Earth | 57 |
| 32 | Photo satellitaire de la source de Tamersit par Google Earth | 57 |
| 33 | Carte de relief de la wilaya de Khenchela | 58 |
| 34 | Carte d'altitude de la wilaya de Khenchela | 58 |
| 35 | Carte des pentes de la wilaya de Khenchela | 59 |
| 36 | Carte géologique de la wilaya de Khenchela | 60 |
| 37 | Carte des classes des sols de la wilaya de Khenchela | 60 |
| 38 | Carte hydrologique de la wilaya de Khenchela | 61 |
| 39 | Température des deux sources | 75 |
| 40 | Comparaison entre le pH des deux sources | 75 |
| 41 | Comparaison des conductivités électrique | 76 |
| 42 | Comparaison de la salinité | 77 |
| 43 | Les concentrations en Ca^{2+} | 78 |
| 44 | Les concentrations en ions Mg^{2+} | 78 |
| 45 | Les concentrations en ions Na^+ | 79 |
| 46 | Les valeurs de K^+ des deux sources | 80 |
| 47 | Variations spatiales des valeurs moyennes en Cl | 81 |
| 48 | Les concentrations de SO_4^{2-} des deux sources | 82 |
| 49 | Concentration de HCO_3^- | 82 |
| 50 | Concentration de NO_3^- | 83 |
| 51 | Représentation des deux sources sur le diagramme de Piper | 84 |
| 52 | Représentation des sources sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff | 85 |
| 53 | Représentation des deux sources sur le diagramme de Stabler | 86 |
| 54 | Représentation des deux sources sur le diagramme de Riverside | 88 |
| 55 | Représentation des deux sources sur le diagramme de Wilcox | 89 |

Liste des photos

Liste des photos

| Photo | Titre | Page |
|--------------|--|-------------|
| 1 | La source de Djaarir | 61 |
| 2 | La source Tamersit | 62 |
| 3 | Mesure des paramètres physiques in situ de la source Djaarir | 62 |
| 4 | Prélèvement des échantillons de la source Tamersit | 62 |
| 5 | Matériels utilisés | 63 |
| 6 | Mesure des paramètres physiques in situ de la source Tamersit | 64 |
| 7 | Mesure des paramètres physiques au laboratoire | 65 |
| 8 | Titration à l'EDTA pour détecter le calcium de deux échantillons | 66 |
| 9 | Titration à l'EDTA pour détecter le magnésium d'eau de la source Tamersit | 67 |
| 10 | Dilution et titration à l'EDTA pour l'eau de la source Djaarir | 67 |
| 11 | Etapes du dosage des chlorures pour l'eau de la source Djaarir (Après dilutions) | 69 |
| 12 | Dosage des chlorures pour l'eau de la source Tamersit | 69 |
| 13 | Dosage des sulfates des deux sources | 70 |
| 14 | Titration d'alcalinité des deux sources | 72 |

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une richesse de notre planète. Environ 71 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau (Wehner et Gehring, 1992,1995), elle est importante en toutes les formes, liquide, solide ou sous forme gazeuse. Et se répartie entre les eaux de surface comme les cours d'eau, les rivières, les mers et les eaux souterraines, omniprésentes dans le sous-sol, constituant les eaux de source, les eaux minérales et les eaux thermales, caractérisées par des propriétés organoleptiques et physico chimiques particulières. Les eaux thermales ont chacune une composition différente en fonction des endroits par lesquels elles sont passées, et selon les sels minéraux qu'elles contiennent sont classées : eau bicarbonatée, sulfatée, sulfurée ou chlorurées. La coutume populaire, ainsi que des propriétés médicales avérées, font de ces sources des destinations populaires, et des lieux pour des centres de soins, plus ce sont des eaux jouant un rôle important dans le domaine thérapeutique et économique, car la géothermie est la seule énergie réellement renouvelable qui permet de produire chaleur et/ou électricité (Druon, 2012). C'est la raison pour laquelle nous avons discuté dans notre recherche ce type d'eaux des deux sources naturelles thermales à la wilaya de Khenchela à savoir la source Djaarir et celle de Tamersit sélectionnées. La source Djaarir est localisée à la commune de Bouhmama et la source Tamersit à la commune de Kheirane. En plus de l'importance de ces eaux dans l'usage médical et thérapeutique et la production de la chaleur et la génération de l'énergie électrique ; nous posons la question sur la validité de l'utilisation de ces eaux à l'irrigation des terres agricoles ; tout en cherchant à déterminer leur validité en tant que source d'eau buvable.

Pour mieux aborder ce problème, nous avons adopté la méthodologie suivante :

Une partie bibliographique, scindée en chapitres :

Chapitre 1. Généralité sur les eaux ;

Chapitre 2. La géothermie ;

Chapitre 3. La zone d'étude ;

Une partie pratique concernée par les chapitres :

Chapitre 4. Etude climatologique ;

Chapitre 5. Matériels et méthodes ;

Chapitre 6. Résultats et discussions.

Puis conclusions

L'approche résultats et discussion dans ce travail nous a permis de :

-
- Connaître les faciès chimiques des deux sources et leur validité dans le domaine agricole ;
 - Déterminer leurs origines géologiques ;
 - Connaître la composition chimique de ces eaux et les éléments les plus dominants dans les deux sources ;
 - Comparer les deux sources entre elles et interpréter les données d'analyses à l'aide de diagramme de Piper, Stabler, Schöller et Berkloff, Wilcox et Riverside.

I. Partie
bibliographique

Chapitre I : généralités sur les eaux

Introduction

L'eau est une ressource indispensable à la vie, recouvrant près des trois quarts de la surface terrestre (Flammarion, 1872). Elle existe dans l'atmosphère et sous la terre, principalement dans les océans mais aussi dans les rivières, les lacs, la neige et les glaciers.

- L'eau atmosphérique : présente dans l'atmosphère en tant que solide, liquide ou gaz ;
- L'eau de surface : sur terre, dans les cours d'eau, les lacs ou les terres humides ;
- Les eaux souterraines : omniprésentes dans le sous-sol, dans les interstices des particules de roches et de sol, ou dans les crevasses et fissures des roches (Sallot et al., 2006).

Les eaux souterraines représentent une source cachée contenue dans les nappes souterraines dont la quantité est bien supérieure à celle des eaux de surface (Quevauviller, 2010).

Le Hammam a de tout temps, fait partie de notre vie quotidienne, comme lieu d'hygiène ou de purification à travers l'eau. La fréquentation des sources thermales, en plus du rôle social joué par le hammam, se fait également dans un but de bénéficier des vertus curatives ou thérapeutiques liées à la température et aux propriétés physico-chimique des eaux.

I. Aperçu sur les eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent le réservoir le plus important d'eau douce au niveau mondiale, avec 97 % des ressources en eau douce de la planète, excluant les glaciers. Les 3 % restant sont composés principalement d'eaux de surface (Figure 1) (Gilli et al., 2012).

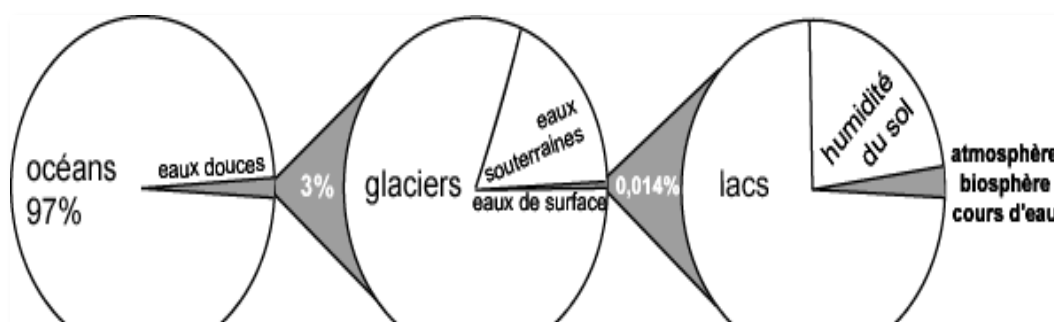


Figure 1: Différents types d'eau sur la planète (Gilli et al., 2012).

Jusqu'à une époque récente, les eaux souterraines étaient considérées comme source d'eau potable. Elles représentent un élément important du cycle de l'eau, en particulier pour la

maintenance des zones humides et du débit des rivières, jouant le rôle de tampon durant les périodes de sécheresse, assurant donc le niveau de base des systèmes aquatiques de surface. Dans de nombreuses rivières, plus de 50 % du débit annuel provient des eaux souterraines. Par exemple, pour répondre à leur besoins domestiques, environ 75 % des habitants de l'union européenne dépendant des eaux souterraines (Quevauviller, 2010).

I.1. Définition des eaux souterraines

L'eau souterraine est l'eau qui inclue les eaux sous toutes leurs formes, situées au dessous de la surface du sol, jusqu'au moment où elles émergent naturellement de la terre, sous forme de source, moment à partir du quel elles sont considérées eaux de surface (F.A.O., 1971).

I.2. Origine des eaux souterraines

Les nappes sont contenues dans des terrains réservoirs appelés aquifères. La porosité et la structure du terrain déterminent le type de nappe et le mode de circulation souterraine. Une nappe peut être libre ou phréatique si elle est suffisamment proche de la surface pour être accessible par puits, et alimentée directement par l'infiltration des eaux de pluie. Un cas particulier est représenté par les nappes alluviales dans les terrains alluvionnaires sur lesquels circule un cours d'eau. La qualité de ces eaux est alors directement influencée par la qualité de la rivière. Une nappe peut être captive si elle est emprisonnée entre deux couches de terrains imperméables ; les nappes de ce type sont les plus fréquentes et généralement les plus profondes, ayant une certaine pression : leur niveau piézométrique se situe généralement entre leur toit imperméable et la surface du sol. Elles sont dites artésiennes quand ce niveau se situe au-dessus de la surface du sol (Degrémont, 2005).

I.2.1. Mécanisme de formation des eaux souterraines

I.2.1.1. Cycle de l'eau

De l'océan à la terre, le cycle de l'eau est principalement lié à l'évaporation, générant de la vapeur d'eau transportée sur les continents sous forme de pluie. Cette étape présente l'originalité de ne déplacer que l'eau dans l'atmosphère. Lors de l'évaporation la quasi-totalité des minéraux restent dans l'océan. Ceci conduit à une concentration des éléments minéraux dans l'eau de mer. L'eau retourne à l'océan en suivant deux voies : les eaux de surface ou les eaux souterraines. Ces deux voies sont très liées, en raison des échanges entre rivières et aquifères en de nombreux points de parcours (figure 2) (Olivier, 2015).

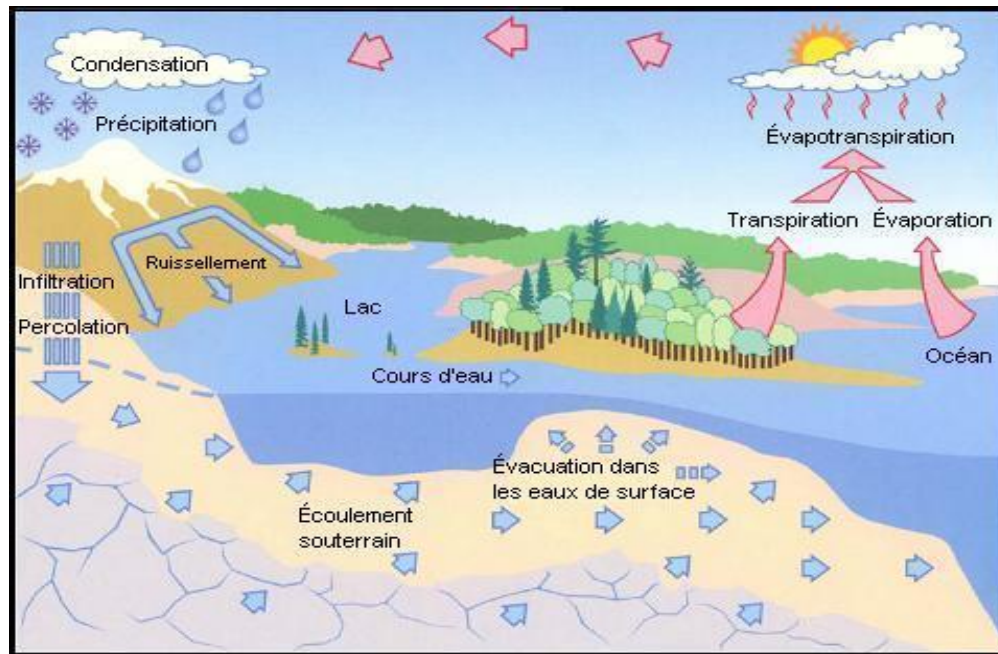


Figure 2 : Cycle de l'eau (Hugh, 2007).

Les sols représentent une étape importante dans ce processus, car ils redirigent les flux d'eau dans trois directions suivant les phénomènes de :

- Ruissellement : Une partie de l'eau va s'écouler en surface vers les rivières ;
- Evapotranspiration : Une partie va s'évaporer ou être absorbée par les plantes et ensuite libérée dans l'atmosphère par transpiration ;
- Infiltration : l'eau résultante reste dans le sol et descend progressivement jusqu'aux eaux souterraines. Ces trois phénomènes se produisent sur des échelles de temps très différentes (Atteia, 2015).

I.3. Alimentation des nappes

Ce sont principalement les pluies et non les rivières qui alimentent les nappes tout au moins sous climat tempéré et dans la plupart des cas et des situations hydrologiques (Jean, 2004).

I.3.1. Mécanismes de l'infiltration

Le devenir de l'eau apportée par une pluie diffère en fonction de nombreux facteurs en particuliers :

- Le volume et la durée de la précipitation de saison ;
- La pente du terrain ;
- La nature du terrain, sa perméabilité, la taille et la connexion des pores entre eux, ainsi que l'état de la végétation naturelle et les pratiques culturales (Hermann, 2004).

Tous ces facteurs sont à l'origine de l'extrême variabilité spatiale et temporelle de la recharge des nappes. Le mécanisme de la recharge est plus ou moins lié au ruissellement : on constate dès l'origine un partage entre eau infiltrée et eau ruisselée. L'eau d'un épisode pluvieux selon l'intensité de celui-ci sature plus ou moins rapidement la couche superficielle. Si celle-ci est peu perméable (région argileuse) et si la pente est suffisante, un ruissellement se déclenche et contribue à l'alimentation des cours d'eau, voire déclenchement d'une crue (Hermann, 2004).

I.4. Ecoulement des eaux souterraines

Les eaux souterraines ne sont pas immobiles, elles s'écoulent dans les aquifères par le biais de différences de pressions ou l'écoulement peut être ralenti par divers obstacles entre les points de recharge à sa sortie de l'aquifère (figure 3).

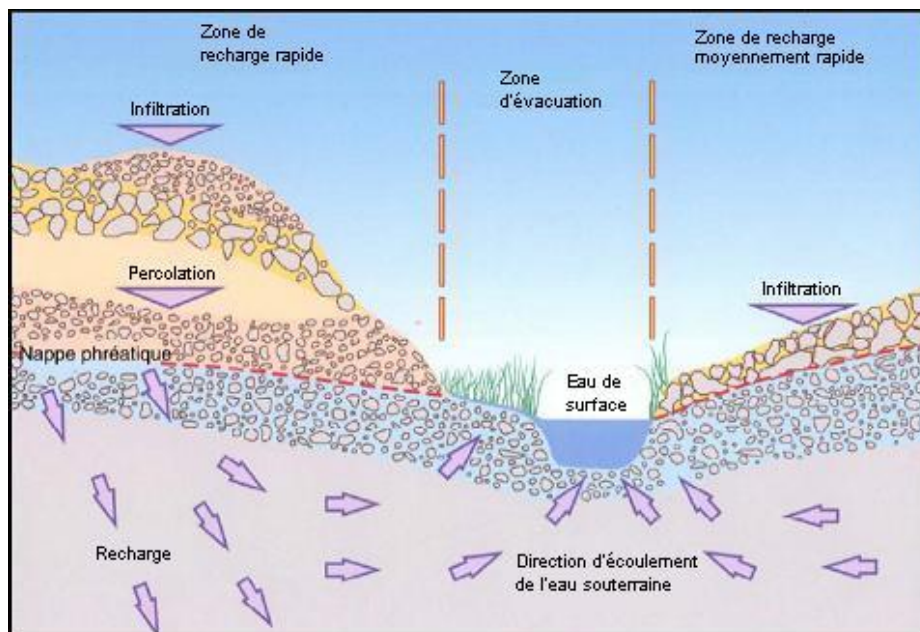


Figure 3 : Ecoulement des eaux souterraines (Hugh, 2007).

Dans certains cas, des formations de roches imperméables (ou aquicludes), telles que des schistes, stoppent complètement tout écoulement, alors que d'autres strates géologiques (ou aquitards), telles que des lentilles d'argiles présentes dans des couches sableuses, peuvent avoir l'effet de ralentir les écoulements. Le débit d'écoulement des eaux souterraines dépend de la perméabilité et de la porosité des aquifères et du gradient de pression. Les débits d'écoulement des eaux souterraines sont très faibles en comparaison à ceux des eaux de surface. Certaines eaux souterraines provenant de bassins alluviaux profonds ont un âge qui

peut être d'un millier, voire de milliers d'années, la lenteur des écoulements contribue fortement à la pureté des eaux souterraines car les concentrations de contaminants sont fortement atténuées durant leur parcours long vers la surface. Les eaux souterraines peuvent également s'enrichir en éléments présents dans les roches (Haasteren, 1993).

I.5. Qualité de l'eau souterraine

A la différence des eaux superficielles, l'eau souterraine correctement captée ne comporte généralement pas ou peu de matières en suspension ou de bactéries, car elle est naturellement filtrée (Hermann, 2004).

I.5.1. Substance dissoutes

L'eau chimiquement pure n'existe pas, même l'eau de pluie qui alimente les nappes contient naturellement quelques milligrammes par litre de différents corps chimiques : un peu de sel marin entraîné par les nuages, quelques ions nitriques et sulfuriques apportés par les pollutions atmosphériques des grandes zones industrielles ou par les effluves des épandages de lisier. Il est donc difficile, de traiter de la qualité naturelle des eaux sans évoquer les diverses pollutions, mais comme l'affirmait Claude Bernard : tout est poison, rien n'est poison. C'est surtout lors de sa phase d'infiltration, dans la zone non saturée, que l'eau, en contact intime avec une matière minérale très divisée, se charge en sels dissous. Ensuite au fil de son parcours souterrain, elle continue d'évoluer. On observe toujours une tendance à l'équilibre chimique entre les sels qu'une eau contient et la roche qu'elle imprègne. L'eau garde la mémoire géochimique des aquifères qu'elle a parcourus : cette particularité permet aux hydrogéochimistes de déterminer l'origine de certaines ressources (Hermann, 2004).

I.5.1.1. Composition d'un litre d'une eau souterraine

A 4 C°, un litre d'eau souterraine signifie environ 1 kilogramme d'eau, moins d'un gramme de sels minéraux (CO₃H, SO₃, Cl, NO₃, Ca, Mg, Na, K), quelques dizaines de milligrammes de gaz dissous (O₂, CO₂, N₂), quelques milligrammes d'oligoéléments (I, F, Fe, P, Mn), moins d'un milligramme de traces métalliques (Cu, Zn, Pb, Cd). Les éléments majeurs sont le calcium et le magnésium ainsi que le sodium et le potassium ; ces substances sont maintenues en solution par l'effet de divers acides (bicarbonate sulfurique, chlorhydrique ou nitrique). Tout se passe comme si l'eau contenait un cocktail de bicarbonates de calcium de nitrate de potassium, de chlorures de sodium (Tableau 1). En réalité, tous ces éléments sont

dissociés dans l'eau liquide à l'état d'ions. Le total des sels dissous peut être assimilé au résidu sec, qui caractérise la minéralisation globale de l'eau (Hermann, 2004).

Tableau 1: Concentration admises en éléments majeurs (mg/l) (Hermann, 2004).

| Elément | Niveau guide | Concentration minimale souhaitable | Concentration maximale admissible |
|-----------|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Calcium | 100 | 10 | - |
| Magnésium | 30 | 5 | 50 |
| Sodium | < 20 | - | 100 |
| Potassium | < 10 | - | 12 |

A l'état naturel, les éléments majeurs donnent à l'eau sa carte d'identité et sont caractéristiques des gîtes aquifères. L'élément le plus fréquent dans l'eau souterraine est le calcium emprunté lors de la phase d'infiltration au calcium des sols et des roches sous l'effet de l'acide issu du gaz carbonique. Le calcium et le magnésium entraînent à peu près les mêmes effets ; si ces corps sont abondants, on dit que l'eau est dure.

Le sodium provient soit de la pluie, déjà un peu salée de par son origine maritime, soit de certains minéraux tels que les micas et le chlorite parfois de lessivages profonds de gisements de sel gemme. Il est surtout cédé par les roches granitiques : ce sont surtout les feldspaths en décomposition qui libèrent cet élément (Tableau 2).

Tableau 2 : Concentration admises en éléments acides (mg/l) (Hermann, 2004).

| Elément | Niveau guide | Concentration minimale souhaitable | Concentration maximale admissible |
|--------------------------------|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| CO ₃ H ⁻ | 30 | - | - |
| Cl ⁻ | 5 | - | 200 |
| SO ₄ ⁻² | 5 | - | 250 |
| NO ₃ ⁻² | - | - | 50 |

Les quatre éléments majeurs métalliques ou cations de l'eau sont utiles et nécessaires, ils donnent à l'eau ses qualités gustatives. Ce n'est que par excès qu'ils peuvent être gênants, néfastes ou dangereux pour la santé, notamment le sodium dans le cas des régimes sans sel (Hermann, 2004).

a) Eléments secondaires ou oligo-éléments et les éléments traces

Les oligo-éléments (I, F, Fe, P, Mn) sont présents à des teneurs proches de 0,1 à 1 mg/l. Les éléments en trace ou en infra-trace sont potentiellement très nombreux et leur concentration s'exprime en général au millionième du gramme ($\mu\text{g/l}$) d'eau. On y trouve, le cuivre, le plomb, le zinc et le cadmium, ce sont souvent des métaux lourds (Hermann, 2004).

b) Acidité de l'eau

L'équilibre entre acides et métaux n'est pas toujours naturellement réalisé. S'il subsiste un excès d'acide bicarbonique, l'eau est agressive, elle peut attaquer chimiquement et dissoudre certaines substances, et notamment corroder les tubes de forage et les canalisations. À l'inverse, une eau déséquilibrée, surchargée en sels, est incrustante et a tendance à boucher les conduites par entartrage. Un indicateur, le pH, décrit ces propriétés de l'eau qui ont une grande incidence technique et économique. Pour une eau de bonne qualité, il est souhaitable que le pH oscille entre 6,5 et 8,5 (Hermann, 2004).

I.5.1.2. Gaz dissous

A côté du gaz carbonique très soluble dans l'eau, on trouve également dans l'eau souterraine divers gaz dissous à des concentrations variables. L'oxygène dissous comme dans les eaux de surface, joue un rôle important dans l'épuration naturelle par biodégradation. Il joue un grand rôle lors de la mobilisation du fer et du manganèse dans l'eau des nappes, ou lors de la dénitrification naturelle par certaines bactéries (Hermann, 2004).

I.6. Classification des eaux destinées à la consommation humaine

L'eau destinée à la consommation humaine est généralement classée en quatre catégories principales : eau de robinet, eau de source, eau potable et eau minérale (Bauner et al., 2010).

I.7. Eaux de source

Les sources représentent l'émergence des eaux souterraines, plus fréquemment rencontrées dans les régions montagneuses. Une Eau de Source est une eau destinée à la consommation humaine dans son état naturel et mise en bouteille à la source. Elle doit satisfaire aux conditions de l'exploitation, à certaines exigences microbiologiques et physico-chimiques (Delarras et al., 2010).

I.7.1. Critères de qualité

I.7.1.1. Paramètres microbiologiques des eaux de source

L'analyse des paramètres microbiologiques commence au moins après trois jours de prélèvement au captage, le conditionnement et les échantillons sont conservés à basse température. Les critères de qualité sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 03: Limites de qualité microbiologique (Delarras et al., 2010).

| Paramètre microbiologique | Limites de qualité | Notes |
|--|--------------------|--|
| Coliforme totaux | 0 à 250 ml | A l'émergence et au cours de leur commercialisation |
| Escherichia coli | 0 à 250 ml | A l'émergence et au cours de leur commercialisation |
| Entérocoques | 0 à 250 ml | A l'émergence et au cours de leur commercialisation |
| Pseudomonas aeruginosa | 0 à 250 ml | A l'émergence et au cours de leur commercialisation |
| Bactérie sulfitoréductrices, y compris les spores | 0 à 50 ml | A l'émergence et au cours de leur commercialisation |
| Numération de germes aérobies résiliables mesurés à 22°C | 100 ml | A l'émergence |
| Numération de germe aérobies revivifiables mesurés à 37°C | 20 ml | Au cours de leur commercialisation les analyse devant être commencées dans les 12 heures suivant le conditionnement |
| Micro-organisme pathogènes cayptosporidium giardia, Legionella species et Legionella pneumophila | Non détectées | A l'émergence et au cours de leur commercialisation Le volume filtré doit être celui préconisé dans la méthode normalisée lorsqu'elle existe. |

I.7.1.2. Critères de qualité physico-chimique des eaux de sources

Les critères de qualité physico-chimique des eaux de sources se distinguent par :

- une absence de phosphates, de bore et d'ion ammonium ;
- une absence de métaux lourds d'origine anthropique (plomb, cadmium, cuivre...) ;
- une très faible quantité de carbone organique total souvent inférieure à 1 mg/l.

Ces eaux ne doivent pas contenir de parasites ni de virus responsables des épidémies hydriques, ni encore de toute désinfection par des oxydants violents comme le chlore. Il en résulte que les eaux de sources peuvent être consommées sans modération, par toutes les catégories de population : vieillards, adultes, personnes immunodéprimées, sportifs, femmes enceintes, enfants et nourrissons (Tréherne, 2009).

I.8. L'eau minérale naturelle

I.8.1. Définition

C'est l'eau qui répond à la définition plus stricte : l'eau minérale naturelle doit se distinguer par sa provenance géologique particulière, par la nature et la quantité de ses composants minéraux, par sa pureté originelle et par une composition et une température constantes, dans les limites des variations naturelles. Ces caractéristiques doivent avoir été vérifiées par des procédés scientifiquement reconnus, selon des critères : physique, chimique et physico-chimique, hydrogéologiques et géologiques, microbiologique (Bauner et al., 2010).

I.8.2. Origine des eaux minérales

Une eau minérale naturelle peut avoir trois origines : superficielle, profonde ou mixte. Les eaux minérales naturelles d'origine superficielle sont communément appelées eaux Vadoses (météoriques) ou géothermales. Ce sont des eaux de précipitations, froides, infiltrées à de grandes profondeurs de l'écorce terrestre, le long de fissures ou de couches de terrains imperméables. L'émergence de ces eaux se fait aux niveaux d'accidents de l'écorce. Elles pénètrent par des fissures à partir de terrains poreux, ruisseler sur des zones souterraines puis remonter par des griffons : on parle de cycle hydrogéologique (Auby, 1994).

Les eaux minérales naturelles d'origine profonde sont communément appelées eaux juvéniles. Elles résultent de la condensation progressive d'émanations gazeuses du magma se refroidissant pendant leur remontée. Elles émergent essentiellement dans des régions volcaniques du fait de leur relation plus ou moins directe avec les zones magmatiques et sont piégées lors du refroidissement de l'écorce terrestre et par conséquent n'ont jamais participé à un cycle hydrogéologique. La majorité des eaux minérales ont une origine mixte : elles résultent d'un mélange, dans des proportions variables lors de leur remontée, entre des eaux juvéniles d'origine profonde et des eaux vadoses superficielles (Auby, 1994).

I.9. Eaux de sources thermales

Les eaux thermales sont un des phénomènes les plus généraux de l'époque actuelle. Les eaux chaudes sont connues de tous temps et utilisées depuis l'antiquité pour les bains. Hormis leur température, elles possèdent généralement des caractéristiques particulières : gaz, odeur, minéralisations. L'augmentation de la température et de la pression permet la dissolution des sels et de gaz qui vont enrichir l'eau de manière anormale (Lecoq, 1839 ; Gilli et al., 2012).

I.9.1. Définitions de l'eau thermale

C'est une eau minérale possédant les mêmes caractéristiques générales qu'une eau minérale, mais sa température doit être supérieure à 45°C pour obtenir l'appellation de thermale; au dessus de cette température les eaux sont soit tièdes soit mésothermales. A cette définition théorique se greffe une acceptation pratique : est considéré comme eau thermale une eau dont la température dépasse les 30°C. Cette diminution de la chaleur permet d'inclure dans le groupe des eaux thermales un plus grand nombre de source minérale (Penez, 1994).

I.9.2. Définition retenue dans le dictionnaire français d'hydrogéologie

Eau souterraine naturellement chaude à son émergence (source, puits jaillissant) et utilisable de ce fait à des fins particulières : thermalisme et chauffage. La notion de température est délicate à apprécier puisque des eaux peuvent apparaître plus ou moins chaudes par rapport à leur environnement selon les saisons (Gilli et al., 2012).

I.9.3. Classification des eaux thermales

En 1946, Moret proposa 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 4).

Tableau 4 : Classification des eaux thermales (Moret, 1946).

| Type d'émergence | Origine des eaux | Cause de la remontée | Origine de la température |
|--------------------------------|------------------|---|--|
| Diaclases Failles Filons | Vadose | Pression hydrostatique Force expansive de la vapeur d'eau | Gradient géothermique |
| Contact sédimentaire | Juvénile | Gaz en suspension | Volcanisme |
| Plissement Griffon diffus | Mixte | Différence de densité Capillarité | 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, de leur origine géologique, de la composition chimique et de la composition minérale (Moret, 1946).

I.9.3.1. Selon l'origine

C'est dans ce type d'eaux souterraines que se trouvent les eaux thermales :

- **Superficielle** : mers et lacs ;
- **Infiltration** : Réseau hydrologique souterrain, dont l'origine est le cycle hydrologique (Main, 2001).

I.9.3.2. Selon leur température

Bien que le mot "thermal" évoque l'idée de chaleur, toutes les eaux ne sont pas chaudes. Leur thermalité va de 7 °C dans certains forages jusqu'à 81,5 °C (eaux chaudes-aigues).

On distingue ainsi trois catégories :

- **Eaux froides** (de 7 à 15 °C), réservées à l'usage interne (boisson) ;
- **Eaux mésothermales** (de 25 à 34 °C), généralement de minéralisation faible, utilisées pour les bains prolongés ;
- **Eaux hyperthermales** (de 48 à 81 °C), souvent radioactives (Main, 2001).

I.9.3.3. Selon l'origine géologique

- **Eaux magmatiques** : dont l'origine est à caractère éruptif et le débit constant en composition et température,

➤ **Eaux telluriques** : Leur débit varie suivant l'époque de l'année puisqu'il provient de l'infiltration des pluies (Main, 2001).

I.9.3.4. 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 s'en mélangent avec les eaux froides et produisent des sources acides, avec un pH inférieur à 7, présentant un aspect boueux causé par l'acidité de l'eau qui corrode la roche environnante. Dans le cas des sources alcalines, le pH est supérieur à 7, et l'eau est propre et transparente (Hours, 2012).

I.9.3.5. Selon leur composition minérale

La classification des eaux selon la composition minérale concerne les eaux fortement minéralisées et distingue 5 grandes familles :

a. Eaux chlorurées sodiques

Elles sont chlorurées sodiques fortes : froides, neptuniennes, elles contiennent une grande concentration en éléments secondaires, comme le magnésium ; ou chlorurées sodiques faibles ou encore carbo-gazeuses (Main, 2001).

b. Eaux bicarbonatées (ou carboniques)

Ce sont des eaux bicarbonatées sodiques ; ou bicarbonatées calciques et sodico-calciques ; ou encore bicarbonatées mixtes chlorurées, polymétalliques (Main, 2001).

c. Eaux sulfatées

Ce sont des eaux sulfatées calciques à faible minéralisation ; ou sulfatées mixtes, chlorurées et bicarbonatées ; ou encore sulfatées sodico-magnésiennes fortes (Main, 2001).

d. Eaux sulfurées

Ce sont des eaux sulfurées sodiques ; ou Sulfurées mixtes sodico-calciques et sodico-chlorurées ; ou encore sulfurées calciques, hyposulfitées (Main, 2001).

e. Eaux minéralisées (oligo métalliques)

Ce sont des eaux ferrugineuses ; ou cuivreuses ; ou encore arsenicales (Main, 2001).

I.9.4. Modes de fonctionnement des systèmes thermaux

Le fonctionnement des systèmes thermaux est marqué par trois étapes :

- un transfert des eaux météoriques vers la profondeur ;
- un réchauffement des eaux ;
- une remontée rapide à la surface (Gilli et al., 2012).

I.9.5. Origine de la chaleur

I.9.5.1. Eau juvéniles

Les roches du manteau contiennent environ 0,3 % d'eau qui, par dégazage peut atteindre l'hydrosphère, entraînant un cortège de sels minéraux caractéristiques. De l'eau est entraînée vers le manteau dans les zones de subduction. elle peut être restituée par le volcanisme ou alimenter des sources hydrothermales profondes dans les zones de dorsales océaniques (Gilli et al., 2012).

I.9.5.2. Réchauffement et minéralisation secondaires

Cette fraction juvénile intervient peu dans la composition des eaux thermominérales dont l'origine est essentiellement météorique. L'eau peut, se réchauffer en pénétrant plus ou moins profondément à l'intérieur du sous-sol ou en circulant plus superficiellement dans les édifices volcaniques et les zones d'anomalie thermique. Les travaux de Blavoux et Letolle sur les isotopes ont permis de prouver l'origine météorique des eaux des sources thermales (Gilli, et al., 2012).

a) Circulation profonde

Lorsque l'on s'enfonce sous terre la température augmente progressivement avec un gradient proche de 1 °C pour 30 m. L'eau qui circule en profondeur se charge donc en calories qui pourront parvenir jusqu'en surface. A 500 m de profondeur la température dépasse 150 °C et peut fréquemment atteindre 200 °C. Cette augmentation de la température peut aussi provenir d'anomalies thermiques plus ou moins proches de la surface. Il est difficile de savoir jusqu'où les eaux peuvent s'enfoncer sous terre et quelle peut être la température maximale. L'augmentation de pression permet à l'eau de circuler sous forme liquide à des températures supérieures à 100 °C. En remontant, elle se transforme en vapeur pour alimenter les geysers (Gilli et al., 2012).

b) Origine de la minéralisation

La minéralisation augmente avec la pression. L'augmentation de température peut aussi favoriser la dissolution de certains minéraux comme la silice, ou au contraire favoriser leur précipitation comme les carbonates. Le temps de séjour est également une donnée

fondamentale, car certaines réactions de dissolution sont très lentes. La minéralisation va donc être fonction de la profondeur atteinte et du temps de transit dans le système profond (Gilli et al., 2012).

c) L'enrichissement en gaz

L'eau se charge en gaz. Selon la loi de Henry, plus la pression augmente plus la quantité dissoute est importante. On peut noter sur le tableau 5 les valeurs importantes de la solubilité du CO₂ et de H₂S ce qui permet d'expliquer pourquoi les eaux thermominérales sont souvent pétillantes ou sentent le soufre (Detay, 1993).

Tableau 5: Solubilité des principaux gaz dans l'eau thermale (Detay, 1993).

| Gaz | Solubilité en mg .l ⁻¹ |
|--|-----------------------------------|
| Azote (N ₂) | 23,3 |
| Oxygène (O ₂) | 54,3 |
| Gaz carbonique (CO ₂) | 2318 |
| Méthane (CH ₄) | 32,5 |
| Hydrogène (H ₂) | 1,6 |
| Sulfure d'hydrogène (H ₂ S) | 5112 |

I.9.6. Thermalisme et Cure thermale

"Thermae" signifie "chaleur" en grec, et a donné son nom d'origine au thermalisme qui est un ensemble de techniques utilisant les eaux dans un but thérapeutique. Il existe aussi les dérivés des eaux minérales comme : le plancton thermal, les boues thermales, les gaz thermaux, utilisés pour diverses pathologies, maladie cardio-artérielles, voies respiratoires et cutanées, rhumatismes (Auzias et al., 2012). La cure thermale est donc un traitement médical naturel. Elle apporte les soins par l'eau de source thermale, son action peut également être préventive. Complémentaire à la médecine traditionnelle, la cure thermale agit sur l'organisme par la cure de boisson-eau froide ou chaude et par les bains, douches, vaporisation, gargarisme, inhalation, massages (Auzias et Labourdette., 2011).

I.9.7. Sources Thermales en Algérie

Il existe sur le territoire algérien plus de 200 sources thermales d'après les études réalisées à ce sujet (figure 4), ce nombre croit régulièrement quand on se déplace vers l'Est. Les températures mesurées à l'émergence varient de 19 °C à Ben Haroune (Mila) à 98 °C à Hammam Meskhoutine à (Guelma) (Ouali, 2008).

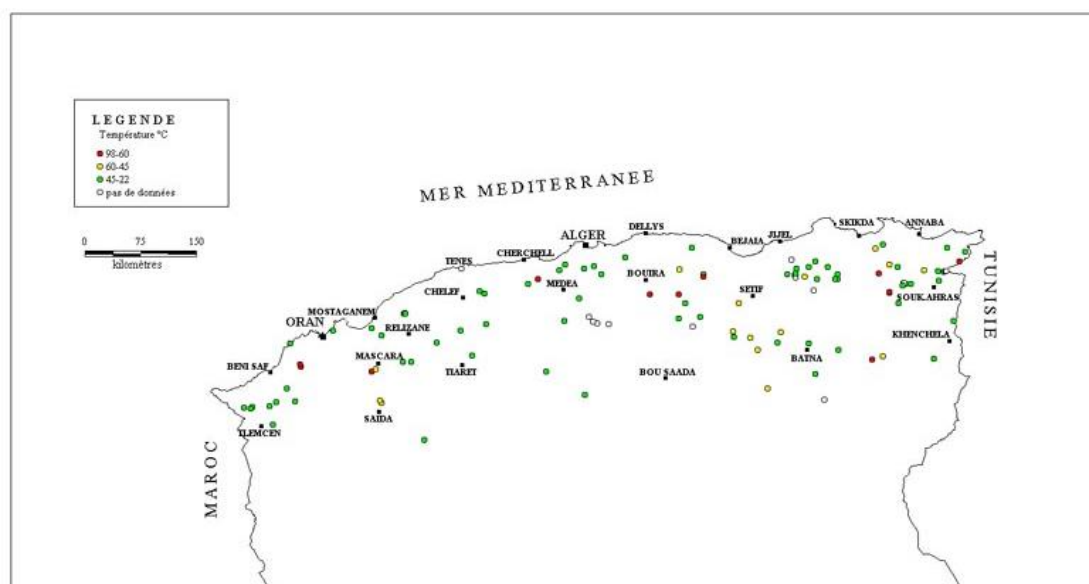


Figure 4 : Température des principales sources thermales en Algérie (Atlas géographique).

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 (Blida) 29,42 g/l, Hammam El Biban (Bordj Bou Arreridj) 15 g/l, Hammam Salhine (Biskra) 9 g/l (Ouali, 2008).

I.9.8. Stations thermales médicalisées en Algérie

Parmi les nombreuses stations thermales en Algérie, huit seulement sont médicalisées, il s'agit des stations thermales : Hammam Bouhanifia (Mascara), Hammam Salhine (Biskra), Hammam Bouhadjar (Ain T'émouchent), Hammam Boughrara (Tlemcen), Hammam Rabbi (Saida), Hammam Righa (Ain Defla), Hammam Guergour (Setif), et Hammam Meskoutine (Guelma). Ces stations thermales sont gérées par la Société Algérienne de thermalisme et sont conventionnées avec les différentes caisses de sécurité sociale (C.N.A.S, C.A.S.N.O.S, caisse militaire) (Ouali, 2008).

Conclusion

L'eau souterraine est l'origine de la plupart des eaux : l'eau de source, l'eau minérale et l'eau de hammam ou les eaux thermales qui diffèrent les une aux autres selon les paramètres physico-chimiques et microbiologiques, et pour leur utilité. Les eaux chaudes sont utilisées pour le soin, l'usage médical et thérapeutique. L'importance des eaux minérales et des eaux de source réside dans le fait qu'elles sont considérées comme des eaux riches en éléments minéraux bénéfiques pour la santé de l'homme et la guérison de plusieurs maladies.

Chapitre II : La géothermie

Introduction

La prise de conscience de l'effet de la consommation d'énergie sur notre planète a renforcé depuis la dernière décennie le souci de protection de l'environnement. La production d'énergie utile étant l'un des facteurs contribuant à la pollution de l'atmosphère de par les émissions qu'elle occasionne. L'utilisation rationnelle des ressources naturelles, sources d'énergie primaire, constitue l'une des mesures prises à travers le monde. La recherche des solutions reste très active par l'utilisation d'autres sources d'énergie inépuisable et gratuite (Malgoire et Héteu, 2004).

Donc, peut-on considérer la géothermie comme une forme d'énergie inépuisable pour notre futur et une solution pour notre planète ?

II.1. Principales sources d'énergies de la planète Terre

La nature met à la disposition de l'homme deux grandes catégories de sources d'énergie : les énergies non renouvelables et celles renouvelables (Gicquel et Gicquel, 2013).

Les énergies non renouvelables sont principalement, les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) qui sont des formes d'énergies chimiques provenant de la biomasse, stockées des millénaires passés, ainsi que la fission nucléaire dérivée de l'uranium. Comme leur nom l'indique, les réserves correspondant à ces sources d'énergie sont limitées et ne se renouvellent pas du moins pas dans les périodes de temps à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables ont quant à elles, été les premières employées par l'homme et continuent de l'être largement dans les sociétés traditionnelles, telles que : la géothermie, l'énergie solaire, l'énergie éolienne l'énergie hydraulique, l'énergie marémotrice, ou encore l'énergie des animaux de trait. Se présentant sous forme de flux et non de stock (Gicquel et Gicquel, 2013).

Chaque jour, notre planète absorbe de l'énergie solaire qu'elle stocke sous forme de calories dans le sol qui reçoit également celles provenant du sous-sol profond. Cette chaleur emmagasinée dans le sol peut être captée et transformée pour chauffer des pavillons individuels, des maisons, ou pour des installations industrielles. C'est une ressource inépuisable et gratuite, convertie en électricité ou en chaleur grâce à une technologie désormais mise au point : la pompe à chaleur géothermique (Boulicot et al., 2006).

II.2. L'énergie géothermique

Le soleil est toujours à l'origine des sources d'énergie renouvelables. Leur durée de vie est donc limitée par la durée de vie du soleil. La géothermie est considérée comme énergie

renouvelable. Toutefois, sa quantité à disposition est gigantesque, et une utilisation raisonnable ne changerait pratiquement pas la vitesse de refroidissement de la terre.

Le principe consiste simplement à utiliser la chaleur interne de la terre à des fins énergétiques. Cette chaleur qui inclut la chaleur fossile datant de la création de la terre et celle générée par la désintégration d'éléments radioactifs naturels, s'échappe par sa surface. En certains endroits de la planète, cette chaleur est concentrée dans des manifestations hydrothermales telles que sources thermales, geysers, etc. La chaleur extraite, généralement sous forme d'eau chaude ou de vapeur est, soit exploitée directement pour le chauffage, soit transformée en électricité au moyen d'une turbine à vapeur couplée à un générateur (Enckell et al., 1997).

II.2.1. Définition de la géothermie

La géothermie, des mots grecs géo désignant la terre et, thermie désignant la chaleur, est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur (Auzias et al., 2012).

La géothermie est l'exploitation des stocks considérables de chaleur et d'électricité, mais dont l'extraction de chaleur ne peut se faire qu'à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée d'eau, qui sert de fluide caloporteur. La géothermie ne peut en fait être qu'un modeste appoint à l'approvisionnement énergétique, pouvant être substantiel dans les pays où existent des zones volcaniques actives (Nifenecker, 2012).

II.2.2. La pompe à chaleur

C'est une installation qui transfère de la chaleur du milieu naturel de l'environnement comme l'air, l'eau, ou le sol. Les pompes à chaleur thermodynamique, qui fournissent de l'eau chaude à partir d'un ballon d'accumulation commencent à se diffuser pour l'équipement des maisons individuelles, vers des bâtiments ou des applications industrielles en renversant le flux naturel de chaleur de façon qu'il aille d'une température plus basse vers une température plus élevée (Gwenaëlle, 2011).

Un dispositif de pompe à chaleur géothermique est composé de trois éléments principaux : un échangeur de chaleur dans le sol, la pompe proprement dite et un réseau de circulation d'air ou d'eau (Figure 5) (O.E.C.D., 2007).

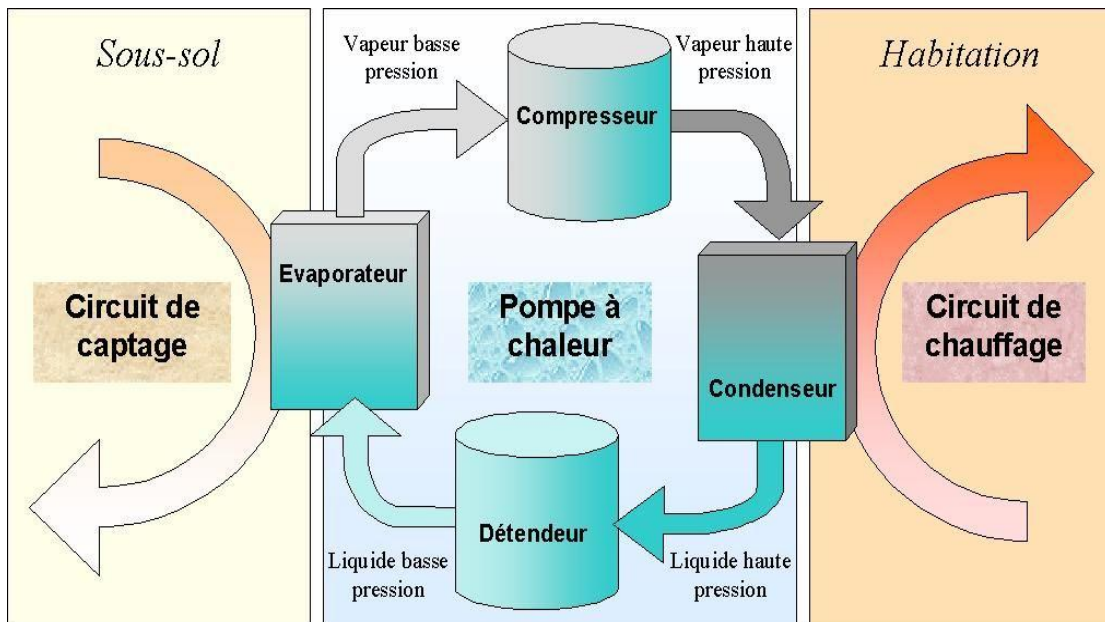


Figure 5 : Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur (O.E.C.D., 2007).

II.3. Sources de chaleur dans le globe terrestre, flux et gradient géothermique

Le globe terrestre contient des sources de chaleur qui proviennent à 80 % environ de la désintégration d'isotopes radioactifs à extrêmement longue durée de vie. Uranium²³⁵ et ²³⁸, thorium²³² et potassium⁴⁰ dont la concentration est la plus grande dans la croûte terrestre. D'autres sources notables sont la chaleur restante de la celle produite par la formation de la terre, celle due à la solidification progressive de la partie liquide du noyau et celle due aux frictions à l'intérieur du globe terrestre (Nifenecker, 2012).

Le flux du rayonnement solaire frappant la surface terrestre est d'environ 170 W/m^2 , soit un peu plus de 2000 fois le flux géothermique moyen. Ce dernier n'a, aux profondeurs inférieures à 20 mètres, pratiquement aucune influence sur la température du sol, laquelle est déterminée par l'ensoleillement local. Par contre, aux profondeurs plus grandes, on observe que la température du sous-sol croît avec la profondeur. C'est ce qu'on appelle le gradient géothermique. Ce gradient varie aussi beaucoup à plus petite échelle, car il dépend de :

- La conductivité thermique des roches traversées : le gradient est plus faible dans une roche à forte conductivité thermique comme le sel, plus fort dans une roche à faible conductivité thermique comme l'argile ;
- L'existence de sources locales de chaleur (magma chauds venus des profondeurs dans les régions volcaniques actives, ou dans les fossés d'effondrement comme en France le fossé rhénan ou la Limagne, roche anormalement riches en isotopes radioactifs...) ;

- Circulations d'eau dans des roches poreuses et perméables (aquifères) ou dans des failles, qui soustraient ou ajoutent localement de la chaleur par convection. Il atteint par exemple 1000 °C par kilomètre en Italie à Larderello, situé sur le flanc d'une intrusion magmatique où est produit l'essentiel de l'électricité géothermique de l'Europe (Nifenecker, 2012).

II.3.1. Utilité de la géothermie

Quand on descend vers le centre de la terre, la température s'élève, au rythme moyen de 3 °C pour 100 m, et même bien plus dans les régions volcaniques. Au-delà de 150 °C, on obtient de la vapeur d'eau sous pression dont la détente permet de produire de l'électricité. Cette ressource, sous le nom de "géothermie à haute énergie", est utilisée à grande échelle dans les pays comme les Etats-Unis ou l'Indonésie. La géothermie à haute énergie couvre 0,4 % de la production mondiale d'électricité. C'est peu, mais c'est intéressant localement car le coût de production est particulièrement bas (Mathis, 2014).

II.4. Types de géothermie

Selon la température et la profondeur, on distingue les types de géothermie suivants :

II.4.1. Géothermie peu profonde à basse température

Ce terme désigne en principe l'extraction de la chaleur contenue dans la croûte terrestre afin de l'utiliser pour les besoins de chauffage. Les transferts thermiques peuvent aussi dans certains cas être inversés pour les besoins d'une climatisation. On l'utilise pour chauffer le sol d'une maison à basse température, pour les radiateurs et par le sol mais par échauffement d'eau. Comme véhicule thermique, on utilise de l'eau ou de l'eau avec un glycol ou encore directement le fluide frigorigène (Auzias et al., 2012).

La géothermie peu profonde et basse température utilise de plus en plus la chaleur de la terre dans le sol. En dessous de 4,5 m, la température du sol est constante tout au long de l'année avec une température moyenne de 12 °C. La profondeur du forage est en fonction du type de géothermie : en détente directe, en utilisant un fluide frigorigène dans les sondes géothermiques, elle sera en moyenne de 30 m et pour les sondes à eau glycolée, entre 80 et 120 m selon les installations. Plusieurs schémas d'installation existent : Le forage unique, le forage en doublet, le forage en doublet non réversible et le forage en doublet réversible (Auzias et al., 2012).

II.4.2. Géothermie profonde à haute température

Dans ce cas, les forages sont plus profonds. Leur profondeur est fonction de la température désirée et du gradient thermique local qui peut varier sensiblement d'un site à d'autre. La méthode utilisée pour les transferts thermiques est plus simple (échangeur de la température à contre courant) et ne nécessite pas de fluide caloporteur comme pour la géothermie peu profonde basse température (Auzias et al., 2012).

II.4.3. Géothermie très profonde à très haute température

Comme abordé plus haut, plus on creuse profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température atteint 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région du globe considérée. Il peut varier de 3 °C /100 m dans les régions sédimentaires jusqu'à 1000 °C/100 m dans les régions volcaniques ou encore dans les zones de rift comme Island ou en Nouvelle-Zélande (Auzias et al., 2012).

Il existe cependant trois types de géothermie :

II.4.3.1. Géothermie haute énergie

La géothermie haute énergie ou profonde ou haute enthalpie, est une source d'énergie contenue dans les réservoirs localisés généralement à plus de 1500 m de profondeur et dont la température est supérieure à 150°C (Tableau 6). Grâce aux températures élevées, il est possible de produire l'électricité et de faire de la cogénération : production conjointe d'électricité grâce à des turbines à vapeur et de chaleur avec la récupération des condensats de la vapeur.

La géothermie haute température connaît actuellement un renouveau important, notamment parce que la protection contre la corrosion et les techniques de forage se sont fortement améliorées (Auzias et al., 2012).

II.4.3.2. Géothermie basse énergie

On parle de "géothermie basse énergie" lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30 °C et 100 °C dans des gisements situés entre 1500 et 2500 m de profondeur (Tableau 6). La production de chaleur au moyen d'une pompe à chaleur sur nappe, repose sur le prélèvement et le transfert de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer. Par ailleurs, une pompe à chaleur peut assurer simultanément et/ou successivement des besoins en chauffage et/ou climatisation/rafraîchissement. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines

applications industrielles. Les installations de pompe à chaleur sur nappe continuent à se développer en Europe (Auzias et al., 2012).

II.4.3.3. Géothermie très basse énergie

C'est une géothermie avec des niveaux de températures comprises entre 10 °C et 30 °C (Tableau 6). Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant le rôle de source chaude du fait de son inertie et de sa mauvaise conductivité thermique. Cette technologie est utile pour la climatisation passive avec un système de puits (Auzias et al., 2012).

Tableau 6 : Différents types de géothermie (Gilli et al., 2008-2012).

| Type | Température (°C) | Environnement géologique | Profondeur (m) | Usage |
|---------------------|------------------|--|----------------|--------------------------|
| Très basse énergie | Inférieur à 30 | Aquifères superficiels | / | Pompe à chaleur |
| Basse énergie | 30-100 | Aquifères | 500-2500 | Chauffage et thermalisme |
| Moyenne énergie | 90-150 | Aquifères profonds Anomalies thermiques | 2000-3000 | Chauffage et électricité |
| Haute énergie | Supérieur à 150 | Aquifères des édifices volcaniques | / | Electricité |
| Géothermie profonde | Supérieur à 150 | Roches sèches profondes | 3000-5000 | Electricité |

II.5. Principe de fonctionnement d'une installation géothermique

Le principe de fonctionnement est basé sur le captage de l'énergie thermique contenue dans le sol ; plus efficace que les radiateurs, le chauffage par le sol est également plus confortable (Figure 6) (Guérit, 2007). La géothermie est la seule énergie réellement renouvelable qui permet de produire chaleur et/ou électricité. Le principe de fonctionnement est le suivant :

Des pompes aspirent à un point et à une profondeur, la température de ces eaux peut être comprise entre 30 °C et 250 °C. Cette eau, une fois en surface, circule dans un réseau adapté, diffuse la différence de température, puis est injectée dans le bassin en fonction du sens d'écoulement des eaux souterraines. On distingue trois usages de la géothermie en fonction de la température et de la profondeur de l'eau puisée : très basses (<30°C et <100 m) pour le chauffage ou la climatisation, basses et moyennes (entre 30 °C et 100 °C ; entre 1000 et 4000 m) comme réseau de chaleur pour le chauffage urbain, ou industrielle, hautes (>250 °C, entre

1500 m et 3000 m) pour la production électrique via des turbines. La géothermie à très basses température peut être mise en place partout dans le monde (Druon, 2012).

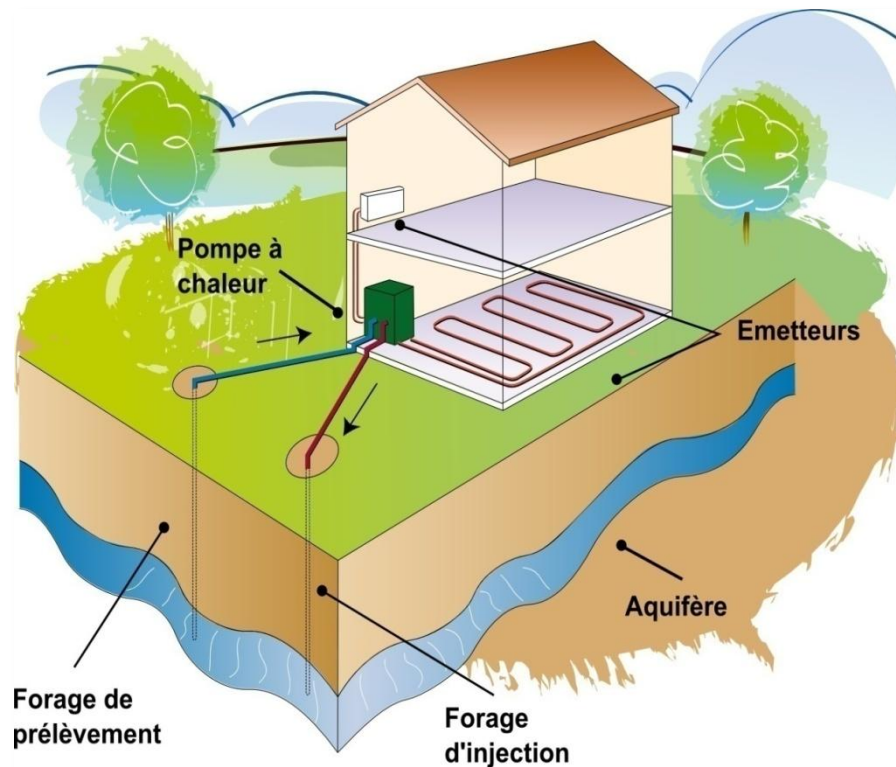


Figure 6 : Technique d'exploitation d'une source géothermique (Druon, 2012).

II.6. Avantages et inconvénients des installations de géothermie

II.6.1. Avantages

Si on respecte la règle de ne pas épuiser la source, l'apport d'énergie est continu et non polluant. De nombreux auteurs comme Luyckx (2004), affirment que la technologie est bien maîtrisée et que sa production n'implique aucune réaction chimique et ne s'attaque pas au paysage alentour, et la surface au sol nécessaire à sa production est plus petite par mégawatt que celle requise par presque tous les autres types de centrales.

Les installations géothermiques n'imposent pas de barrer les fleuves ou de raser des forêts. Il n'y a ni puits de mine, ni galeries, ni tas de gravats, ni déversement toxiques, car ses unités peuvent cohabiter sur les mêmes terrains avec le bétail et la faune sauvage. Elle a une excellente fiabilité, d'une production continue et constante 24h /24h, toute l'année (Gautier et Fellous, 2008).

II.6.2. Inconvénients

Très peu d'inconvénients sont notés, à savoir :

- La nécessité de forer des puits profonds pour atteindre des températures intéressantes ;
- La technique est liée au cycle saisonnier mais, elle présente suffisamment d'inertie pour compenser le cycle jour/nuit (Luyckx, 2004).

II.7. Situation actuelle

L'exploitation des ressources géothermiques, bien que globalement limitée par rapport à celle d'autres ressources, est aujourd'hui assez largement ré pondue dans le monde; outre pays cités l'Allemagne, l'Autriche, la Hongrie, la Roumanie, et la Russie par exemple exploitent également la géothermie (Figure 7) (Gilli et al., 2012).

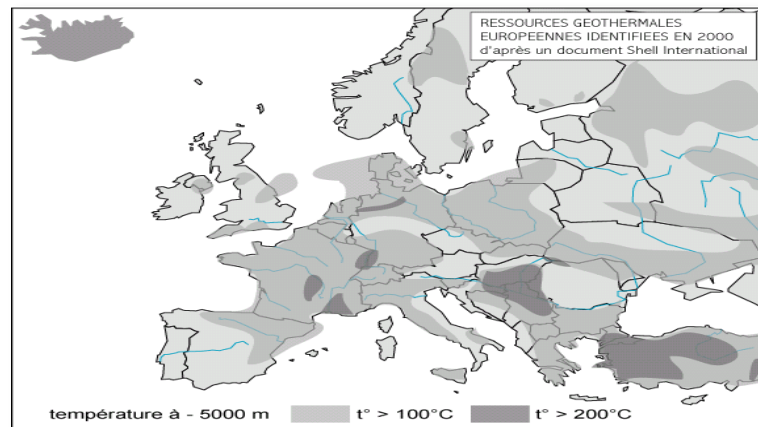


Figure 7 : Ressources géothermales européennes identifiées (d'après Shell International) In (Gilli et al., 2012).

II.8. Géothermie en Algérie

En Algérie, les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien. Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées et reparties à travers tout le Nord algérien, majoritaires au Nord-est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Maskhoutaine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara. 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 la région de l'Oranie, de la Kabylie et du Constantinois. En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien, septentrional, une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du continental intercalaire (Ouali et al., 2006).

II.8.1. Données sur la géothermie en Algérie

Les forages pétroliers étant les plus profonds, ils rendent le mieux compte du gradient géothermique. De nombreux forages pétroliers couvrent le Sahara algérien d'Est en Ouest, comme le montre la carte de gradient (Figure 8). La majorité de ces forages sont localisés principalement dans la partie septentrionale du Sahara algérien, car cette région saharienne est par contre l'une des plus intéressantes du point de vue ressources fossiles (pétrole, gaz). Les valeurs de BHT (Bottom Hol Temperature), représentant les températures de boue du fond de puits, nous ont permis de calculer le gradient géothermique. Dans le cas général, les valeurs de BHT ne reflètent pas avec exactitude la température de la formation traversée, et elles sont par conséquent corrigées. Parmi ces méthodes de correction, il existe la méthode qui utilise les valeurs de DST comme référence. Cependant cette correction est négligée par certains auteurs. Dans cette étude, la correction des BHT n'a pas été utilisée en raison de l'absence des valeurs de DST pour un grand nombre de forages (Ouali et al., 2006).

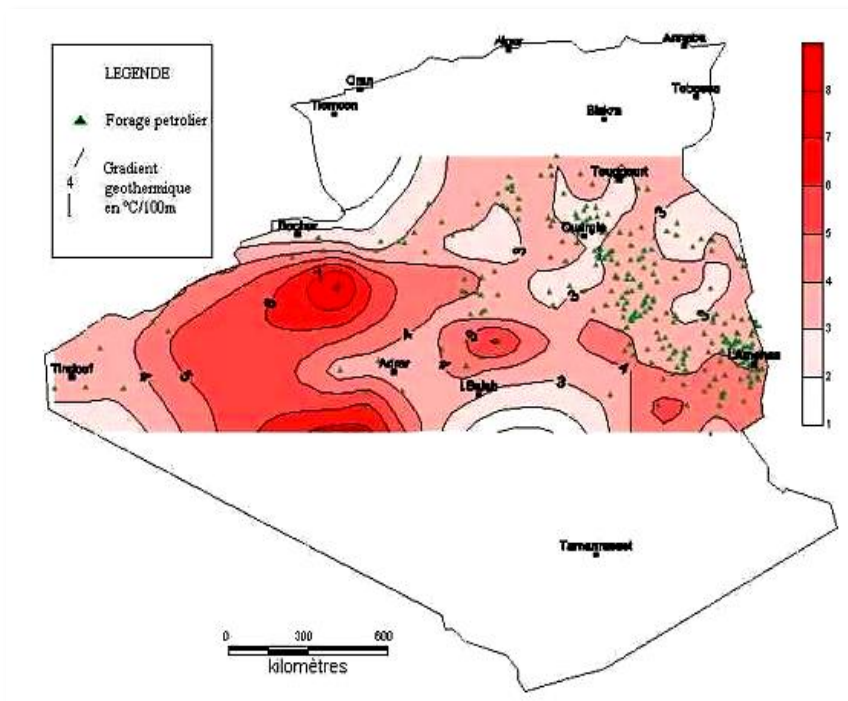


Figure 8 : Carte de gradient géothermique du Sud algérien (Ouali et al., 2006).

Conclusion

Au début de ce chapitre, nous avons défini le concept de Géothermie puis démontré les différents types jusqu'aux utilisations comme le chauffage urbain, en passant par les moyens de captage. Puis dans une dernière partie nous avons montré les inconvénients et avantages de

cette énergie "verte" ainsi que sa situation actuelle dans le monde. Donc, peut-on considérer la géothermie comme une énergie inépuisable pour le futur et une solution pour la planète ?

Notre réponse serait oui car, étant donné le volume de la Terre, les roches en fusion du manteau et le noyau contiennent suffisamment d'énergie pour les hommes pendant des millénaires. Ensuite, le fonctionnement de la géothermie permet d'utiliser des éléments non nocifs comme l'eau, et de limiter très fortement les rejets jusqu'à les rendre presque nuls.

La géothermie serait la meilleure solution et la meilleure réponse au défaut des énergies actuellement répandues surtout dans notre pays avec cette diminution des prix du pétrole. La géothermie n'est pas localisée comme les mines et est illimitée. Cependant on manque d'information, de volonté et de moyens chez les autorités qui limitent la progression de l'extension de ce système à travers le monde entier. Les puits sont encore rares, mais les personnalités impliquées dans ce projet ne désespèrent pas de sensibiliser la population mondiale aux avantages de cette énergie par rapport à l'environnement.

Chapitre III : La zone d'étude
Khenchela

Introduction

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

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

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

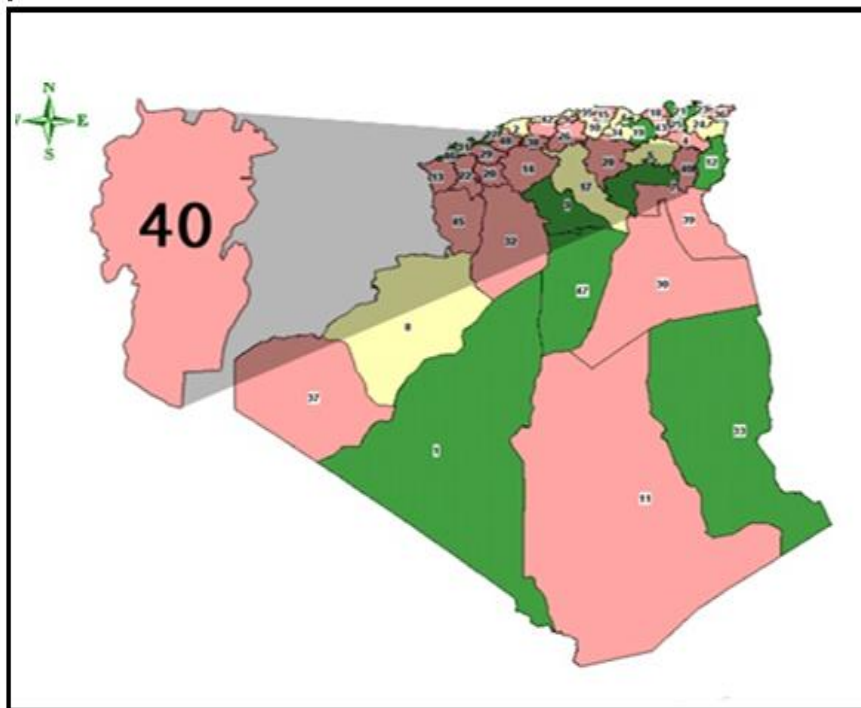


Figure 9 : Localisation géographique de la Wilaya de Khenchela sur la carte de l'Algérie (D.S.P., 2015).

III. Présentation générale

III.1. Description générale et localisation de la wilaya de Khenchela

La wilaya de Khenchela est située à l'Est du pays, au contrefort des monts des Aurès, dans l'aire géographique comprise entre $6^{\circ} 32'$ et $7^{\circ} 34'$ de longitude Est et entre $35^{\circ} 7'$ et $35^{\circ} 38'$ de

latitude Nord son étendue territoriale couvre une superficie totale de 9715Km². Elle est limitée (figure 10) :

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

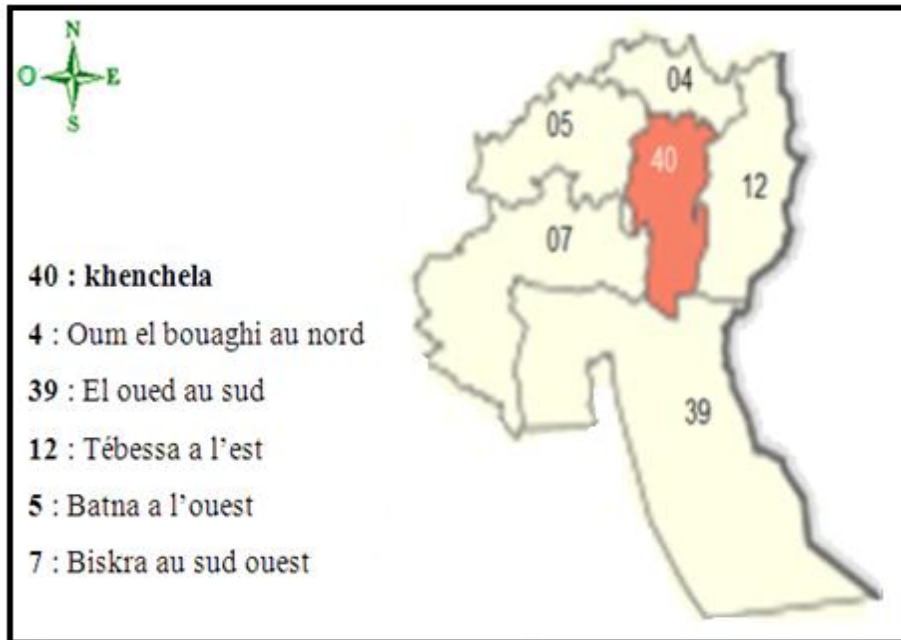


Figure 10 : Situation de la wilaya de Khenchela (D.P.A.T., 2016).

III.2. Caractères géomorphologiques, géologiques et pédologiques

III.2.1. Caractères géomorphologiques

III.2.1.1. Relief

La structure physique de la Wilaya de Khenchela est très hétérogène (figure 11). Elle se caractérise par trois régions naturelles distinctes :

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

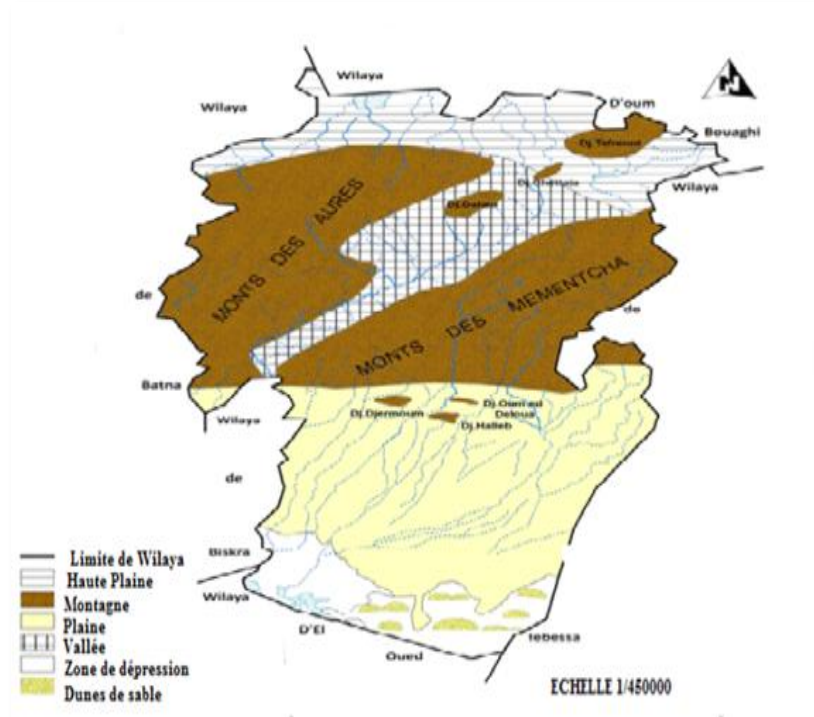


Figure 11 : Carte de relief de la wilaya de Khenchela (D.S.P., 2016).

III.2.1.1.1. Altitude

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

III.2.1.1.2. Pente

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

- **Classe 1** : pente comprise entre 0 et 3,5% : Relativement favorable à l'intensification agricole (mécanisation et irrigation) et à la réalisation d'infrastructures techniques;
- **Classe 2** : pente comprise entre 3 et 12,5% : elle est favorable au développement d'une agriculture intensive à semi intensive;

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

III.2.2. Géologie

III.2.2.1. Litho stratigraphie

D'après l'inventaire stratigraphique dressé par plusieurs géologues et en particulier par R. Laffitte, les terrains les plus anciens sont attribués au Trias et les plus récents au Quaternaire (Figure 12).

III.2.2.1.1. Mésozoïque

a. Trias (Figure 12) : Le Trias affleure toujours en position anormale, il est formé de pointements diapiriques nombreux jalonnant les accidents tectoniques (Para-autochtone), les affleurements triasiques sont assez nombreux et très localisés à proximité de Khenchela, ou il isole le Miocène du Crétacé, suivant une bande de 4 à 5 Km de long et 300 à 400m de large et sur Djebels el Krouma et Knif en contact anormal avec l'Albien, le Cénomaniens et le Cénonien. Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux (Laffitte, 1939 et Vila, 1977 cités par Boubelli, 2009).

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

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

b. Jurassique : La lithologie des formations Jurassiques dans l'Aurès se distingue par un large développement des faciès carbonatés (Calcaire dolomie) parfois argileux (Schistes

argileux, et calcaire argileux, siliceux et béchiques). Elles renferment parfois des intercalations de marnes jaunes et rouges dont l'épaisseur peut atteindre 400 mètres. L'épaisseur totale de ces dépôts dans la région peut être évaluée à 4000 voire 6000 mètres.

- **b.1- Lias** : Peu présent dans la région, il est localement représenté par des schistes tendres contenant parfois des ammonites pyriteuses.
- **b.2- Dogger** : Le Jurassique moyen (Aalénien) est constitué par une série d'alternance; de dolomies, de calcaire et de marne avec des gypses.
- **b.3- Malm** : Il est constitué par 15 mètres d'épaisseur d'une alternance des calcaires noduleux et des marnes.

c. Crétacé : Le Crétacé a été subdivisé par R. Laffite (1939) en Crétacé inférieur ou série gréseuse (Berriasien à l'Albien) et en Crétacé supérieur ou série marnocalcaires (Cénomaniens à Maestrichtien).

- **c.1- Crétacé inférieur** : Il couvre une grande partie des Anticlinaux du Djebel Chelia, Anticlinal de Khenchela, il affleure aussi au Kef Tifekressa, Ras Serdoun, Djebel Chenntgouma, Djebel Faraoun et Djebel Aidel. Laffite (1939) a soigneusement décrit la plupart des faciès à partir de ses descriptions, modifiés ou complétés en quelques points.

Le Crétacé inférieur peut être subdivisé en quatre ensembles lithologiques : Un ensemble inférieur 1000 m à dominance argileuse correspondant au Berriasien supérieur-Valanginien. On note que le Valanginien n'est seulement connu qu'au Djebel Azreg à Batna, presque au centre du massif montagneux. Un ensemble basal 1300 m à dominance carbonate avec des calcaires micritiques et bioclastiques en bancs métriques (Tithonien supérieur-Berriasien moyen). Un ensemble médian 1400 m à dominante grés-dolimitique appartenant à l'Hautrivien-Barrémien. Un ensemble supérieur 700 à 750 m, comprenant à la base des dolomies et une alternance de grés, de calcaire à Orbitolines, puis des grés à stratifications obliques, des marnes gréseuses, des calcaires marneux et des calcaires au sommet, est attribué à l'Aptien-albien.

- **c.2- Crétacé supérieur** : Il occupe une grande superficie à l'affleurement dans l'Aurès et forme l'essentiel des affleurements Mésozoïques des confins de l'Aurès. Dans notre région d'étude il affleure au Djebel Aurès, Djebel Djahfa, El Krouma, Khenchela, El Khallel, Djebel Chettaia etc.

- **c.2.1- Cénomaniens** : Il est présent dans tous les grands anticlinaux de l'Aurès. Il est essentiellement calcaire-marneux. La partie inférieure est surtout marneuse. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massifs mais peu épais. L'épaisseur de cette formation est très variable, elle peut atteindre 500 à 600 mètres au cœur de l'Aurès. Le Cénomaniens comporte une série de marnes grises dans lesquelles s'intercalent des calcaires fins argileux, une partie médiane formée de marnes grises, verts ou ocres, contenant parfois du gypse diffus ainsi que des passées argileuses. Une série terminale constituée de marne et de calcaires formant une corniche.
- **c.2.2- Turonien** : Le Turonien occupe à l'affleurement les plus grandes surfaces de l'Aurès (pendage faible). Le Turonien comporte, en effet, au dessus des marno-calcaires de base, un ensemble de marnes beiges et calcaires. Dans le Djebel de Amrane, le Turonien est schisteux à la base, calcaire dans la partie moyenne, et marno-calcaire au sommet. L'épaisseur du Turonien peut atteindre 800 mètres dans les faciès marno-calcaires du cœur de l'Aurès, mais varie de 1000 à 3000 mètres dans les calcaires.
- **c.2.3- Sénonien** : Le Sénonien est représenté dans tous les synclinaux de l'Aurès. Il est très épais 2000 mètres en moyenne. Dans notre région il affleure au Sud de la plaine de Remila, sur le flanc Nord de l'Anticlinal du Djebel Chelia avec un faciès principalement marneux. Son épaisseur peut être très importante et atteindre 1000 à 2000 mètres.
- **c.2.4- Coniacien** : Il présente un horizon de marne et de marno-calcaires. Le Coniacien est présent au niveau de Ras Tafer Kennfad et à l'entour du Djebel el Kharroub.
- **c.2.5- Santonien** :
 - **c.2.5.1- Le Santonien C4** : Est constitué de faciès marneux, de marne gris-bleu et calcaire, il affleure à l'entour du Djebel el Kharroub et Djebel Aourès.
 - **c.2.5.2- Le Santonien C4r** : Faciès récifal des Djebels El Krouma et Knif.
- **c.2.6- Campanien**: Constitué de marne et calcaires crayeux, et affleuré au Djebel Chettaia, Djebel Aourès, à Douar Ouled Ensirha et à l'entour des Djebels Chettaia et El Krouma.
- **c.2.7- Maestrichtien** : Le Maestrichtien est assez différent; il est subdivisé en :
 - Maestrichtien inférieur à dominante marneuse.
 - Maestrichtien supérieur constitué par des calcaires à Inocérames. Il affleure à Ettarf, Djebel Chettaia et Argoub Mennsa. On se rapproche de la zone des hautes plaines constantinoises où

le Maestrichtien semble ne pas exister, ce qui indique que, s'il est déposé dans cette région, ce fut sous faible épaisseur et qu'il a ainsi été facilement enlevé par l'érosion.

III.2.2.1.2. Cénozoïque

a- Paléogène :

- **a.1- Paléocène** : Le paléogène marin, au Danien marin succède en concordance, des couches marines, marno-calcaires, dans lesquelles, latéralement, en certains points, s'intercalent des couches lacustres et des couches rouges d'origine lagunaire ou plutôt continentale, mais il s'agit là de conditions exceptionnelles de l'Eocène inférieur (Yprésien) et l'Eocène moyen (Lutétien) sont essentiellement marin.

- **a.2- Eocène inférieur (Yprésien)** : C'est dans le Sud-est de l'Aurès, que le Nummulitique est le plus développé; et peut être le seul affleurement existant dans le terrain est celui de A. Eguelmamène constitué par des calcaires à silex. Au début de l'Eocène, et pendant la période Paléocène, c'est-à-dire pendant le Montien et le Thanétien, la mer semble avoir recouvert l'Aurès d'une manière assez uniforme. Dans le Sud-est, on trouve, dès la base de la formation, une faune caractérisée par l'abondance des Turritelles.

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

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

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

b.1- Miocène : En 1862, Coquand signale pour la première fois dans les environs de Khenchela un gisement de Burdigalien à Pectens et l'âge exact des couches rouges du Sud de l'Aurès. Le Miocène dans la région d'étude peut subdiviser de la manière suivante :

- **b.1.1- Aquitano-burdigalien:** Marqué par des conglomérats rouges. Il affleure à El Kelaa, Ras Khodalène et à l'entour de Ras Serdoun.
- **b.1.2- Langhien-serravalien:** Constitué par des marnes, biomicrites, biomicrosparite et grés blancs. Il est remarqué au niveau d'El Kelaa Djebel Knif et Ras Ychebrane.
- **b.1.3- Tortorien:** Gréseux blanc, qui affleure à Tirkabine, Djebel Kharroub, Djebel Akar, El Mennchar et Douar Khenchela.
- **b.1.4- Tortorien supérieur:** Continentale, ce sont des argiles silteuses beiges et rouges, grés. Le Tortorien supérieur n'apparaît qu'au niveau Draa El Ahmar.

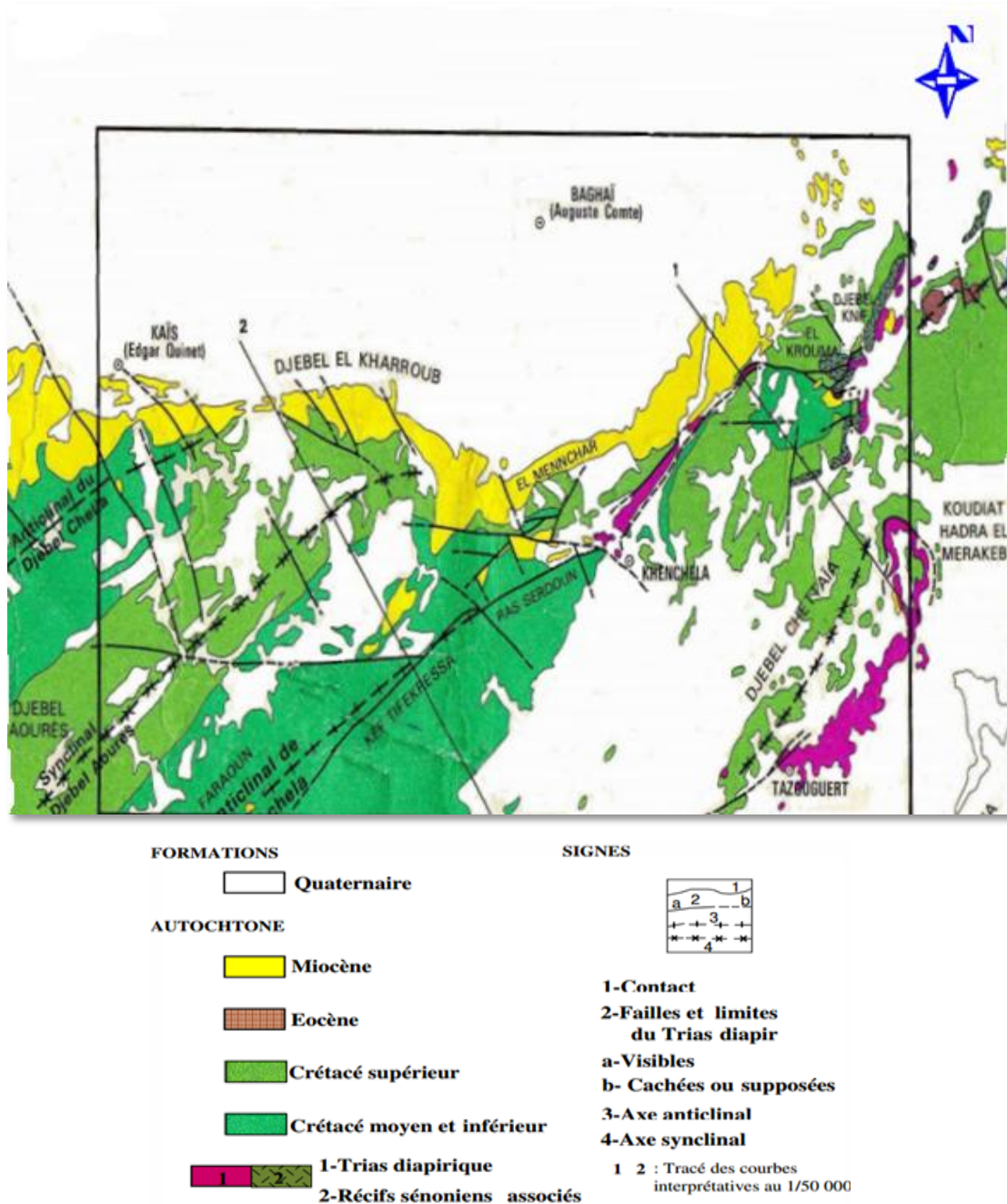


Figure 12 : Schéma structural simplifiée de la géologie de la wilaya de Khenchela (VILA Cité par Boubelli, 2009).

c. Le Quaternaire : Les formations récentes sont aussi largement réparties à la périphérie de l'Aurès qu'elles sont rares dans le centre du massif, représentées uniquement par des éboulis et des terrasses, tandis qu'elles forment en périphérie de larges et d'épaisses nappes alluviales. Les dépôts quaternaires recouvrent la majeure partie des plaines, ce sont des éboulis à blocs, alluvions récentes ou actuelles, terres arables, alluvions anciennes, glaciaires polygéniques nappant les reliefs et des croûtes calcaires (Figure 12) (Laffitte, 1939 cité par Boubelli, 2009).

III.2.3. Caractères pédologiques

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

- **Les sols calcaires humifères** : Ils sont rencontrés sur les monts et les piémonts de l'Aurès, à une altitude comprise entre 1 000 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 Fais 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 (Figure 13) (C.F., 2016).

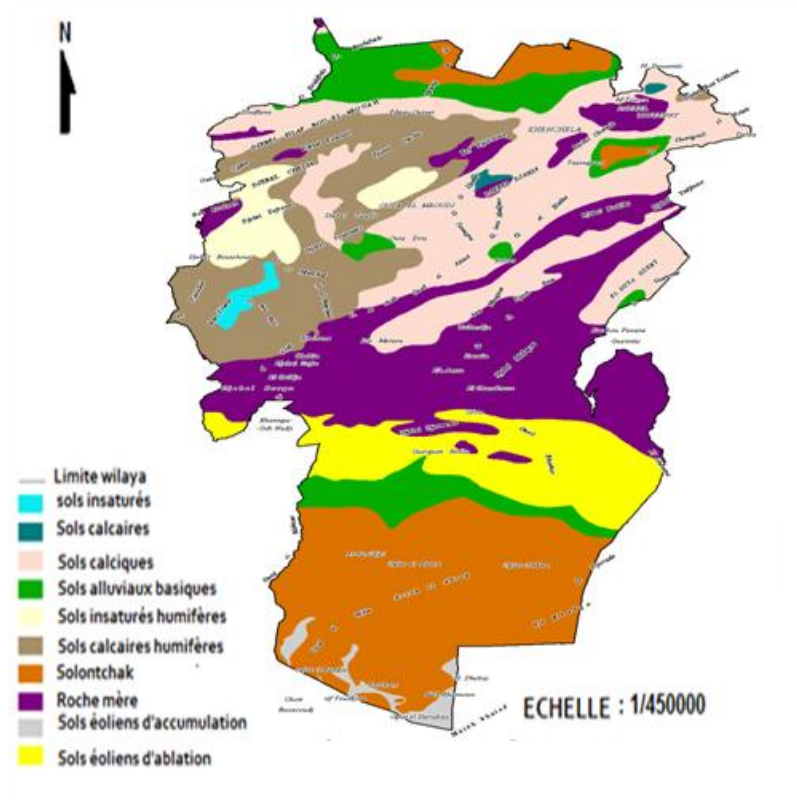


Figure 13 : Carte des classes des sols de la wilaya de Khenchela (D.E., 2016).

III.3. Caractères hydrographiques

La wilaya de Khenchela s'inscrit dans les limites géographiques de trois bassins versants (Figure 14) :

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

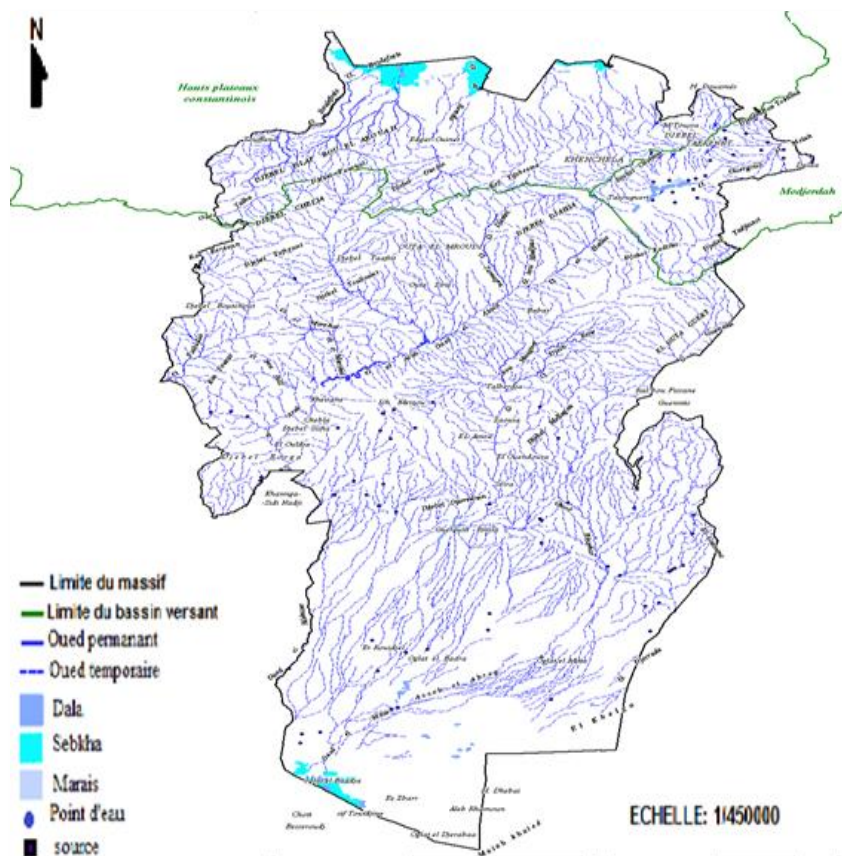


Figure 14 : Carte hydrologique de la wilaya de Khenchela (D.E., 2016).

II. Partie pratique

Chapitre IV : Etude climatologique

Introduction

Le climat joue un rôle prépondérant dans le développement, la répartition et l'individualisation des êtres vivants. Le climat en Algérie est caractérisé par la grande variabilité des précipitations et de la température liées à l'irrégularité topographique et aux influences opposées de la méditerranée et du Sahara.

Les facteurs climatiques dans leur ensemble permettent d'expliquer quantitativement l'intensité et la variabilité des composantes du régime hydrologique, dans le temps et dans l'espace, en interaction avec les conditions physico-géographiques de l'écoulement. C'est ainsi que l'emploi des outils statistiques s'impose afin de pouvoir interpréter les phénomènes hydrologiques enregistrés dans le passé, leur fonctionnement actuel et prévoir leur évolution dans le futur. L'évaluation des différents paramètres climatologiques a été effectuée en fonction de la disponibilité des informations au niveau des sites d'observations climatologiques. L'étude des données climatiques permet d'analyser les facteurs du climat de cette zone qui nous renseignera sur :

- Le type du climat ;
- Le comportement hydro-climatologique ;
- Le bilan hydrologique, calculé par des formules (ETP, ETR, R, D).

IV .1 . Définitions

IV.1.1. Climat et climatologie

Pris de son sens large, le mot climat recouvre deux notions différentes : Celle de climat moyen et celle de variabilité climatique. Le climat moyen correspond à l'ensemble des conditions qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu ou une région donnée. La variabilité du climat est une de ses caractéristiques importantes qui correspond à la dispersion statistique de ses éléments caractéristiques autour de leur valeur moyenne. La climatologie est la discipline scientifique relative au climat. Elle a pour objet la caractérisation et la classification des différents types de climats, leur localisation géographique, l'étude des causes de leur diversification, et en lieu donné, l'analyse de leur variabilité temporelle (Guyot, 1999).

IV.2. L'information climatologique

L'information climatologique est observée ponctuellement dans l'espace géographique en des stations pourvues de capteurs variés (thermomètre, pluviomètre, anémomètre, girouettes,...). Et à intervalle plus ou moins serré dans le temps. Dès l'origine, la mise en place d'un réseau d'observation du temps (Bessemoulin et al., 2008).

IV.3. Brève description du système climatique

Le système climatique est un ensemble constitué de cinq éléments majeurs qui interagissent entre eux à différentes échelles d'espace et de temps :

- L'atmosphère ;
- L'hydrosphère (l'eau liquide à la surface et sous la surface du globe : océans, rivières, lacs, eau du sol) ;
- La cryosphère (glace de mer, glaciers, surfaces glacées) ;
- Les surfaces continentales ;
- Et la biosphère (faune et flore).

Les moteurs de la circulation atmosphérique sont la rotation terrestre, la composition physico-chimique de l'atmosphère et de l'énergie reçue du soleil (Bessemoulin et al., 2008).

IV.4. La station de mesures

Pour caractériser la nature des variations climatiques mensuelles et interannuelles dans la région d'étude, il est nécessaire de choisir la station météorologique de Khenchela (tableau 7). Nous disposons d'une série de données s'étalant sur une durée de 10 ans d'observation, de 2005 à 2015. Dans le tableau 1 on retrouve les coordonnées géographiques de la station de mesure.

Tableau 07 : Les Coordonnées géographiques de la station de mesure (O.N.M.S.K., 2016)

| Station | Type de la station | Coordonnées | | | | | Altitude (m) |
|----------|--------------------|-------------|-----|-----|-------------|------------|--------------|
| | | x | y | z | Latitude | Longitude | |
| El Hamma | Météorologique | 890 | 250 | 983 | 35° - 28° N | 07°- 05° E | 983 |

IV .5. Les facteurs climatiques

Les genres et les modes d'observation sont fixés de manière très précise notamment grâce aux directives de l'organisation météorologique mondiale. De façon générale, les observations sont faites à certaines heures de la journée et elles permettent de caractériser le temps journalier. Les paramètres mesurés partout sont :

- La température : maximum et minimum en 24 heures ;
- Les précipitations ;
- L'ensoleillement ou la nébulosité ;
- L'humidité de l'air ;
- La vitesse et la direction du vent ;
- La pression barométrique (Hufty, 2001).

IV.5.1. La température

La température est une qualité de l'atmosphère et non une grandeur physique mesurable au sens strict du terme. Les physiciens aiment à dire qu'elle se repère mais ne se mesure pas. Cela signifie que les valeurs numériques par lesquelles s'expriment les températures ne peuvent ni s'additionner, ni se soustraire, ni se multiplier ; s'il peut arriver parfois que le climatologue opère des calculs, comme il le fait par exemple quand il effectue des moyennes, ce ne sont là que des intermédiaires de calcul nécessaires à l'obtention d'un résultat ultérieur. La moyenne étant par exemple le quotient d'une somme par le nombre de ses termes, mais qui en eux mêmes ne présentent strictement aucune signification physique (Péguy, 1970).

IV.5.1.1. Variations des températures moyennes annuelles

Les histogrammes de la figure 15 représentent la variation annuelle de la température sur une période de 10 ans (2005 – 2015). On remarque donc que l'année la plus chaude est 2014 avec une moyenne de 16,4 °C, et que l'année la plus froide est 2013, avec une moyenne de 14,62°C avec une température moyenne interannuelle de l'ordre de 15,53 °C.

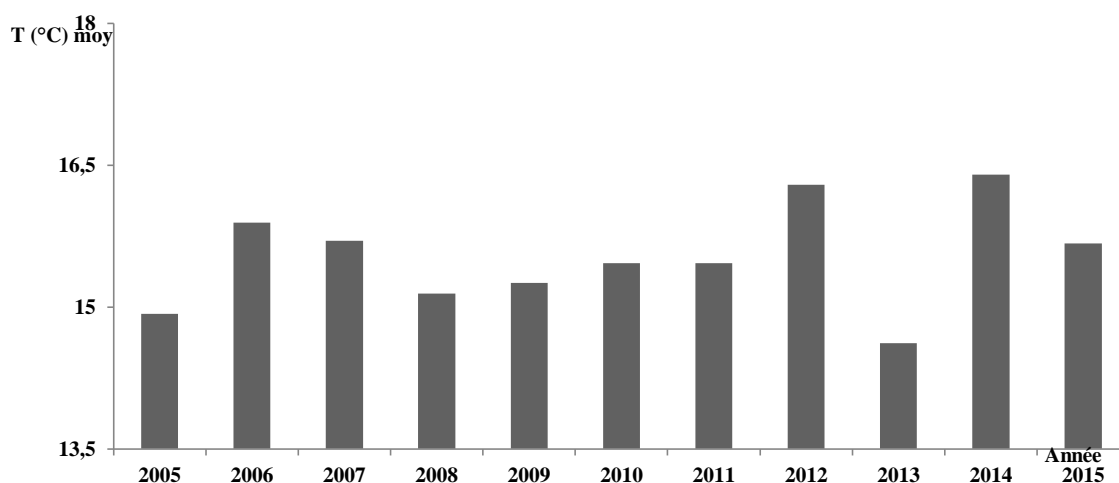


Figure 15 : Evolution de la température moyenne annuelle de la station de Khenchela pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.1.2. Variations des températures moyennes mensuelles

D'après le diagramme de la figure 16, on peut distinguer :

- Une diminution de la température à partir du mois de septembre pour atteindre sa valeur minimale au mois de janvier, c'est le mois le plus froid, avec 5,63 °C ;
- En été, surtout durant les mois de juillet et août les maximas atteignent 32,67 °C, et restent par conséquent relativement modérés ;

- Une élévation de la température où la température croit progressivement du mois de février pour arriver à une valeur maximale au mois de Juillet, c'est le mois le plus chaud, avec 26,99 °C ;
- La moyenne annuelle inter-mensuelle est de 15,45 °C ;
- En hiver, il est enregistré des températures inférieures à 1°C, d'où la présence de risque de gel.

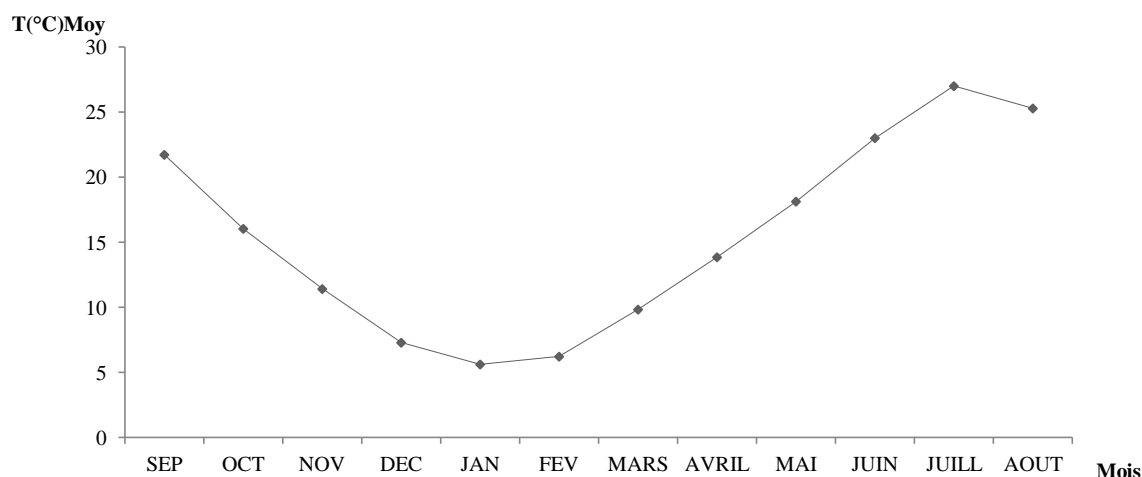


Figure 16 : Variation de la température moyenne mensuelle de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.1.3. Variations des températures minimales et maximales mensuelles

➤ Courbe des minima

Au courant des années (2005 à 2015), les minimas circulent entre 1,62 °C à 18,96 °C, avec un minimum absolu au mois de Février (1,62).

- **Courbe des maxima** On observe un minimum au mois de Février (1,62 °C) et un maximum au mois de Juillet (35 °C) (figure 17).

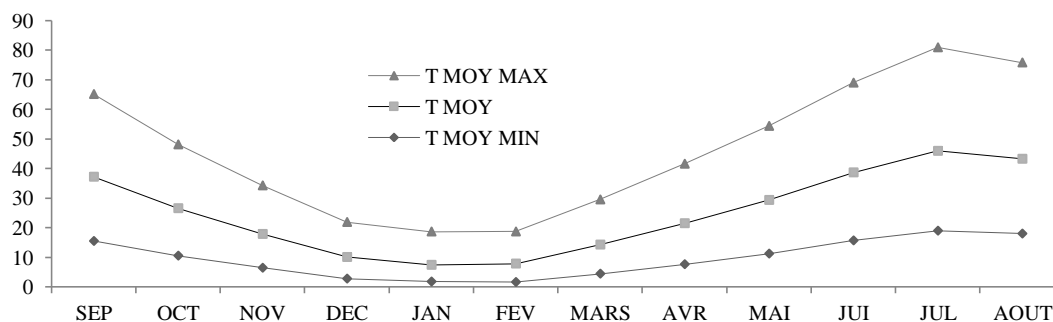


Figure 17 : La répartition des températures moyenne de la station d'El Hamma pendant la période 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.2. L'humidité

L'air humide est un mélange de vapeur d'eau et d'air sec. On utilise les expressions suivantes pour caractériser le contenu en vapeur d'eau de l'air :

Humidité relative (HR) représente le rapport de la tension actuelle de vapeur d'eau à la tension saturante (%). La valeur que cette tension attendrait si tout l'espace envisagé était occupé par la vapeur dans des conditions de saturation. Elle est exprimée en % (F.A.O, 1988). Au cours d'une journée de la période estivale la température étant élevée, alors l'humidité journalière est faible atteignant 48,13 à 62,14 %. Par contre durant la période hivernale l'humidité est élevée avec une valeur de 70,96 à 69,02 % (figure 18).

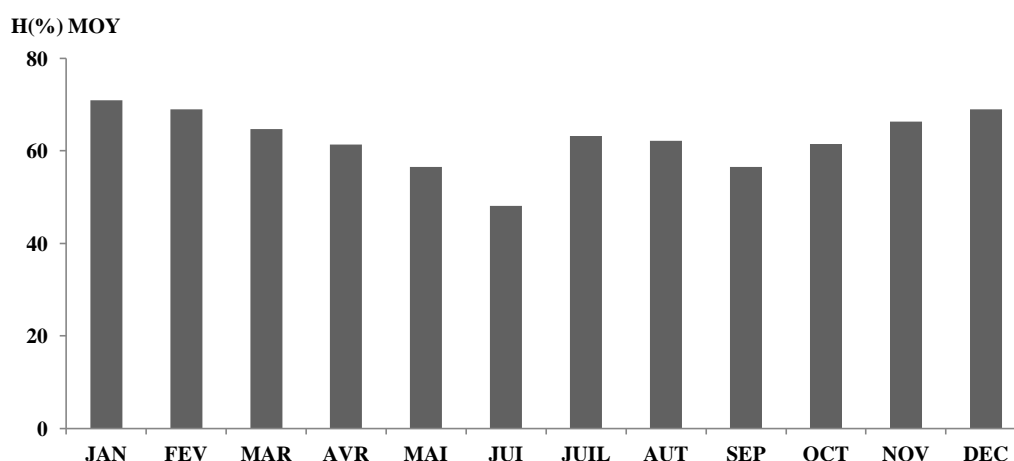


Figure 18 : Evolution de l'humidité relative mensuelle moyenne de la station de Khenchela pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.3. Les précipitations

Les précipitations sont les produits solides ou liquides qui résultent de la condensation de la vapeur d'eau et qui tombent des nuages ou passent directement de l'air au sol sur lequel ils se déposent. Elles comprennent la pluie, la grêle, la neige, la rosée, le givre, la gelée blanche et la brume. Les précipitations sont des données climatiques très variables dans l'espace et dans le temps. Pour la plus grande partie du monde, les précipitations représentent la source principale d'eau pour la production agricole. Elles sont caractérisées par trois principaux paramètres : le volume, l'intensité et la fréquence qui varient selon les lieux, les jours, les mois et aussi les années. Les précipitations s'évaluent en hauteur d'eau équivalente (mm) sur une période donnée (Guyot, 1999). Les précipitations dans la wilaya de Khenchela sont résumées sur la carte de la figure 19, où on remarque l'irrégularité de la distribution.

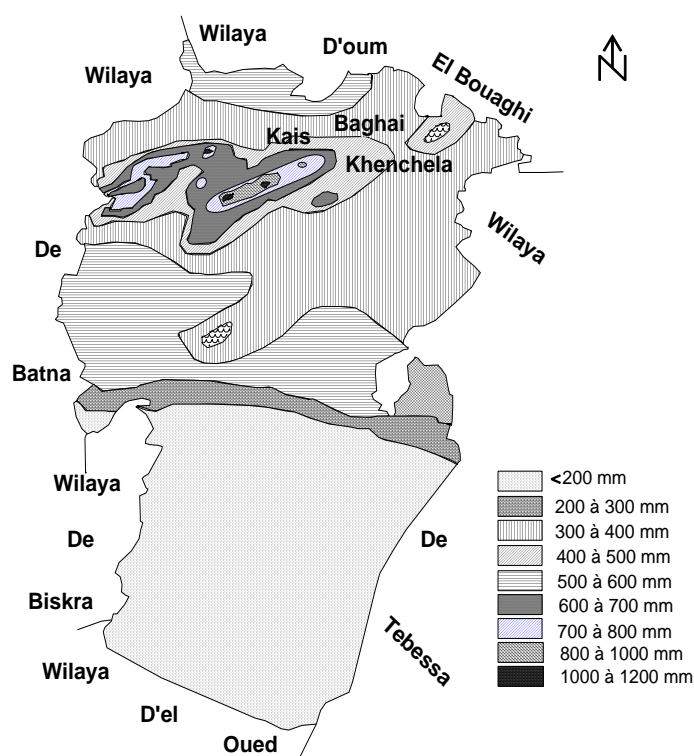


Figure 19 : Carte de pluviométrie de la wilaya de Khenchela (D.H.W., 2012).

IV.5.3.1. Répartition mensuelle des précipitations

Les données pluviométriques mentionnées dans la figure 20, montrent que la moyenne mensuelle est environ 41,80 mm, le mois le moins pluvieux est Juillet avec 20,92 mm. Le mois le plus pluvieux est Septembre avec 67,27 mm.

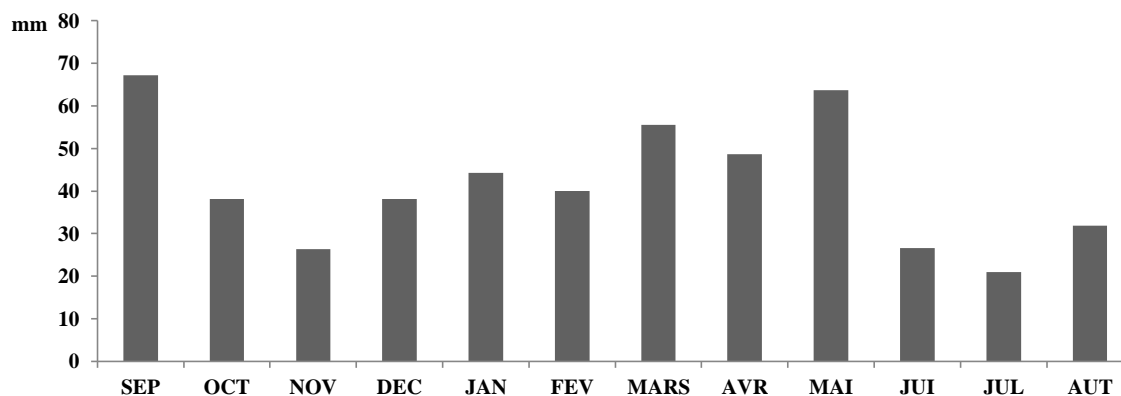


Figure 20 : Précipitation moyenne mensuelle de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.3.2. Répartition annuelle des précipitations

Pour construire ce diagramme (figure 21), nous nous sommes fondés sur une série de mesures s'étalant sur la période de 2005 à 2015. L'année la plus pluvieuse est 2011 avec 626,3 mm, alors que le plus moins pluvieuse en 2005 avec 368,6 mm, ce qui représente une différence de 257,7 mm. La moyenne pluviométrique est de 501,64 mm.

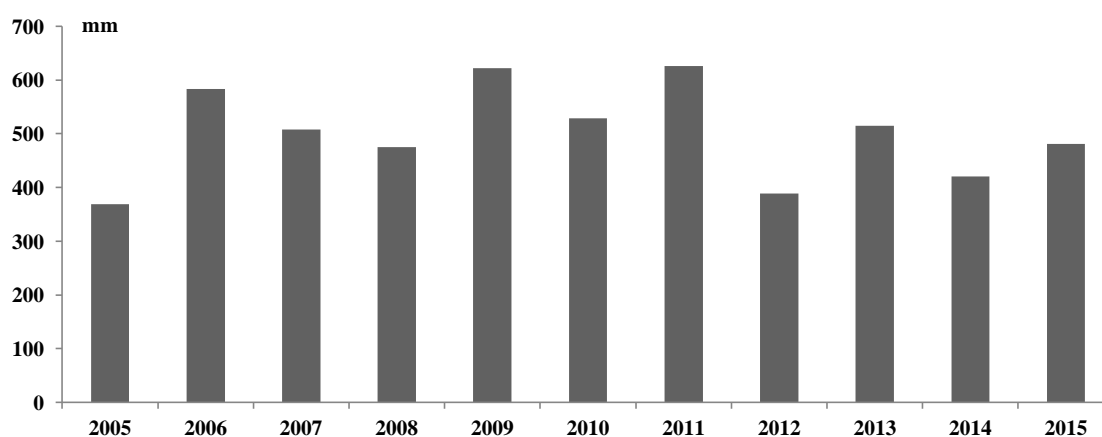


Figure 21 : Evolution des précipitations annuelles de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.3.3. Le coefficient pluviométrique

C'est un paramètre climatique important, représentant le rapport de la pluviométrie de l'année considérée au module pluviométrique pour la station donnée soit :

$$\bar{H} = H_i / H$$

Avec :

\bar{H} : Coefficient pluviométrique ;

H : pluviométrie moyenne pour une période de N année (dans notre cas H=501.64) ;

H_i : pluviométrie d'une année donnée en (mm).

Ce coefficient pluviométrique permet de déterminer les années excédentaires ($\bar{H} > 1$), et les années déficitaires ($\bar{H} < 1$) (Bustillo, 2005). A partir des résultats du coefficient pluviométrique de la station d'El Hamma (figure 22). On estime que :

- Le coefficient pluviométrique excédentaire représente 54,54 % ;
- Le coefficient pluviométrique déficitaire représente 45,45 %.

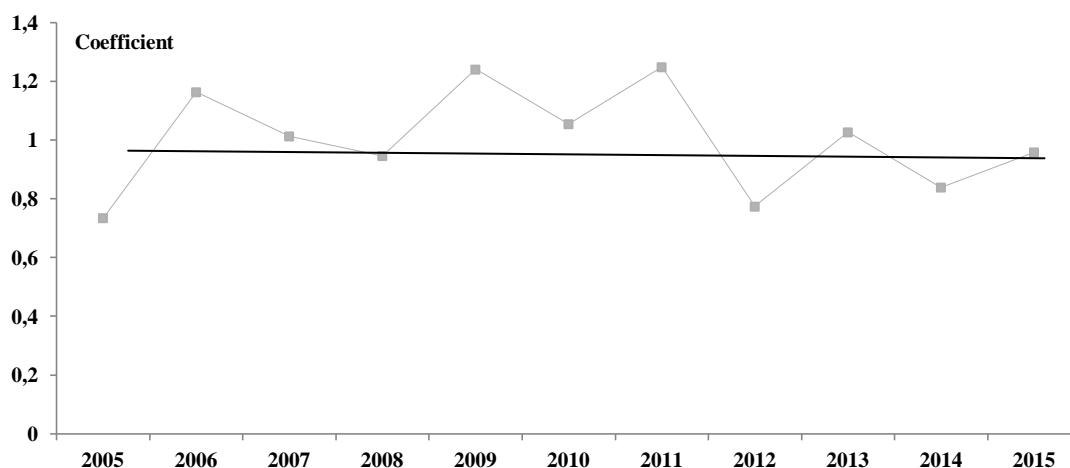


Figure 22 : Les variations de coefficient pluviométrique de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.4. Facteurs secondaires

IV.5.4.1. Le vent

Le vent est un déplacement de masse d'air provoqué par une différence de pression d'un lieu à l'autre. Habituellement on donne sa direction, qui indique le lieu d'où il provient, et sa vitesse, qui agit en combinaison avec les autres éléments du climat (Hufty, 2001).

Les deux paramètres sont mesurés séparément à l'aide de 2 types d'instruments :

- Les anémomètres qui mesurent la vitesse du vent ;
- Les girouettes qui indiquent la direction du vent.

La vitesse du vent est généralement exprimée en m/s, mais elle peut être également exprimée en nœuds, et 1m/s correspond à 1,943 nœud (Guyot, 1999). La vitesse moyenne du vent est de 28,66 m/s. La moyenne la plus forte est enregistrée au mois de Mars avec 31,25 m/s (figure 23). Mais la moyenne la plus faible est enregistrée au mois d'octobre avec 26,09 m/s.

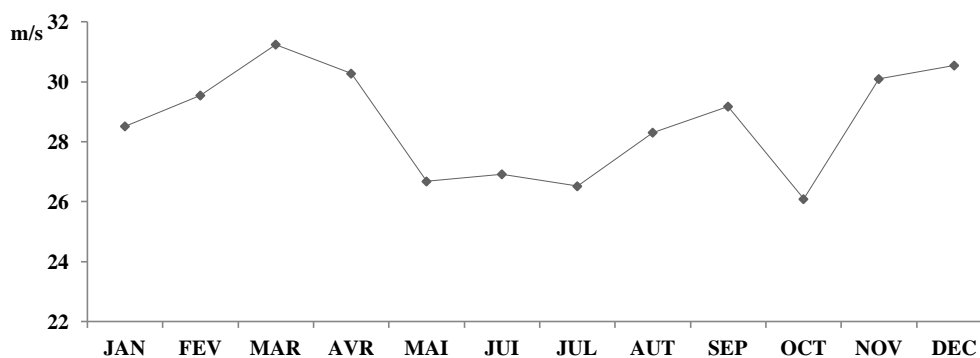


Figure 23 : Répartition moyenne du vent dans la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.5.4.2. La neige

Phénomène météorologique résultant de la formation par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique de cristaux bidimensionnels à symétrie radiaire hexaxiale. Elle constitue, dans les régions boréales et dans l'étage alpin des montagnes (Ramade, 2002). Le nombre de jours de tombée de neige est presque négligeable toute l'année à l'exception des cinq mois (Janvier, Février, Mars, Avril et Mai). Le maximum des jours est enregistré au mois de Février avec une moyenne de 1,73 jours (figure 24).

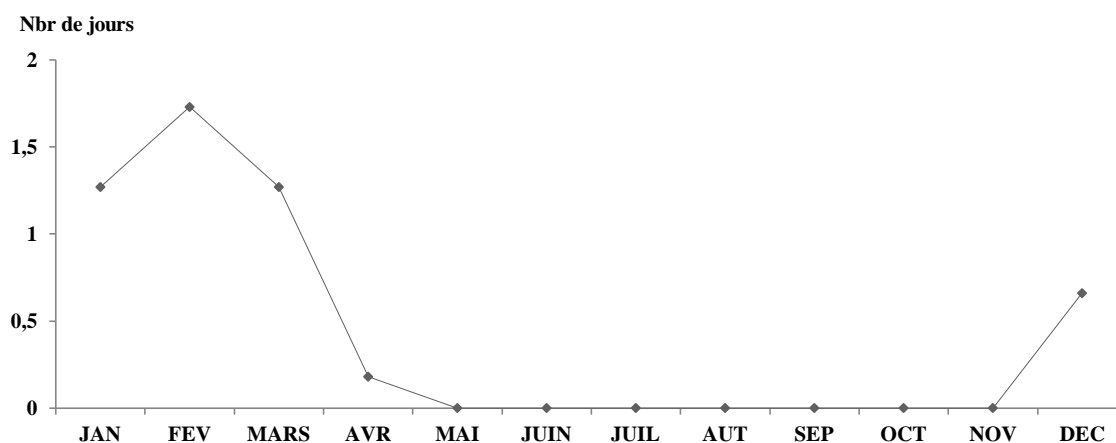


Figure 24 : La répartition moyenne de la neige de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.6. Caractérisation du climat

L'arrangement des deux principaux facteurs climatiques, à savoir les températures et les précipitations, permet de décider des périodes sèches et celles humides ainsi que de la localisation de l'étage bioclimatique bien définie une région donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes. Les plus couramment utilisés sont les suivants :

IV.6.1. Le diagramme ombrothermique de Gaussen

Il s'agit d'un Climagramme qui fait figurer deux paramètres climatiques : la température mensuelle moyenne et la pluviométrie mensuelle moyenne sur la même présentation, tout en respectant l'échelle conventionnelle : un degré correspond à deux mm de précipitation. Ce diagramme permet de déterminer la durée de la période sèche et humide. Ainsi, un mois est qualifié sec lorsque le total des précipitations mensuelles moyennes en mm est inférieur au double de la température mensuelle moyenne en °C (Aghreb, 2005).

Selon Bagnouls et Gausсен

L'indice xérothermique de Bagnouls et Gausсен (1957) : un mois est sec lorsque ses précipitations moyennes sont inférieures au double de la température moyenne ($P \leq 2 T^\circ$) (Coudé-Gausсен et Rognon, 1995).

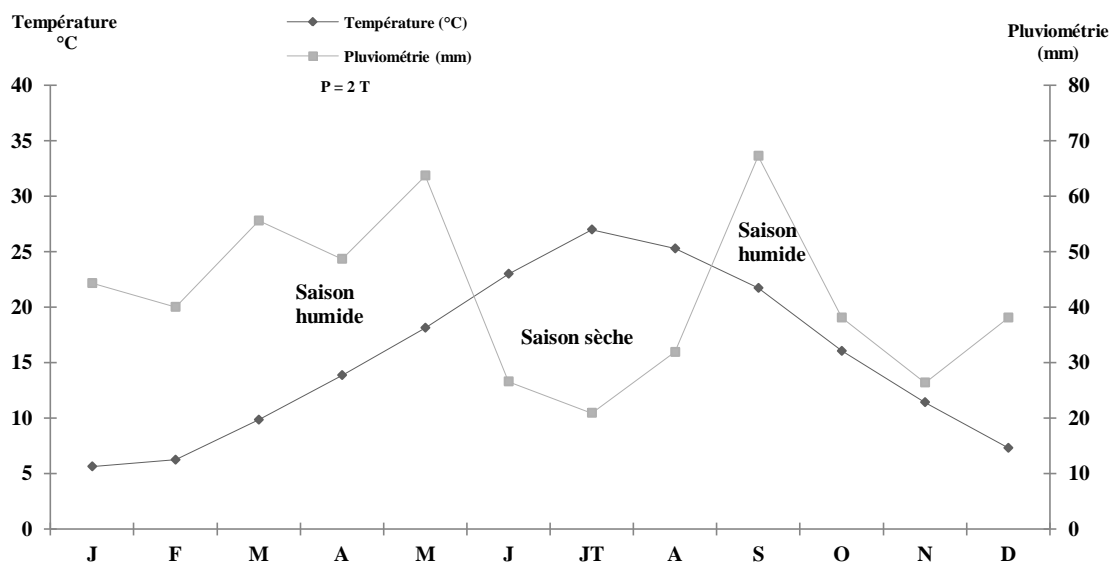


Figure 25 : Diagramme ombrothermique de la station d'El Hamma.

Le diagramme de Gausсен permet de mettre en évidence :

- Une saison humide débutant au mois de septembre et se terminant au mois de mai ;
- Une saison sèche s'étalant du mois de juin jusqu'au mois d'aout.

Nous remarquons que la saison sèche est accomplie par plusieurs mois secs consécutifs, à savoir juin, juillet, aout (figure 25).

IV.6.2. Indice de De Martonne

De Martonne a imaginé en 1923, un indice d'aridité dont les variations correspondaient aux changements des conditions d'écoulement de l'eau :

$$I = P/T + 10 \text{ (Hufty, 2001).}$$

I : indice d'aridité annuelle ;

P : précipitations moyennes annuelles en (mm) ;

T : températures moyennes annuelles en (°C) (Hufty, 2001).

Les valeurs de cet indice sont classées comme suit :

Tableau 8 : Classification climatique de De Martonne (Aghreb, 2005).

| valeurs | 0-5 | 5-15 | 15-20 | 20-30 | 30-60 |
|-----------------|---------------|-------|------------|------------|--------|
| Zone climatique | Extrême aride | Aride | Semi aride | Sub-humide | Humide |

Dans le cas de ce travail, la moyenne des précipitations interannuelles est de 501,64 mm et la température moyenne annuelle est de 15,53 °C ; ce qui donne $I = 19,64$. Cette valeur de (I) est comprise entre 15 et 20, ce qui permet de dire que notre zone d'étude a un climat semi aride.

IV.6.3. Indice pluviométrique d'Emberger

L'indice pluviométrique est calculé en utilisant la formule suivante :

$$Q = 2000p/M^2 - m^2 \text{ (Aghreb, 2005).}$$

Où :

Q : Indice pluviométrique d'Emberger ;

P : Pluviométrie annuelle moyenne (mm) ;

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (°K) ;

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (°K).

($T \text{ °K} = T \text{ °C} + 273,2$) (Aghreb, 2005).

Sur la base de Q, les cinq étages du bioclimat méditerranéen ont été distingués :

Saharien, Aride, Semi-aride, Sub-humide et Humide. Ils ont été subdivisés en variantes sur la base des seuils thermiques de (m) (Aghreb, 2005).

Tableau 9 : Valeur du quotient pluviométrique d'Emberger à Khenchela de 2005/2006 à 2014/ 2015.

| Station | P (mm) | M | | m | | Q |
|----------|--------|-------|--------|------|--------|-------|
| | | °C | °K | °C | °K | |
| El Hamma | 501,64 | 35,01 | 308,21 | 1,62 | 274,82 | 51,54 |

Avec la valeur obtenue de $Q = 51,54$ et $m = 1,62 \text{ °C}$, on trouve que la station d'El Hamma est classée dans l'étage bioclimatique semi-aride avec un hiver frais (figure 26).

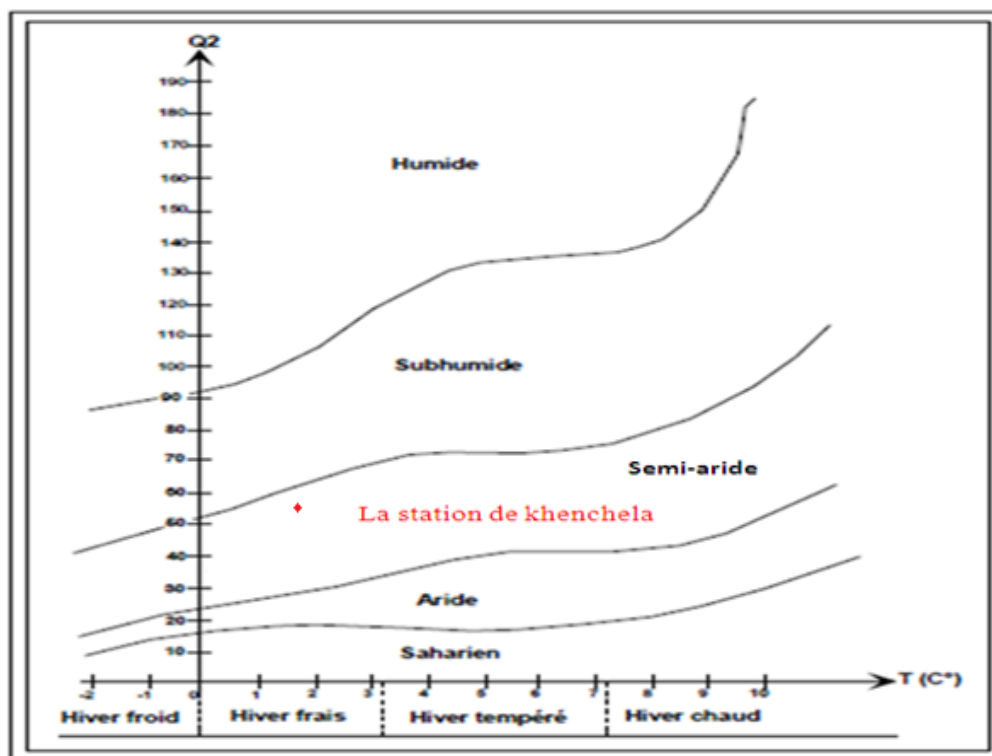


Figure 26 : Climagramme d'Emberger de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.7. Régime saisonnier

Selon M'Hiriri (1998) le régime pluviométrique moyen saisonnier est du type H.A.P.E (Hiver, Automne, Printemps, Eté). Ce régime de précipitation saisonnière est d'autant plus intéressant que son second maximum de pluie survient en période automnale qui succède à la saison estivale chaude et sèche. Il présente l'avantage d'atténuer l'impact de la sécheresse de l'été. Du moins lorsque les précipitations enregistrées durant l'automne sont relativement importantes (recharge hydrique) (M'Hiriri et al., 1998).

Tableau 10 : Le régime pluviométrique saisonnier à la station d'El Hamma pour la période 2005/2006 à 2014/2015.

| Station | Saison | Automne | | | Hiver | | | Printemps | | | Eté | | | Total |
|------------|------------------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | mois | S | O | N | D | J | F | M | A | M | JN | J | A | |
| d'El Hamma | P (mm) mensuelle | 67,27 | 38,11 | 26,39 | 38,11 | 44,32 | 40,03 | 55,59 | 48,69 | 63,73 | 26,58 | 20,93 | 31,89 | 501,64 |
| | P Saison | 131,77 | | | 122,46 | | | 168,01 | | | 79,4 | | | |
| | P % saisonnier | 26,27 | | | 24,41 | | | 33,49 | | | 15,83 | | | 100% |

Pour la station d'El Hamma on remarque que la saison la plus pluvieuse est le Printemps avec 33,49 % (168,01 mm), puis l'Automne avec 26,27 % (131,77 mm), l'hiver avec 24,41 % (122,46 mm) et en fin l'été avec 15,83 % (79,4 mm) ; nous avons donc un régime saisonnier de type P.A.H.E (Figure 27).

P saisonnier (%)

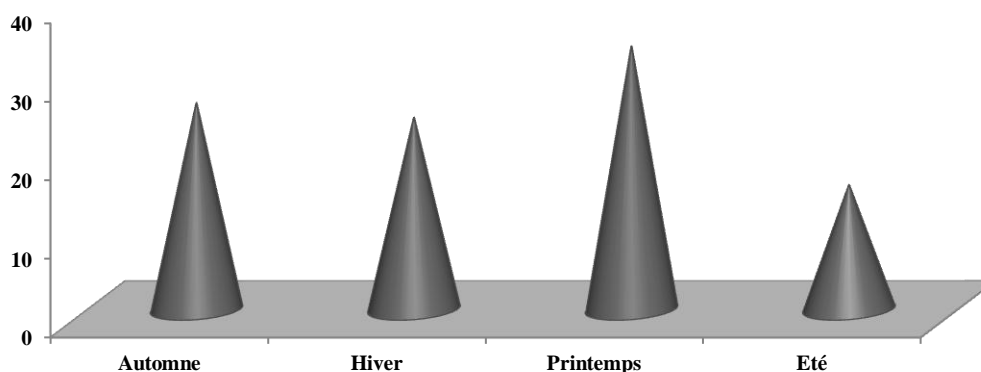


Figure 27 : Le régime pluviométrique saisonnier à la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

IV.8. Le bilan hydrique

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

Avec :

P : Précipitation annuelle en mm ;

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm ;

R : Ruissellement en mm ;

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

IV.8.1. Estimation de l'évapotranspiration

Cette expression de l'évapotranspiration correspond à la perte en eau, plus exactement aux apports en eau dont à besoin un plante. Cette évaporation physiologique est donc proportionnelle à la transpiration des organismes vivants, elle-même dépendante du taux de couverture végétal, de la température, du vent, de l'humidité atmosphérique et pédologique (Mercier, 2001).

IV.8.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'agronome américain Thornthwaite lança l'expression en 1931 et lui donna une définition précise en 1948 : Evapotranspiration d'un sol couvert par une végétation en pleine pousse végétative, le sol étant toujours bien alimenté en eau (Lambert, 1996).

Calcul l'ETP selon Thornthwaite

La formule utilisée est :

$$\text{ETP (mm/mois)} = 16(10T/I)^a \text{ (Lambert, 1996). Où :}$$

T : La température moyenne mensuelle en °C ;

I : indice thermique annuelle, somme des 12 indices mensuels i ; et $I = \sum i$ et $i = (t/5)^{1,514}$;

a : Coefficient constant pour un même lieu et ne dépendant que de i ;

$a = 1,6/100 I + 0,5$ (Lambert, 1996).

IV.8.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

C'est l'évapotranspiration effective d'un couvert végétal lorsque l'alimentation en eau n'est pas assurée de façon optimale. C'est dire que le facteur limitant peut être d'ordre climatique (pluie insuffisantes par exemple), ou d'ordre pédologique (épuisement rapide de la réserve en eau facilement utilisable du sol), ou d'ordre physiologique ; par exemple, couvert végétal incapable d'assurer, du sol vers les feuilles, un débit d'eau suffisant pour utiliser toute l'énergie qui pourrait être disponible pour la vaporisation (Avenard et al., 1971).

Calcul l'ETR selon Turc

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

ETR : L'évapotranspiration réelle, en (mm) ;

P : La précipitation annuelle, en (mm) ;

T : La température moyenne annuelle en °C ;

L : Un paramètre calculé en fonction de la température selon la formule :

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

Application numérique

$P = 501,64 \text{ mm}$

$T = 15,53 \text{ } ^\circ\text{C}$ ce qui nous donne $L = 875,53$.

On aura donc : $ETR = 451,93$ mm, soit 90,09 % des précipitations.

D'après ces résultats, nous pouvons conclure que les déperditions des eaux pluviales sont très importantes (90,09 %), raison pour laquelle la valeur de l'ETR est bien plus élevée.

IV.8.2. Le bilan hydrologique selon Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite qui est largement utilisée en agronomie pour établir des bilans hydriques peut aussi être utilisée pour réaliser des bilans hydrologiques en domaine karstique. La première étape consiste à estimer les pluies efficaces. La deuxième étape consiste à déterminer la répartition des pluies efficaces entre écoulement superficiel et infiltration profonde (Dassargues, 2000).

La base en est la détermination, en fonction des facteurs thermiques, de l'évapotranspiration potentielle (ETP). En confrontant à cette valeur les quantités d'eau apportées par année, ou mieux mois par mois, par les précipitations, on détermine, d'une part l'évapotranspiration réelle (ETR) et, d'autre part, un surplus d'eau qui constitue l'écoulement, Ruissellement (R) et l'infiltration (I) (Péguy, 1970).

La plante commence à souffrir de la sécheresse, et à fermer ses organes de transpiration, les stomates, avant que ne soit atteint le seuil du point de flétrissement utilisable. On a donc été amené à définir une RFU (La réserve facilement utilisable), qui, tant qu'elle n'est pas épuisée, permet à la plante, en théorie, de pomper de l'eau du sol sans restriction (Tron et al., 2013). La réserve facilement utilisable ou RFU d'un sol est estimée à partir de la réserve utile (égale à la surface de sol multipliée par la densité apparente de la terre) (Urban et Urban, 2010).

Interprétation du bilan hydrique de Thornthwaite

Cette Représentation graphique du bilan hydrique (fig.28, 29), montre qu'à l'échelle annuelle, l'ETP devance aux précipitations ; et que l'examen de l'ETP à l'échelle mensuelle, montre l'existence de deux saisons bien distinctes : l'une pendant laquelle les précipitations sont supérieures ou égale à l'ETP (décembre à mars), et la seconde qui présente l'inverse allant du mois d'avril jusqu'à novembre.

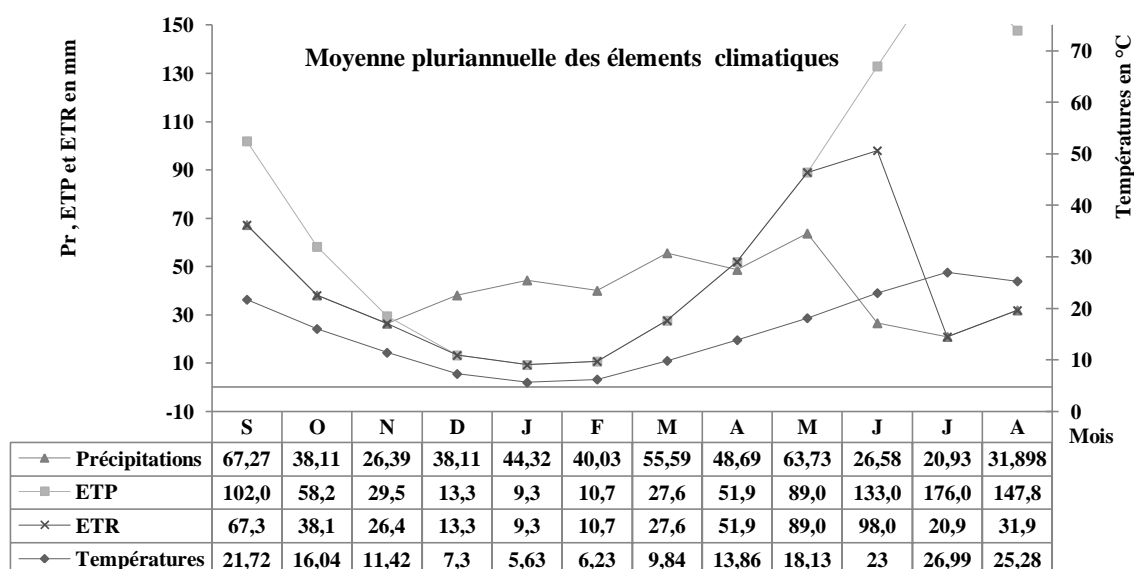


Figure 28 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques de la station de Khenchela pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

Pendant la saison froide, les précipitations couvrent les besoins de l'évapotranspiration potentielle et permettent la formation de la RFU. A partir du mois de Juin on a un épuisement de la RFU, ce qui se traduit par un déficit agricole. Mais à partir du mois de décembre on assiste à une reconstitution du stock, qui atteint son maximum au mois de mars et demeure ainsi jusqu'au mois de mai où la réserve débute à s'amoinrir jusqu'à l'abattement de la réserve.

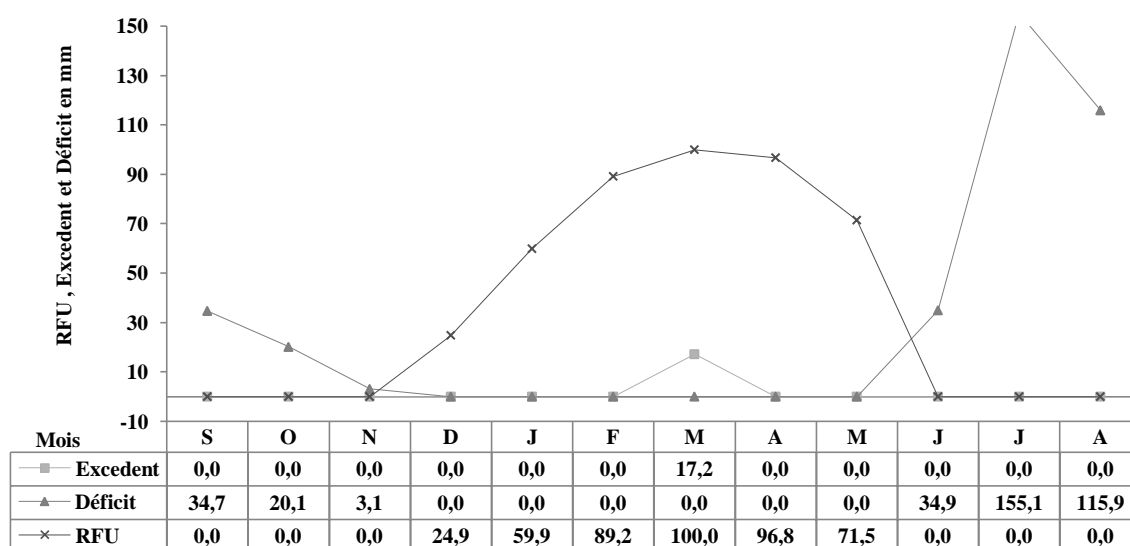


Figure 29 : Variation mensuelle des résultats du bilan hydrique de la station d'El Hamma pour la période de 2005/2006 à 2014/2015.

Conclusion

Le climat de la commune de Khenchela s'intègre parfaitement dans le climat des hautes plaines constantinoises et des Aurès. Il est méditerranéen, semi-aride, au voisinage de l'aride.

Deux saisons distinctes ont été obtenues :

- Une saison peu pluvieuse froide allant du mois de novembre jusqu'au mois de mars ;
- une saison sèche chaude qui va du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre.

Les précipitations sont assez rares voire absentes en été, mais faibles à moyennes en hiver. Elles tendent à connaître d'importantes fluctuations d'une année à l'autre, la somme des précipitations moyennes annuelles est de l'ordre de 501,64 mm.

- La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15,53 °C ;
- L'évapotranspiration réelle (ETR) est de l'ordre de 451,93 mm ;
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) est de l'ordre de 848,3 mm ;
- La réserve facilement utilisable (RFU) n'est jamais remplie au courant de toute l'année. C'est l'état de déficit existant durant la saison estivale.

Chapitre V : matériel et méthodes

Introduction

Ce travail est consacré à l'étude de la qualité des deux sources thermales dans la wilaya de Khenchela; la première source Djaarir située à la commune de Bouhmama et la seconde, Tamersit localisée dans la commune de Kheirane (Figure 30). Pour cela, des analyses physico-chimiques ont été nécessaires. Dans ce chapitre, nous allons présenter les prélèvements effectués et les différentes méthodes et matériels utilisés.



Figure 30: Carte de la localisation des deux sources (C.E., 2016) modifiée.

Les analyses physico-chimiques (cations et anions), ont été effectuées au niveau du laboratoire **RNAMS** (Ressources Naturelles et Aménagement des Milieux Sensibles) de l'Université Larbi Ben Mhidi, à la wilaya d' Oum El Bouaghi, sous la direction, l'orientation et les conseils de notre enseignante Dib Dounia.

V. La zone d'étude

L'étude concerne les eaux des deux sources ; la source Djaarir et celle de Tamarsit :

V.1. La source Djaarir

C'est une source thermique naturel située au l'Est de la commune de Bouhmama, à une altitude de 1018 m caractérisée par une géologie cénomaniennne ; ce dernier est situé au Nord-Ouest de la Wilaya de Khenchela et dans la partie Est des Aurès, et est presque complètement entourée d'une chaine de montagnes (figure 31).



Figure 31 : Photo satellitaire de la source Djaarir par Google Earth (20/10/2014).

V.2. La source Tamersit

C'est une source thermique naturelle localisée à la commune de Kheirane (environ 50 Km de Bouhmama) ; située au sud de la commune de Bouhmama, à une altitude 737 m, elle se caractérise par une géologie Turonienne (figure 32).

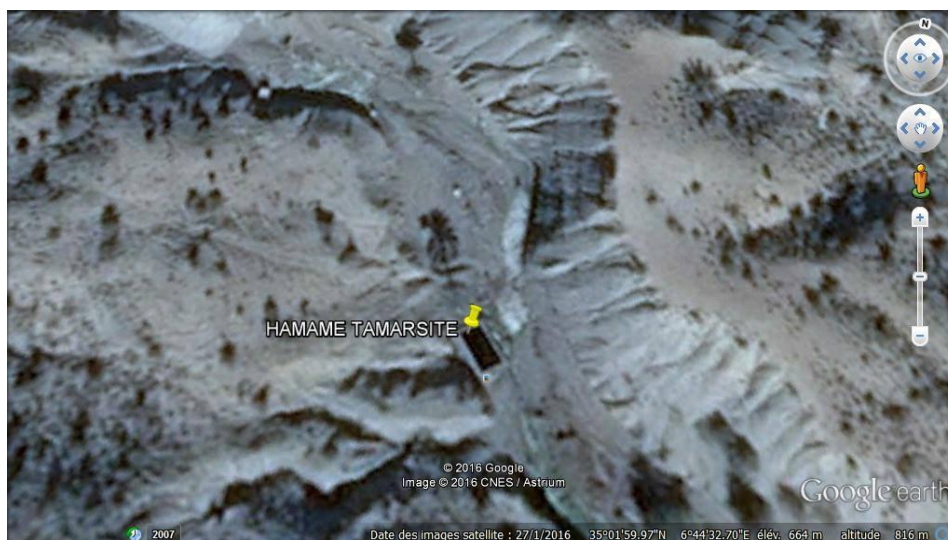


Figure 32 : Photo satellitaire de la source Tamersit par Google Earth (27/01/2016).

V.3. Caractères géomorphologiques, géologiques et pédologiques

V.3.1. Caractères géomorphologiques

V.3.1.1. Relief et altitude

La zone comprenant les deux sources thermales de Djaarir et Tamersit est située sur un relief montagneux, accidenté mais accessible (Figure 33).

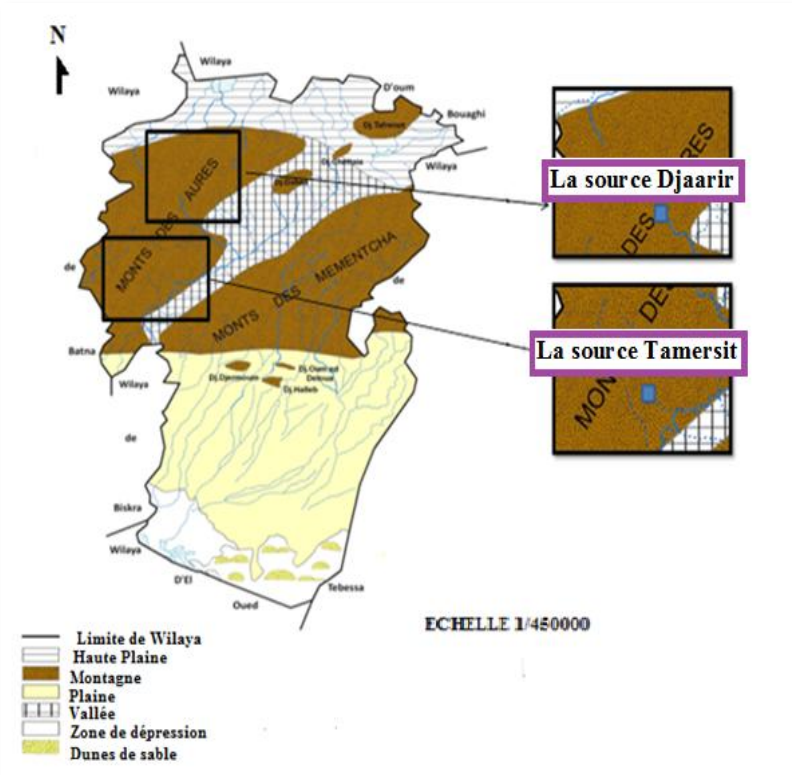


Figure 33 : Carte de relief de la wilaya de Khenchela (D.S.P., 2016) modifiée.

La source thermique de Djaarir s’élève à une altitude de 1018 m alors que celle de Tamersit se localise à seulement 737 m (figure 34).

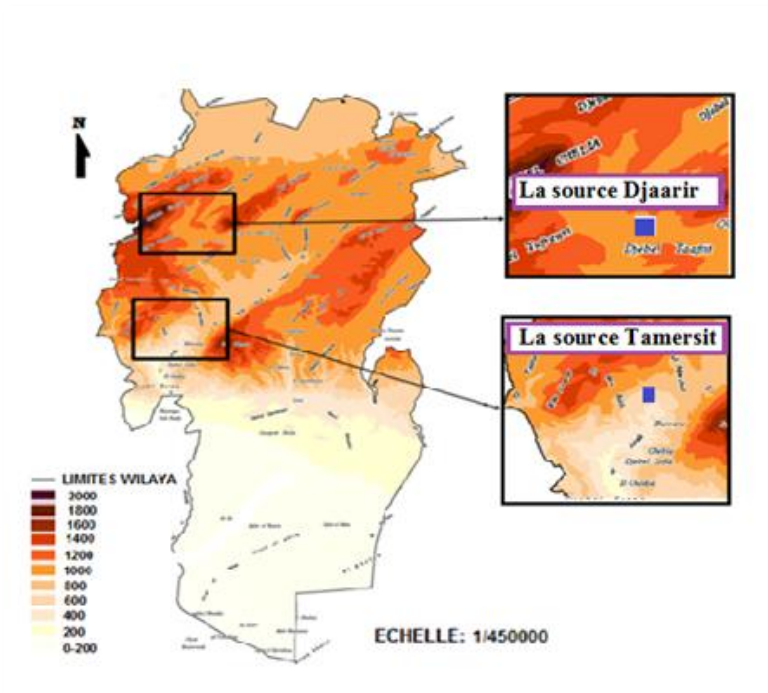


Figure 34 : Carte d’altitude de la wilaya de Khenchela (D.E., 2016) modifiée.

V.3.1.1.2. Pente

La pente du terrain comprenant la source de Djaarir possède une pente variant entre 3 à 23 % ; tandis que la source Tamersit a une pente de 3 à 12 % (figure 35).

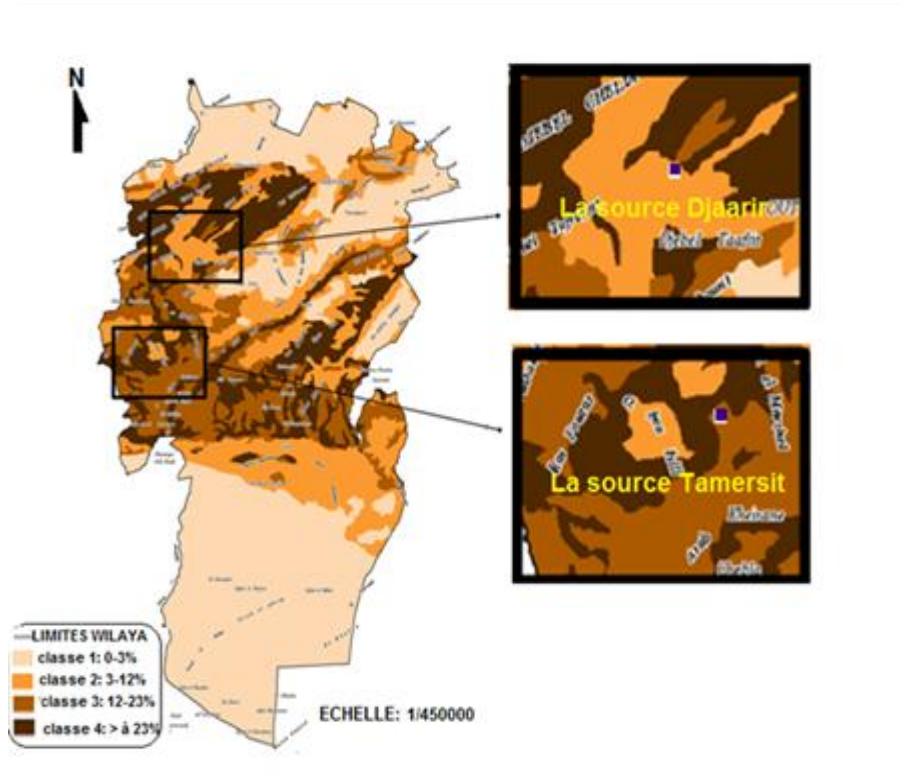


Figure 35 : Carte des pentes de la wilaya de Khenchela (D.E., 2012) modifiée.

V.3.2. Géologie des terrains comprenant les deux sources

La géologie du terrain où se trouve la source de Djaarir est caractérisée par une nature cénomanienne, présente dans tous les grands anticlinaux de l'Aurès. Elle est essentiellement calcaire-marneuse (figure 36).

Le Cénomanien comporte généralement :

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

Une nature Turonienne caractérise la source Tamersit (Figure 36). Le Turonien occupe à l'affleurement les plus grandes surfaces de l'Aurès et comporte, en effet, au dessus des marno-calcaires de base, un ensemble de marnes beiges et calcaires (Laffitte, 1939 cité par Boubelli, 2009).

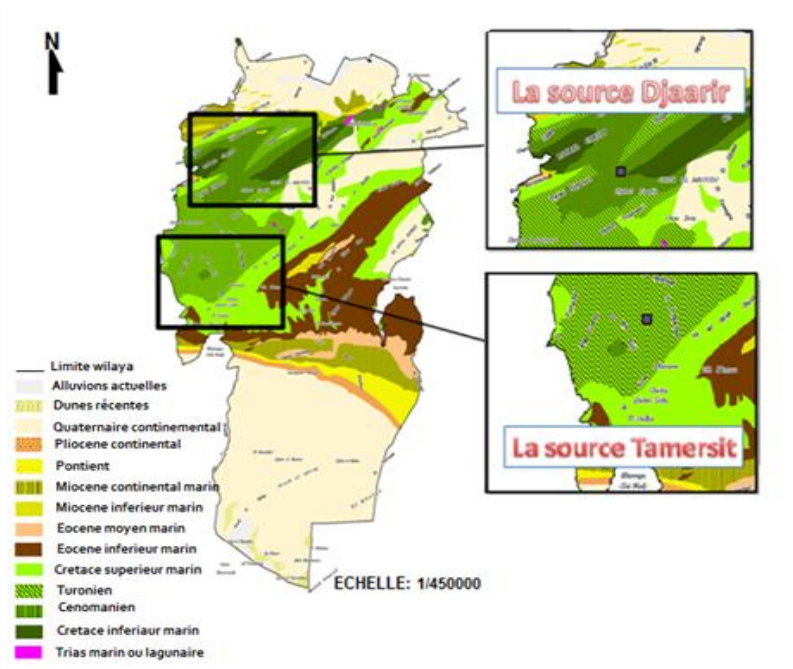


Figure 36: Carte géologique de la wilaya de Khenchela (D.E., 2016) modifiée.

V.3.3. Caractères pédologiques

La classe des sols de la zone des deux sources est de nature pédologique calcaire humifère (Figure 37).

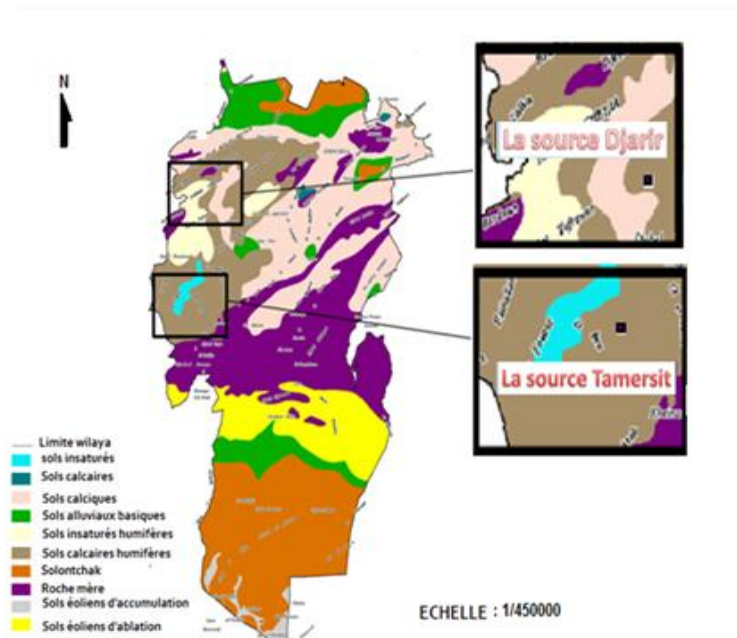


Figure 37 : Carte des classes des sols de la wilaya de Khenchela (D.E., 2016) modifiée.

V.4. Caractères hydrographiques

Les deux sources étudiées sont des sources thermales, situées proches des oueds permanents. La source de Djaarir située au Nord-Ouest et la deuxième source ouest de la wilaya de Khenchela (Figure 38).

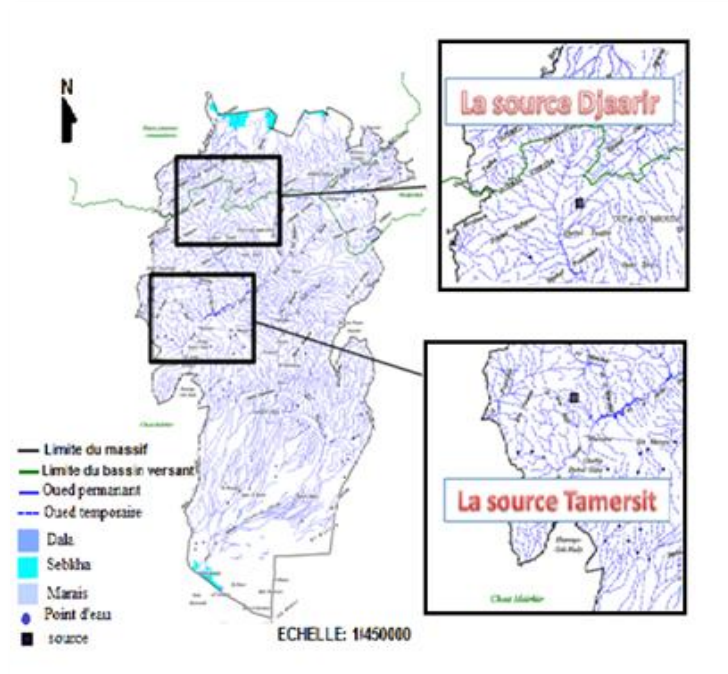


Figure 38 : Carte hydrologique de la wilaya de Khenchela (D.E., 2016) modifiée.

V.5. Prélèvement des échantillons

V.5.1. La source de Djaarir

La source de Djaarir est située à l'Est de la commune de Bouhmama (photo 1), dans l'aire géographique comprise entre de $6^{\circ} 47' 21,53''$ longitude Est et entre de $35^{\circ} 16' 45,81''$ latitude Nord.



Photo 1 : La source de Djaarir.

V.5.2. La source Tamersit

La source Tamersit est localisée à la commune de Kheirane, située au sud de la commune de Bouhmama dans l'aire géographique comprise entre $6^{\circ} 44' 32,65''$ longitude Est et $35^{\circ} 01' 59,48''$ latitude Nord (photo 2). On y remarque quelques palmier datiers.



Photo 2 : La source Tamersit.

V.5.3. Prélèvement

Le prélèvement d'eau de la source Djaairir (photo 3) était le 26 avril 2016 à 18:20.



Photo 3 : Mesure des paramètres physiques in situ de la source Djaairir.

Le prélèvement d'eau de la source Tamersit (photo 4) effectué le 26 avril 2016 à 16:20.



Photo 4 : Mesure des paramètres physiques in situ de la source Tamersit (26/04/2016).

Les échantillons d'eau destinés aux analyses physico-chimiques sont prélevés dans des flacons en polyéthylène et en verre stériles, bien rincés avec l'eau de la source même.

V.6. Protocole expérimental

V.6.1. Matériels utilisés (photo 5)

- Tablette Coolpad pour la localiser géographique ;
- Spectrophotomètre à flamme ;
- Agitateur magnétique ;
- Balance analytique ;
- Multi paramètre à 6 paramètres C 535 T ;
- Bouteilles en polyéthylène ;
- Flacons en verre ;
- Microsoft office Excel 2007, on l'utilise pour réaliser les diagrammes.



Multi paramètre c535T

Photomètre à Flamme

Balance analytique

Spectrophotomètre

Agitateur magnétique

Photo 5 : Matériels utilisés.

V.7. Méthodes mesurés

V.7.1. Paramètres mesurés in situ

V.7.1.1. Température

La température de l'eau est très proche de la température moyenne annuelle de l'air au point d'émergence. Les sources thermales ont leur température nettement supérieur à la température moyenne annuelle (Lambert, 1996).

a. Mode opératoire

Premièrement ; rincer les flacons avec l'eau à échantillonner, en suite prélever l'eau dans des flacons en verre. Insérer la cathode du multiparamètre puis noter les mesures (photo 6) le plus vite possible, dès que les chiffres sont stables.

Le même mode opératoire est réalisé pour la mesure de pH.

V.7.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le principal déterminant du pH, est la dissociation des molécules d'eau en H^+ et OH^- (Cano et al., 2006). Le pH varie de 0 à 14 ; un pH de 0 représente un maximum d'acidité, un pH de 14 signifie un maximum de basicité, tandis que le pH 7 correspond à la neutralité. La valeur du pH de l'eau est déterminante pour la survie de la faune et la flore de l'eau (Allgayer et Gireg, 2007).



Photo 6 : Mesure des paramètres physiques in situ de la source Tamersit (26/04/2016).

V.7.2. Paramètres mesurés au laboratoire

Les mesures des paramètres conductivité et salinité ont été réalisées au laboratoire faute de lecture sur le Multi-paramètres de terrain.

V.7.2.1. Conductivité (CE)

La conductivité d'une eau indique son aptitude à conduire le courant électrique. Cette aptitude dépend de la teneur de l'eau en sels dissous. Elle permet une bonne appréciation des matières dissoutes, et peut faciliter la localisation d'une source de pollution. La conductivité est l'inverse de la résistivité électrique. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m) : $1 \text{ S/m} = 10^6 \mu\text{S/cm}$. La conductivité est mesurée à 25 °C (Le pimpec et al., 2002).

a. Mode opératoire

Avant d'effectuer les prélèvements de l'eau, les flacons en plastique sont rincés avec l'eau de l'échantillon même, au niveau de la source. Nous avons conservé les échantillons dans un réfrigérateur et effectué les analyses au laboratoire avant 72 heures. La cathode du Multi paramètres est insérée, à l'intérieur du flacon, et les résultats sont enregistrés aussitôt

(photo 7). Le même mode opératoire est réalisé pour la mesure de la salinité.



Photo 7 : Mesure des paramètres physiques au laboratoire.

V.7.2.2. Salinité

La présence de sels dans l'eau modifie certaines propriétés telles que la densité, la compressibilité, le point de congélation et la température du maximum de densité. D'autres, comme la viscosité et l'absorption de la lumière, ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sels dans l'eau comme la conductivité et la pression osmotique. Le chlorure de sodium (NaCl) n'est qu'un des très nombreux sels contenus dans l'eau, pour la mesure de la salinité nous avons utilisé un multi-paramètre (Lalaouna et Merdaci, 2012).

Les concentrations des ions de sulfates, nitrates, nitrites sont réalisées au niveau du laboratoire RNAMS (Ressources Naturelles et Aménagement des Milieux Sensibles), et les courbes d'étalonnage utilisées sont réalisées par notre enseignante Dib Dounia.

V.8. Paramètres chimiques (cations et anions)

V.8.1. Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+}) par la méthode titrimétrique à l'EDTA

a. Principe

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel di sodique de l'acide éthylène-diamine tétra-acétique à pH 10. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium, la méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs nécessaires

- Solution d'EDTA 0,02 N : dissoudre 3,721 g de sel di sodique (EDTA) cristallisé dans 1 litre (1000 ml) d'eau déminéralisée ;
- Solution tampon pour le maintien du pH à 10 ;
- Noir d'ériochrome ;
- Solution de bleu d'ériochrome ;
- Solution de NaOH 1 N ;
- Solution de HCl 1N.

c. Mode opératoire

A 5 ml d'eau à analyser, 3 ml de NaOH à 1N (1 mol/l) sont ajoutés, puis quelques gouttes de Bleu d'Eriochrome. Titrer avec l'EDTA jusqu'au virage au violet. Le volume nécessaire d'EDTA pour obtenir le virage au violet est :

16 gouttes ou 0,8ml de solution EDTA pour le virage au violet pour l'eau de la source Djaarir.



Photo 8 : Titration à l'EDTA pour détecter le calcium de deux échantillons.

14 gouttes ou 0,7 ml de solution EDTA pour la source Tamersit.

Le blanc est de l'eau déminéralisée et a nécessité 2 gouttes ou 0,1ml de solution EDTA (Photo 8). A la même solution, on a ajouté 0,32 ml de HCl puis agité durant 1 min jusqu'à la parfaite dissolution du précipité magnésien.

5 ml de solution tampon sont versés pour maintenir le pH à une valeur de 10 et une pincée de noir d'Eriochrome, bien mélangé.

On procède après à une titration avec l'EDTA jusqu'au virage au bleu.

Le volume d'EDTA nécessaire au virage au bleu pour l'eau de la source Tamersit est de 6 gouttes, équivalent à 0,3 ml (Photo 9).



Photo 9 : Titration à l'EDTA pour détecter le magnésium d'eau de la source Tamersit.

2 gouttes ou 0,1 ml pour le Témoin.

L'eau de la source Djaarir est soumise à une dilution pour détecter le magnésium, car la quantité de la solution d'EDTA nécessaire à la titration a largement dépassé 100 gouttes.

c.1. Mode opératoire de la dilution

Verser 5 ml d'eau à analyser et compléter par l'eau déminéralisée jusqu'à 100 ml. Verser 5 ml de solution tampon pour maintenir le pH à 10 et une pincé de Noir d'Eriochrome. Bien mélanger. La quantité d'EDTA nécessaire pour le virage au bleu est de 5 ml (Photo 10).



Photo 10 : Dilution et titration à l'EDTA pour l'eau de la source Djaarir.

V.8.2. Sodium (Na^+) par la méthode du spectrométrie à Flamme

a. Principe

La méthode de dosage du sodium et potassium par spectrométrie d'émission de flamme est souvent suffisante pour les eaux naturelles. Les faibles concentrations sont mesurables par la spectrométrie d'absorption atomique et spectrométrie d'émission à l'aide d'un générateur inductif de plasma, car ils sont sensibles, rapides et précis (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs utilisés

- Acide nitrique ;
- Solution mère étalon de sodium à 100 mg/l ;
- Solution fille étalon de sodium à 1 mg/l.

c. Mode opératoire

Nébuliser l'eau à analyser dans une flamme air-acétylène oxydante en intercalant de l'eau permutée entre chaque échantillon. Effectuer les lectures à la longueur d'onde $\lambda = 589$ nm.

V.8.3. Potassium (K^+) par la méthode spectrométrie à flamme**a. Principe**

La technique de dosage du sodium et du potassium obéit au même principe.

b. Réactifs

- Acide nitrique ;
- Solution mère étalon de potassium à 100 mg/l ;
- Solution fille étalon de potassium à 2 mg/l.

c. Mode opératoire

Nébuliser l'eau à analyser dans une flamme air-acétylène légèrement oxydante en intercalant de l'eau ultra-pure entre chaque échantillon. Effectuer les lectures à la longueur d'onde $\lambda=766,5$ nm.

V.8.4. Chlorures (Cl^-) par la méthode de Mohr**a. Principe**

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs

- Acide nitrique pur ;
- Carbonate de calcium pur ;
- Solution de chromate de potassium (10 %) ;
- Solution de nitrate d'argent (0,1 N).

c. Mode opératoire

Introduire 5 ml d'eau à analyser. Ajouter 2 à 3 gouttes d'acide nitrique, une pincée de carbonate de calcium 0,2 g de carbonate de calcium et 3 gouttes de chromate de potassium à 10%. Verser alors au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'un précipité de teinte rougeâtre, cette couleur doit persister.

L'eau de la première source (Djaarir) est soumise à une dilution :

Verser 5 ml d'eau à analyser, ensuite compléter par l'eau déminéralisée jusqu'à 50ml.

Le volume suffisant pour l'apparition de la teinte rougeâtre (photo 11) est de 35ml de nitrate d'argent.



Photo 11: Etapes du dosage des chlorures pour l'eau de la source Djairir (Après deux dilutions).

4 gouttes (0,2 ml) de la solution de nitrate d'argent pour l'eau de la source Tamersit sont suffisantes pour l'apparition de la couleur (marron), ce qui a nécessité d'effectuer de nombreuses dilutions avant d'obtenir la couleur rougeâtre (photo 12).



Photo 12 : Dosage des chlorures pour l'eau de la source Tamersit.

V.8.5. Sulfates (SO_4^{2-}) par la méthode néphélométrique

a. Principe

Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de Tween 20 ou de polyinyl-pyrrolidone. Les suspensions homogènes sont mesurées au spectromètre (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs

- Solution d'acide chlorhydrique au 1/10 :
 - Chlorure de baryum 1 g ;
 - Solution de Tween 2 ml, eau déminéralisée : quantité suffisante pour 10 ml.
- Solution de polyinyl-pyrrolidone ou de Tween 20 à 25 % ou 2 ml ;
- Solution de chlorure de baryum stabilisée.

c. Mode opératoire

A 5 ml d'eau à analyser, introduire successivement :

1 ml d'acide chlorhydrique au 1/10 ; 5 ml de solution de chlorure de baryum stabilisée + 1g (une pincée) de chlorure de baryum (photo 13).

Préparer dans les mêmes conditions un tube témoin en remplaçant l'eau à analyser par de l'eau déminéralisée.

Agiter énergiquement et laisser reposer 15 minutes.



Photo 13 : Dosage des sulfates des deux sources.

Agiter de nouveau et faire les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 650 nm. Lier la valeur au spectrophotomètre. Se reporter à la courbe d'étalonnage.

V.8.6. Nitrates (NO_3^-) par la méthode spectrométrie d'absorption moléculaire

a. Principe

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage spectrométrique (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs

- Solution de salicylate de sodium à 10 g/l à renouveler toutes les 24 heures ;
- Acide sulfurique concentré ;
- Solution d'hydroxyde de sodium ;
- Solution d'azoture de sodium ;
- Solution mère étalon d'azote nitrique à 100 mg/l ;
- Solution fille étalon d'azote nitrique à 5 mg/l.

c. Mode opératoire

Introduire 5 ml d'eau dans une capsule de 60 ml (pour des teneurs en azote nitrique supérieures à 10 mg/l, opérer à une dilution). Alcaliniser faiblement avec la solution d'hydroxyde de sodium. Poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage. Préparer de la même façon un témoin avec 5 ml d'eau déminéralisée. Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde $\lambda = 415$ nm. Se reporter à la courbe d'étalonnage.

V.8.7. Nitrites (NO_2^-) par la méthode spectrométrie d'absorption moléculaire

a. Principe

La diazotation de l' amino-4-benzènesulfonamide par les nitrites en milieu acide et sa copulation avec le dichlorure de *N*-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane donne un complexe coloré pourpre susceptible d'un dosage spectrométrique (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs

- Acide ortho phosphorique ;
- Réactif de diazotation ;
- Solution mère étalon d'azote nitreux (NO_2) à 100 mg/l ;
- Solution fille étalon d'azote nitreux (NO_2) à 1 mg/l.

c. Mode opératoire

Introduire 5 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée puis poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage. Tenir compte de la valeur lue pour le témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage pour déterminer la concentration.

V.8.8. Bicarbonate (HCO_3^-) alcalinité par la méthode titrimétrique de dosage du TA et TAC

a. Principe

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré (Rodier et al., 2009).

b. Réactifs

- Acide chlorhydrique ou sulfurique 0,02 N ;
- Solution de phénolphtaléine dans l'alcool à 0,5 % ;
- Solution de méthyle orange ;
- Eau déminéralisée.

c. Mode opératoire

➤ Détermination du TA (titre alcalimétrique)

A 5 ml d'eau à analyser, ajouter 1 à 2 gouttes de solution alcoolique de phénol phtaléine. L'absence d'une coloration rose indique que le TA est nul, ($\text{pH} < 8,3$). Verser ensuite avec précaution quelques gouttes d'acide dans la fiole à l'aide d'une burette, en agitant constamment, et ceci jusqu'à décoloration complète (Photo 14) de la solution $\text{pH} 8,3$ et obtention de la couleur jaune.

➤ Détermination du TAC (Titre alcalimétrique complet)

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution de méthyle orange et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'au virage du jaune au jaune orangé ($\text{pH} = 4,3$). Le volume d'acide 0,02 N versé depuis le début du dosage (Photo 14) :



Photo 14 : Titration d'alcalinité des deux sources.

Un volume de 17 à 19 (0,9 ml) goutte de Hcl est nécessaire pour l'échantillon d'eau de la source Djaarir, et 54 à 57 gouttes (2,7-2,9 ml) de Hcl pour l'eau de la source Tamersit. Uniquement 3 à 4 gouttes (0,2 ml) de Hcl pour le témoin.

Chapitre VI :

Résultats et discussion

Introduction

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques dans les eaux. Pour cela l'hydrochimie se sert essentiellement de la chimie (thermodynamique, acides-bases, précipitations-dissolutions, oxydation-réduction, interactions entre différentes phases, etc.), mais aussi de la biologie et de la géologie. Elle met en place des modèles propres tels les modèles de la dissolution du dioxyde de carbone, la précipitation et la dissolution des minéraux (oxydes, dioxydes, carbonates, etc.), la spéciation des métaux, les interactions solides-liquides. Son étude permet de connaître les faciès chimiques des eaux, leur qualité de potabilité, suivre l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et déterminer leurs origines géologiques. Elle est liée à la nature lithologique du terrain traversé, au climat et à l'activité anthropique. Ce qui permet de comparer les eaux entre elles et d'interpréter les données d'analyses par des diagrammes.

Pour cela, nous avons sélectionné deux points d'eau :

- la source de Djaarir, localisée à la commune de Bouhmama et ;
- la source de Tamersit, située à la commune de Kheirane (C.F. Chapitre V, Figure 30).

VI.1. Etude des paramètres physico-chimiques

VI.1.1. Paramètres physiques

VI.1.1.1. Température

Les mesures de la température montrent que l'eau de la source de Djaarir est plus chaude que celle de la source de Tamersit avec respectivement (32 °C) pour la première source et (25 °C) pour la seconde. Ceci nous permet de les classer selon Main (2001) en eaux mésothermales.

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision, car elle joue un rôle dans la solubilité des sels, donc la conductivité électrique et la détermination du pH et surtout des gaz dissous. Ce paramètre sert également à la connaissance de l'origine de l'eau (Rodier et al., 2005).

Ceci nous permet d'avancer que la température de l'eau de la source Djaarir provient des profondeurs du sol, par contre, celle de la source Tamersit coule dans des couches plus superficielles (figure 39). Cette température enregistrée dans les deux sources permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, jouant un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz.

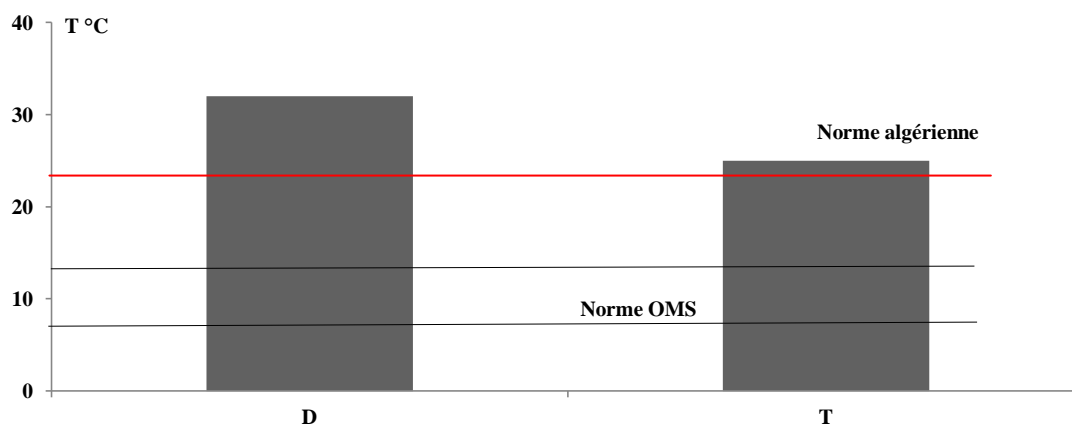


Figure 39 : Température des deux sources (D pour Djaarir et T pour Tamersit).

Selon Lambert (1996), la température de l'eau est influencée par la température moyenne annuelle de l'air au point d'émergence mais, les sources thermales ont leur température nettement supérieure à la température moyenne annuelle.

VI.1.1.2. Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le principal déterminant du pH, est la dissociation des molécules d'eau en H^+ et OH^- (Cano et al., 2006). Le pH des deux sources est voisin de la neutralité avec un pH 7,36 pour la source de Djaarir et pH 7,52 pour celle de Tamersit (Figure 40). Ces valeurs témoignent de la variation de la concentration en CO_2 atmosphérique dissous dans l'eau et aussi sa diffusion.

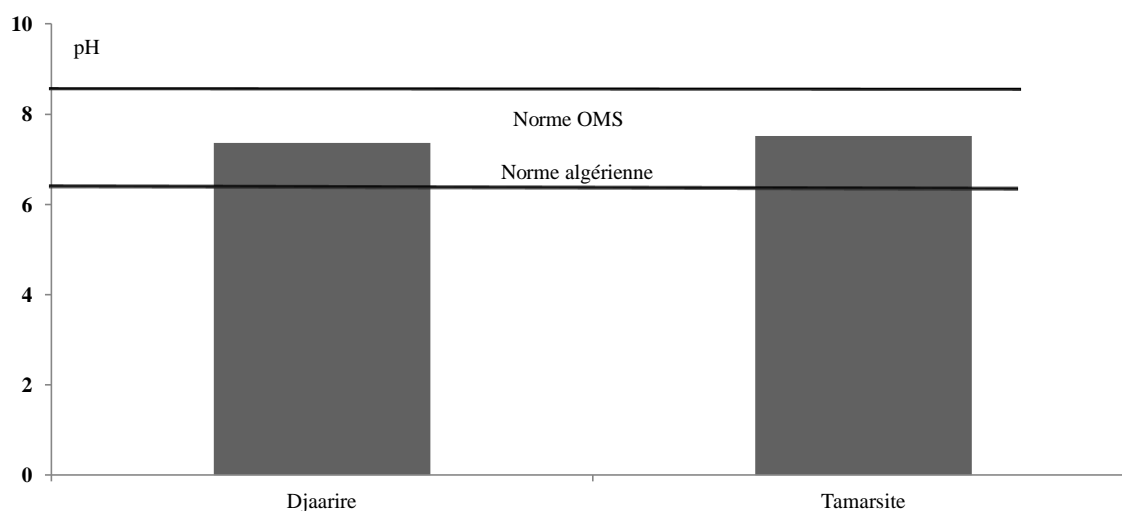


Figure 40 : Comparaison entre le pH des deux sources.

Selon Allgayer et Gireg (2007), le pH varie de 0 à 14 ; un pH de 0 représente un maximum d'acidité, un pH 14 signifie un maximum de basicité (alcalinité), et le pH 7 correspond à la

neutralité. La valeur du pH de l'eau est déterminante pour la survie de la faune et la flore de l'eau. Les directives de l'OMS conseillent, pour l'eau destinée à la consommation humaine, un pH compris entre 6,5 et 8,5. On note que les valeurs de pH mesurées sont situées dans la gamme des valeurs guides de l'OMS comme le montre la figure 40.

VI.1.1.3. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique dans les normes algérienne est de l'ordre de $2800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La source de Tamersit obéit largement avec sa conductivité de $2680 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, tandis que celle de Djaarir ($7230 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) est très loin d'être dans les normes ce qui en fait une eau non salubre et interdite à la consommation humaine.

La conductivité électrique est liée à la présence d'ions en solution. Elle augmente avec la température et la concentration en sels dissous. L'OMS conseille, pour une eau destinée à la consommation humaine, une conductivité électrique pouvant atteindre la valeur de $2500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. On note que les valeurs de la conductivité électrique mesurée sont situées au dessus des valeurs maximales de l'OMS (figure 41). Ces valeurs de la conductivité indiquent une minéralisation très élevée des deux sources.

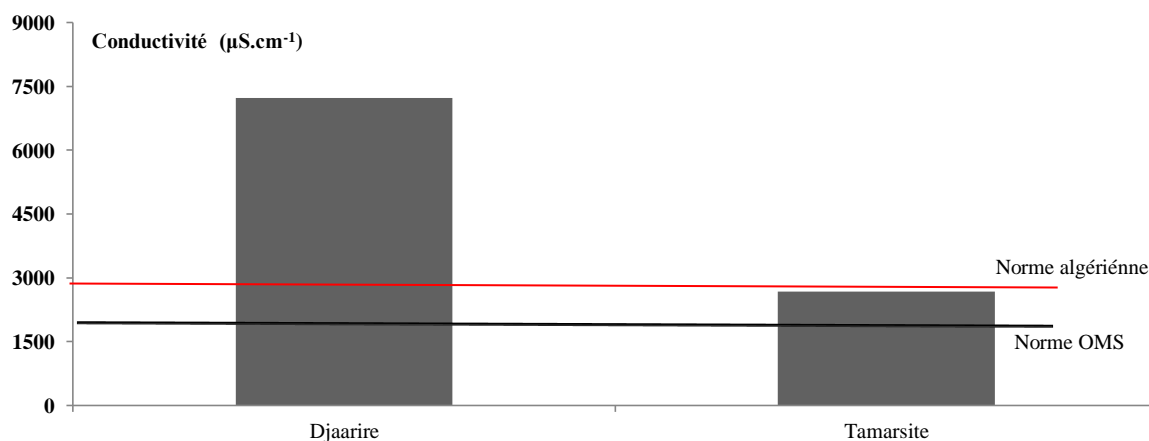


Figure 41 : Comparaison des conductivités électrique.

Les valeurs mesurées de la conductivité indiquent une minéralisation très élevée car elles sont supérieures à $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ et que les eaux thermales de Khenchela auraient traversé des terrains triasiques gypso-salifères. Ces constatations corroborent avec la géologie de la région d'étude.

VI.1.1.4. Salinité

La salinité représente le contenu en sels dissous d'une eau (Aminot et Kéroul, 2004).

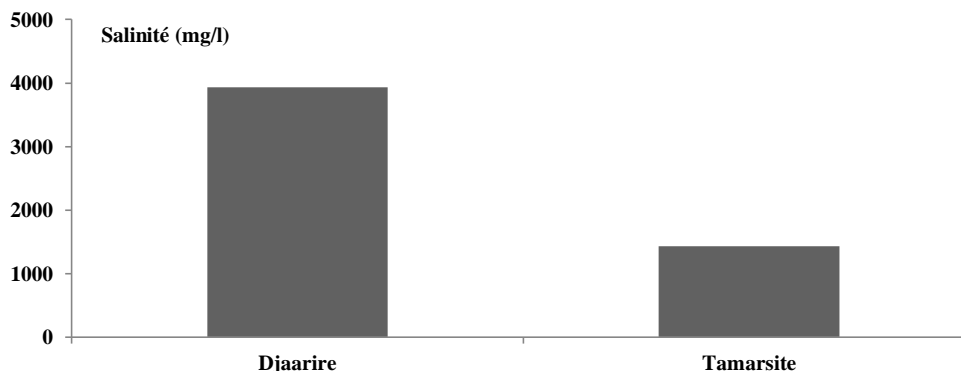


Figure 42 : Comparaison de la salinité.

Les deux sources sont à une salinité très élevée, 3930 mg/l pour Djaarir et 1430 mg/l pour Tamersit. Ce qui traduit l'effet de la température dans la dissolution des sels ou le temps de séjour élevé (figure 42).

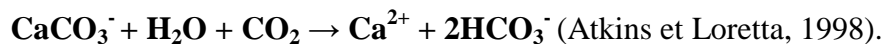
VI.1.2. Paramètres chimiques

VI.1.2.1. Cations

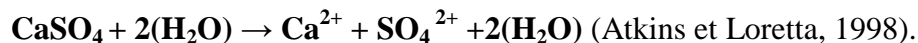
VI.1.2.1.1. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est un métal alcalino terreux extrêmement répandu dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés (Rodier et al., 2005). La présence des ions de Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles :

- Soit la dissolution des formations carbonatées :



- Soit par la dissolution des formations gypseuses :



Les résultats des teneurs en Calcium calculées dans les eaux des deux sources diffèrent d'une source à l'autre. L'eau de Tamersit est au dessous des normes de l'OMS (56 mg/l) par contre, la teneur en calcium à Djaarir se situe à environ 244 mg/l (figure 43).

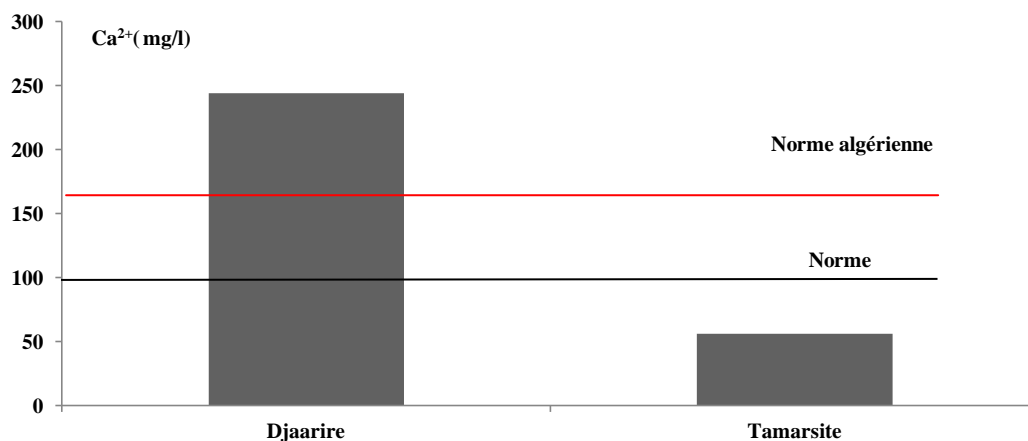


Figure 43 : Les concentrations en Ca²⁺.

VI.1.2.1.2. Magnésium (Mg²⁺)

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature ; il constitue environ 2,1% de l'écorce terrestre. Sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (calcaires dolomitiques, dolomies du jurassique ou du trias moyen). Les valeurs les plus faibles sont relevées dans la plupart des eaux des massifs anciens (Rodier et al., 2005).

Les ions Mg²⁺ proviennent de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium telle que la magnésite et la dolomite, selon les réactions suivantes :

- Magnésite: $\text{MgCO}_3 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$.
- Dolomite: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$ (Sterry Hunt, 1867).

La teneur en magnésium pour la source de Tamersit est au dessous des normes OMS, mais celle de la source Djaarir est très élevée et atteignant une concentration de 243 mg/l (fig. 44). Ces résultats laissent supposer que les apports en magnésium proviennent de la dissolution des formations évaporitiques, et prouvent une nouvelle fois que ces eaux sont insalubres.

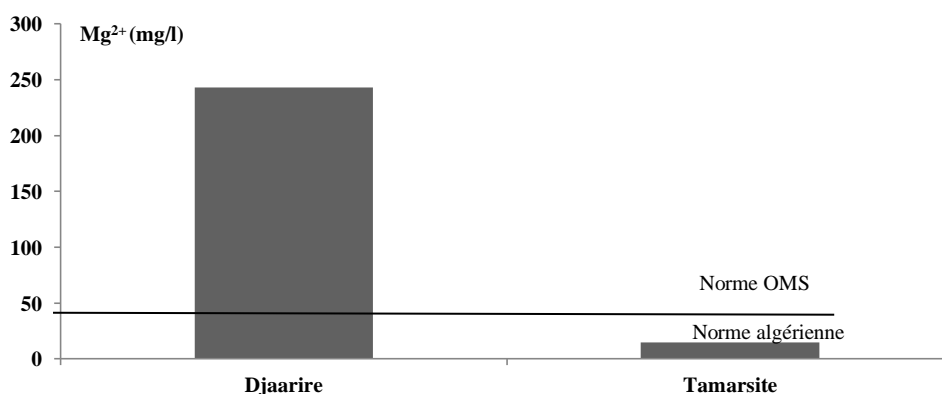


Figure 44 : Les concentrations en ions Mg²⁺.

VI.1.2.1.3. Sodium (Na^{2+})

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

Dans le cas de la source Tamersit, la valeur de Na^{2+} (179 mg/l) est inférieure à la norme de l'OMS (200 mg/l). Par contre, la source Djaarir dépasse toutes les normes aussi bien la norme OMS que la norme algérienne (250 mg/l) avec une teneur de 840 mg/l (figure 45). Ce qui traduirait l'influence des facteurs climatiques à savoir la sécheresse de la saison et par conséquent, le manque de lessivage des argiles et marnes.

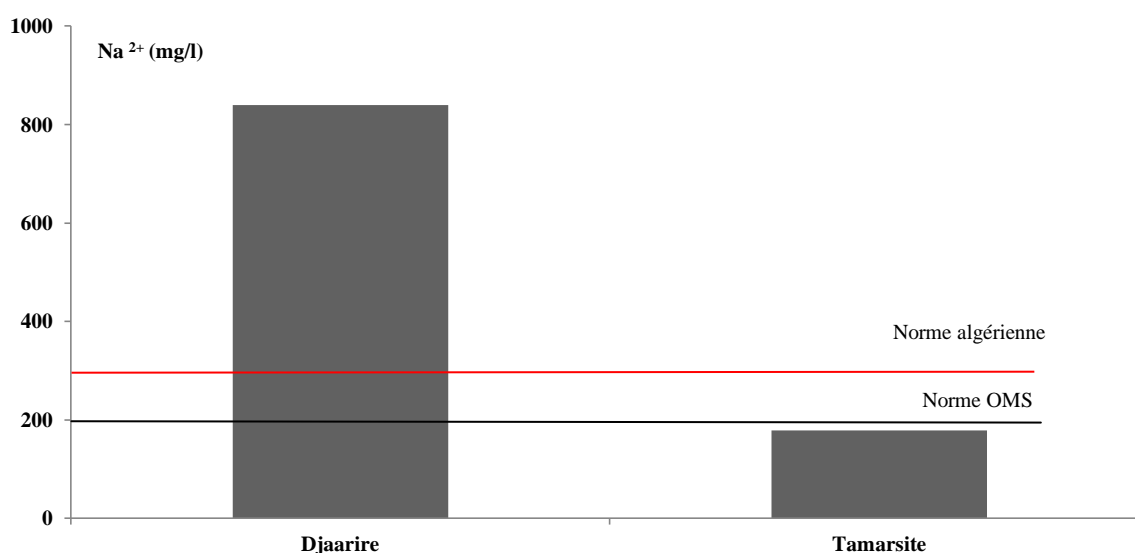


Figure 45 : Les concentrations en ions Na^{2+}

VI.1.2.1.4. Potassium (K^{+})

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

Dans le cas des deux sources étudiées, la concentration représente 4 mg/l pour Tamersit, et 7 mg/l pour Djaarir, les deux sources sont bien plus faibles par rapport aux normes (figure 46). Ce qui pourrait impliquer l'impact de la saison sèche sur le mécanisme de l'altération des argiles potassiques.

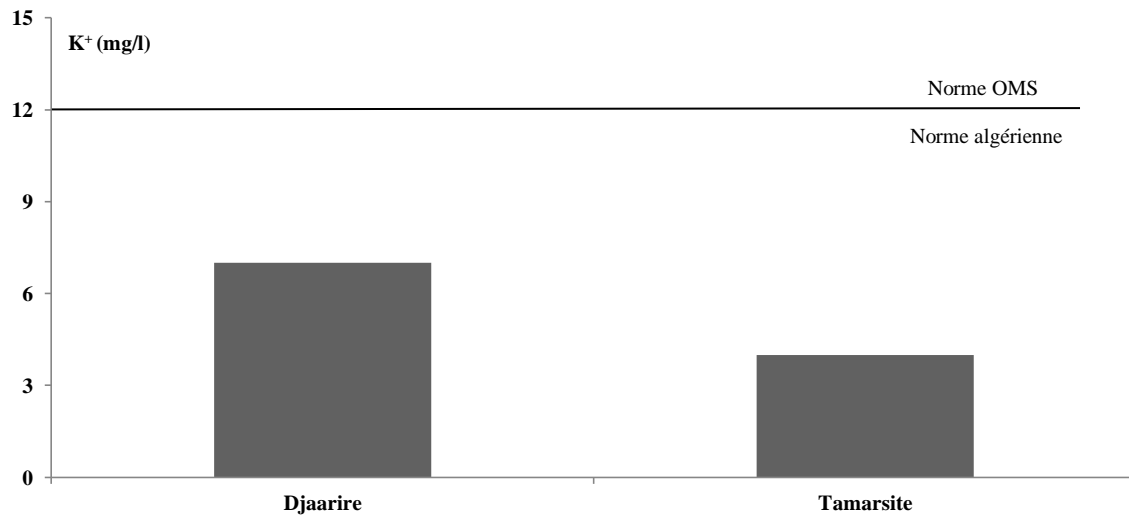


Figure 46 : Les valeurs de K⁺ des deux sources.

VI.1.2.2. Anions

VI.1.2.2.1. Chlorures (Cl⁻)

La valeur mesurée dans l'eau de la source Tamarsit est très faible (14 mg/l), par rapport à la norme OMS (250 mg/l). On peut en déduire l'absence de la pollution anthropique. Pour la source Djaarir la teneur en Cl⁻ est très élevée avec 2100 mg/l (figure 47).

Les teneurs en chlorures des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes exemptes de pollution ont une teneur généralement inférieure à 25 mg/l, mais dans certaines régions, la traversée de marnes salifères peut conduire à des teneurs exceptionnelles de 1000 mg/l. 90 % des eaux superficielles ont une teneur en chlorures inférieure à 100 mg/l (Rodier et al., 2005).

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

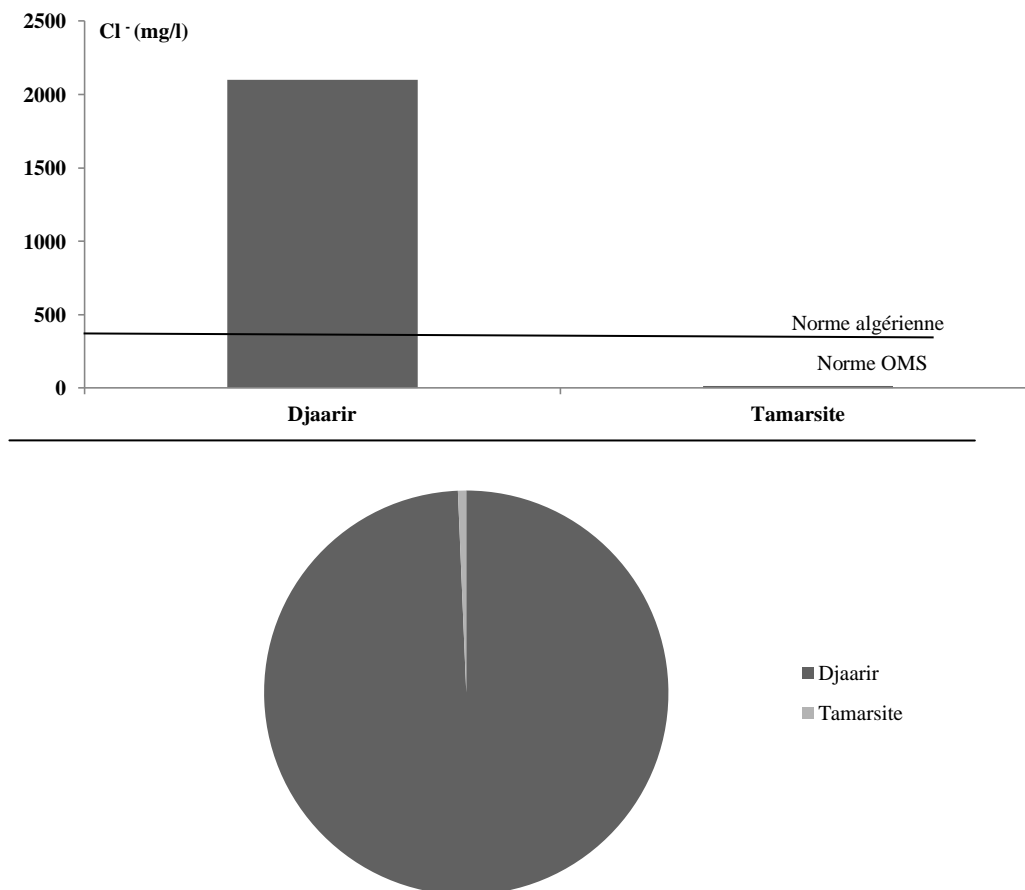


Figure 47 : Variations spatiales des valeurs moyennes en Cl⁻

VI.1.2.2.2. Sulfates (SO₄⁻²)

La concentration en ions sulfates des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfate minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l mais ce chiffre peut être largement dépassé dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé, pouvant atteindre 300 mg/l (Rodier et al., 2005).

Les concentrations mesurées sur les deux sources sont très différentes, dans la source Tamersit la teneur est faible (33,3 mg/l) par rapport aux normes OMS ce qui pourrait traduire l'influence de la saison sèche ou l'absence de la dissolution du gypse, la source Djaarir présente une valeur forte (371 mg/l) par rapport aux OMS, ce qui pourrait traduire la présence de la dissolution du gypse ou le temps de séjour est élevé (figure 48).

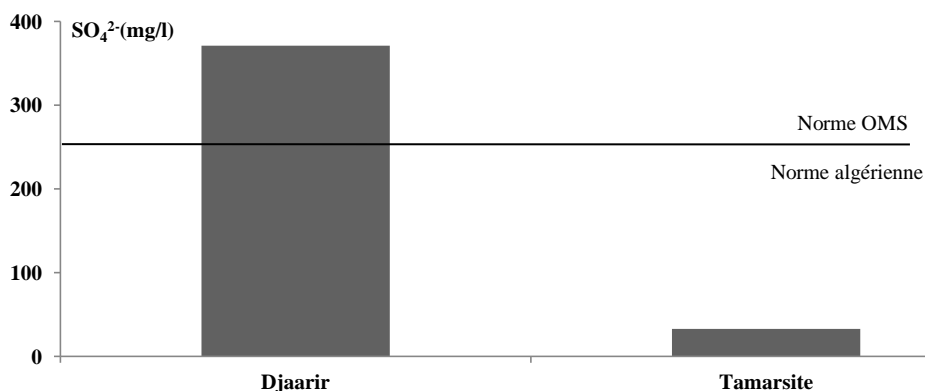
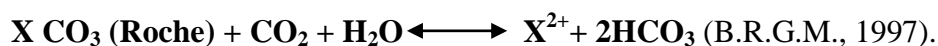


Figure 48 : Les concentrations de SO_4^{2-} des deux sources.

VI.1.2.2.3. Bicarbonates (HCO_3^-)

L'origine des bicarbonates alcalins ou métalliques, contenus dans les eaux est l'acide carbonique, très abondant dans l'intérieur de la terre, et réagit sans cesse avec les matériaux qui composent la croûte solide du globe en se combinant à plusieurs substances de nature diverse de manière à donner naissance aux bicarbonates que les eaux dissolvent et charrient avec elles (Figuier, 1873).

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique atmosphérique, selon l'équation générale suivante :



L'élément (X) peut être le (Ca^{2+}) ou le (Mg^{2+}), il est très probable que ce soit le Calcium car le Magnésium est très soluble, sauf si l'eau est thermale. L'origine principale des carbonates est la dissolution des roches carbonatées et gypsifères du Trias (B.R.G.M., 1997). Les concentrations mesurées pour les deux sources sont très faibles par rapport aux normes OMS (figure 49), ce qui peut être dû à la dissolution des roches calcaires en bicarbonates.

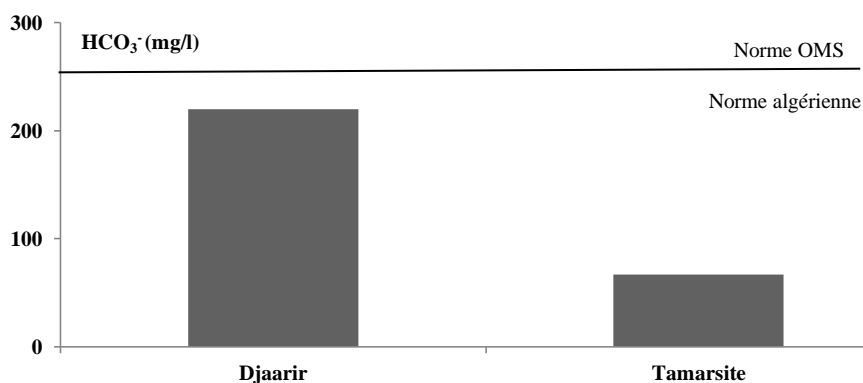


Figure 49 : Concentration de HCO_3^- .

VI.1.2.2.4. Nitrates (NO_3^-)

Toutes les formes d'azote que ce soit organique, ammoniacale, ou nitrite, sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Dans les eaux naturelles non polluées, le taux de nitrates est très variable suivant la saison et l'origine de l'eau (Rodier et al., 2005).

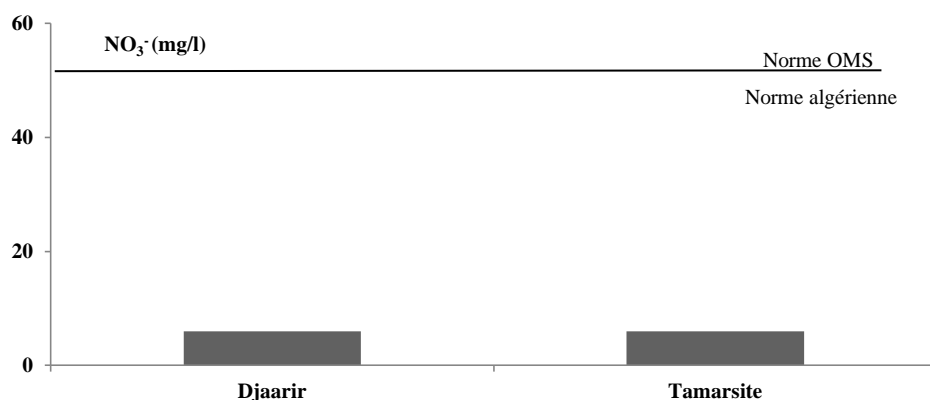


Figure 50 : Concentration de NO_3^- .

Dans ce travail, une concentration en nitrates de 6 mg/l pour les deux sources est enregistrée (fig. 50). Ces teneurs sont acceptables par rapport aux normes OMS et aux normes algérienne qui sont de l'ordre de 50 mg/l.

VI.1.2.2.5. Nitrites (NO_2^-)

Les nitrites sont une forme oxygénée de l'azote, peu stable, qui s'insère dans le cycle de l'azote ammoniacal (NH_4^+) et l'azote nitrique (NO_3^-). La présence de nitrites d'origine naturelle est rare. Une eau renfermant des nitrites peut être considérée comme suspecte voire toxique pour les poissons (Le pimpec et al., 2002). Selon le tableau au dessous les eaux des deux sources sont parfaitement naturelles et exemptes de nitrites.

Tableau 11: Teneurs en nitrites pour les eaux étudiées.

| Point d'eau | Nitrite (mg/l) |
|-------------|----------------|
| Djaarir | 0 |
| Tamersit | 0 |

VI.2. Paramètre organoleptique odeur

Les eaux des deux sources intéressées par ce travail possèdent une odeur nauséabonde rappelant celle du soufre. Selon Detay (1993), les valeurs importantes de la solubilité du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'anhydride sulfureux (H_2S) permettent d'expliquer pourquoi les eaux thermominérales sont souvent pétillantes ou sentent le soufre.

VI.3. Détermination du faciès chimique

Le faciès chimique représente les minéraux, anions et cations, les plus abondants dans l'eau. Pour déterminer le faciès chimique d'une eau, on est appelé à construire les diagrammes de Piper, Schoeller et Stabler. Ces représentations graphiques nous permettent de confirmer la nature chimique de l'eau, son historique et ses origines.

VI.3.1. Diagramme de Piper

D'après la représentation de Piper (figure 51), la source de Djaarir est **chlorurée sodique** alors que la source Tamarsit est **Bicarbonatée sodique**.

Le diagramme de Piper (1944) représente les proportions des ions majeurs dans une eau. La composition de l'eau est représentée dans des diagrammes ternaires, l'un pour les anions et l'autre pour les cations. Les deux diagrammes ternaires sont projetés dans un losange, dans lequel on a défini des aires qui correspondent à chaque type d'eau. Ce diagramme est pratique car il permet de déterminer tout de suite la typologie d'une eau (Atteia, 2015).

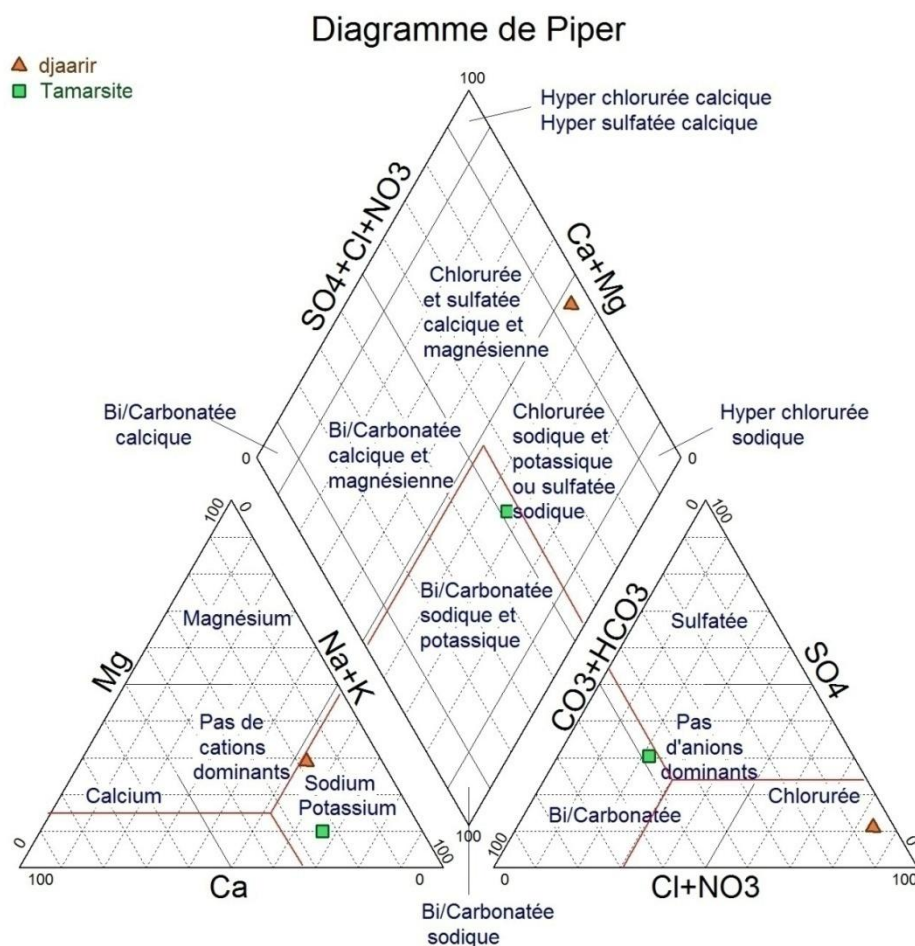


Figure 51 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Piper.

VI.3.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Sur cette représentation nous remarquons que les droites ne s'entrecroisent pas, ce qui renseigne que les eaux sont d'origines différentes. La source Djaarir possède un faciès chimique de type **chloruré sodique** alors que la source Tamarsite est **Bicarbonatée sodique**.

Le diagramme de Schoëller-Berkaloff (1955), est simple dans sa conception, puisque la concentration de chaque ion est représentée par un point sur un axe logarithmique vertical, les ions sont reliés par une ligne qui représente l'échantillon. L'ordre des ions sur l'axe d'abscisses étant défini (Ca, Mg, Na+k, Cl+NO₃, SO₄, HCO₃), la forme de la ligne permet de connaître le type de l'eau (faciès chimique). Le diagramme de Schoëller-Berkaloff présente l'avantage de visualiser de plus la minéralisation de l'échantillon, mais il a l'inconvénient d'être illisible s'il contient plus d'une dizaine d'échantillons (Atteia, 2015).

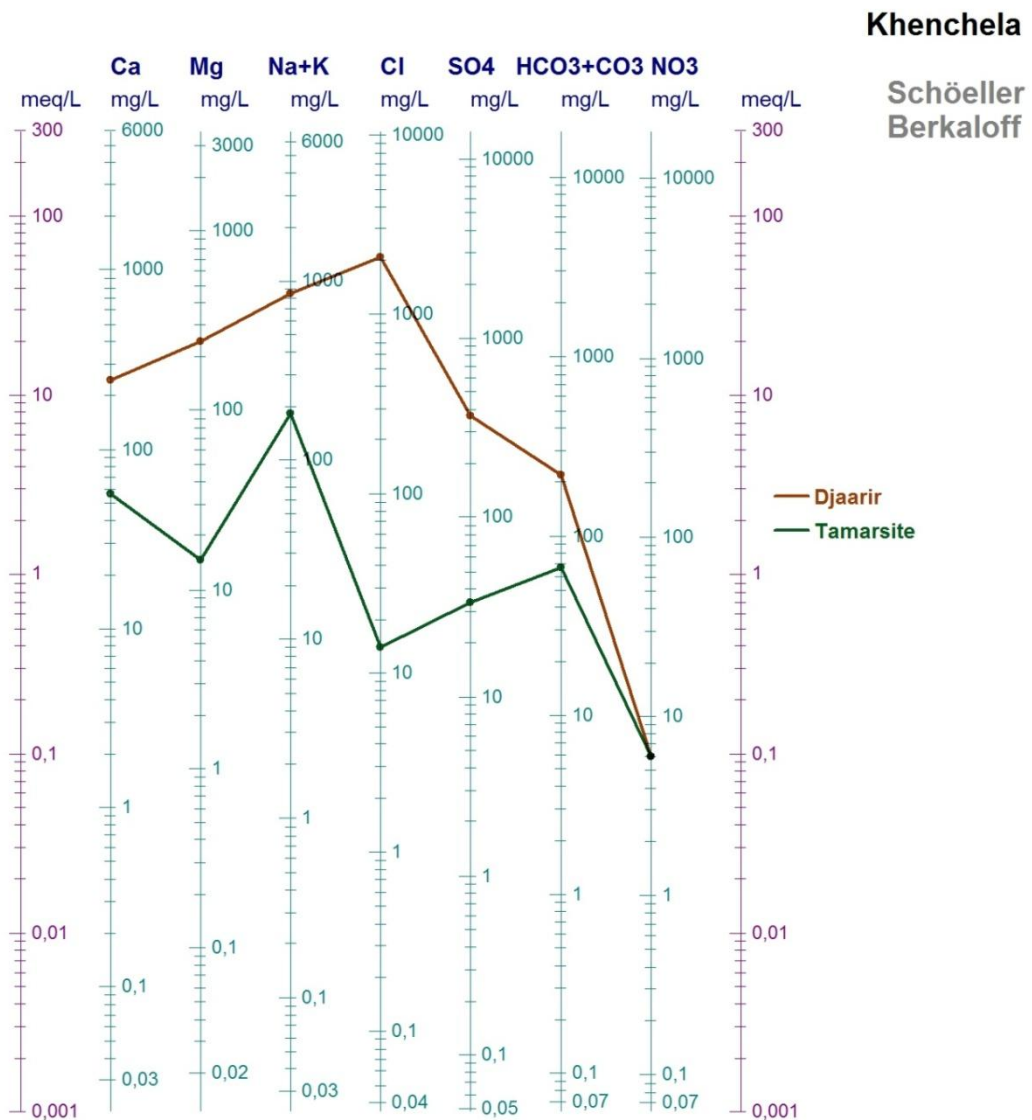


Figure 52 : Représentation des sources sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff.

VI.3.3. Diagramme de Stabler

Ce diagramme donne une représentation très claire des résultats des analyses chimiques. Le sodium est l'élément qui domine sur les cations, pour les deux sources à la fois, Djaarir et Tamarsit. Pour les anions, c'est le chlorure qui domine pour la source de Djaarir, et le bicarbonate pour Tamarsit ce qui confirme que le faciès de la source de Djaarir est chloruré sodique. Tandis que la source de Tamarsite est Bicarbonatée sodique (figure 53).

Stabler

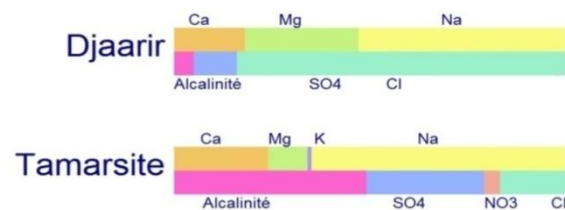


Figure 53 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Stabler.

VI.4. Caractérisation des sources pour l'irrigation

Pour déterminer l'aptitude des eaux à être utilisées pour l'irrigation des cultures, on est appelé à construire les diagrammes de Riverside et Wilcox.

VI.4.1. Qualité des eaux pour l'irrigation selon Riverside

La qualité des eaux pour l'irrigation est estimée sur la base de deux paramètres principaux :

- La conductivité électrique car une trop forte conductivité représente un risque immédiat pour la culture envisagée ;
- Le Sodium Absorption Ratio (SAR) de l'eau, s'il est élevé, le sodium va progressivement saturer la capacité d'échange entre le système racinaire et le sol avec le risque de s'imperméabiliser en particulier s'il est argileux (Legros, 2007).

On détermine le Sodium Absorption Ratio (SAR) par la relation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+}+Mg^{2+}}{2}}} \text{ (McCarty et al., 2003). Où :}$$

Na : Concentration de l'eau en ions sodium (méq/l) ;

Ca : Concentration de l'eau en ions calcium (méq/l) ;

Mg : Concentration de l'eau en ions magnésium (méq/l) (McCarty et al., 2003).

Tableau 12 : directive pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (FAO, 1976)

| Nature de problème | unité | Guide pour la qualité de l'eau | | |
|--------------------|-------|--------------------------------|----------------------|------------------|
| | | Pas de problème | Problèmes croissants | Problèmes graves |
| Conductivité | mS/cm | < 0,75 | 0,75 – 3,0 | > 3 |
| SAR | / | < 6 | 6,0 - 9 | > 9 |
| Sodium | méq/l | < 3 | 3-9 | > 9 |
| Chlore | | < 4 | 4,0-9 | > 10 |
| Azote | mg/l | < 5 | 5,0-30 | > 30 |
| Bicarbonate | méq/l | < 1,5 | 1,5-8,5 | > 8,5 |
| pH | / | < 6,5 | 6,5-8,4 | > 8,4 |

Application numérique

Pour la source de Djaarir :

$$SAR = 9,11$$

Pour la source de Tamersit :

$$SAR = 5,52.$$

Selon les directives de la F.A.O (Tableau 12), pour la source Djaarir, le SAR est supérieur à 9, ce qui exprime que son eau est inutilisable pour l'irrigation tandis que, pour la source de Tamersit, le SAR est inférieur à 6, ce qui traduit qu'on peut utiliser ses eaux pour l'irrigation des cultures (Figure 54).

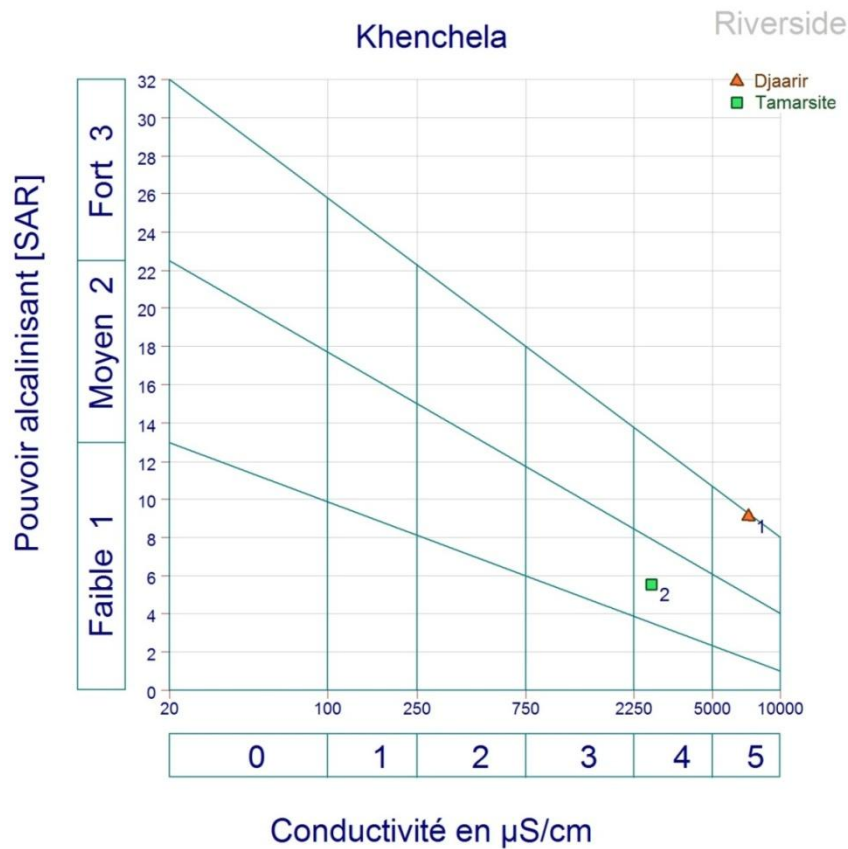


Figure 54 : Représentation des deux sources sur le diagramme de Riverside.

VI.4.2. Qualité des eaux pour l'irrigation selon Wilcox

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

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

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

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

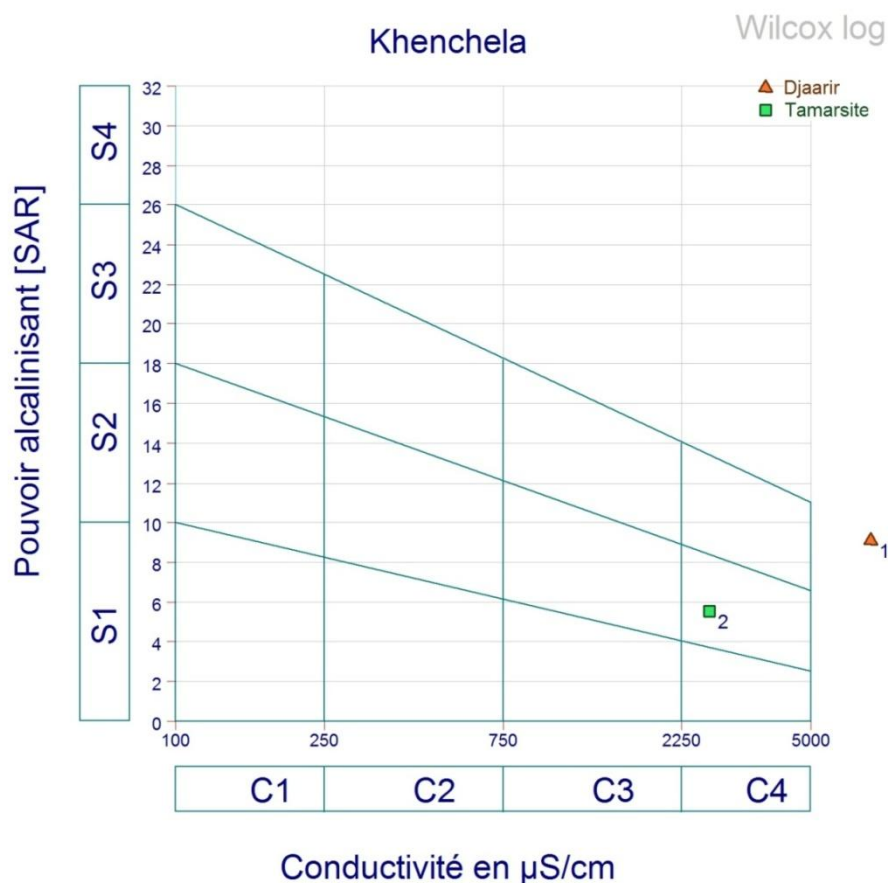
Où tous les ions sont exprimés en $\text{m}\mu\text{g/l}$.

Tableau 13 : Classification des eaux à l'irrigation selon Wilcox.

| Les classes | La qualité des eaux pour l'irrigation |
|-------------|---|
| C1S1 | excellente |
| C1S2 | |
| C1S3 | |
| C2S | Bonne |
| C2S2 | |
| C2S3 | |
| C3S1 | Admissibles |
| C3S2 | |
| C3S3 | (fortement minéralisées) ; la source Tamersit |
| C4S1 | |
| C4S2 | |
| C4S3 | |

Les eaux de la source de Djaarir ne sont localisées dans aucune des zones du diagramme de Wilcox, donc elles sont hors normes et mauvaises pour l'irrigation (Figure 55).

La source Tamersit est localisée dans la zone (C4S2), ce qui exprime que les eaux de cette dernière sont médiocres, fortement minéralisées ; ne pouvant être utilisées que pour des plantes supportant des teneurs élevées en sels (halophytes) (tableau 13).

**Figure 55** : Représentation des deux sources sur le diagramme de Wilcox.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Cette étude est une caractérisation des eaux de deux sources, la source Djaarir et celle de Tamarsite.

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

La source Tamarsit est une source thermale naturelle localisée à la commune de Kheirane à environ 50 Km au sud de la commune de Bouhmama ; à une altitude de 737 m, caractérisée par une géologie Turonienne.

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

Le climat de Khenchela s'intègre parfaitement dans le climat des hautes plaines constantinoises et des Aurès. Il est méditerranéen, semi-aride, au voisinage de l'aride. Deux saisons distinctes sont obtenues :

- Une saison peu pluvieuse froide allant du mois de novembre jusqu'au mois de mars ;
- Une saison sèche chaude qui va du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre.

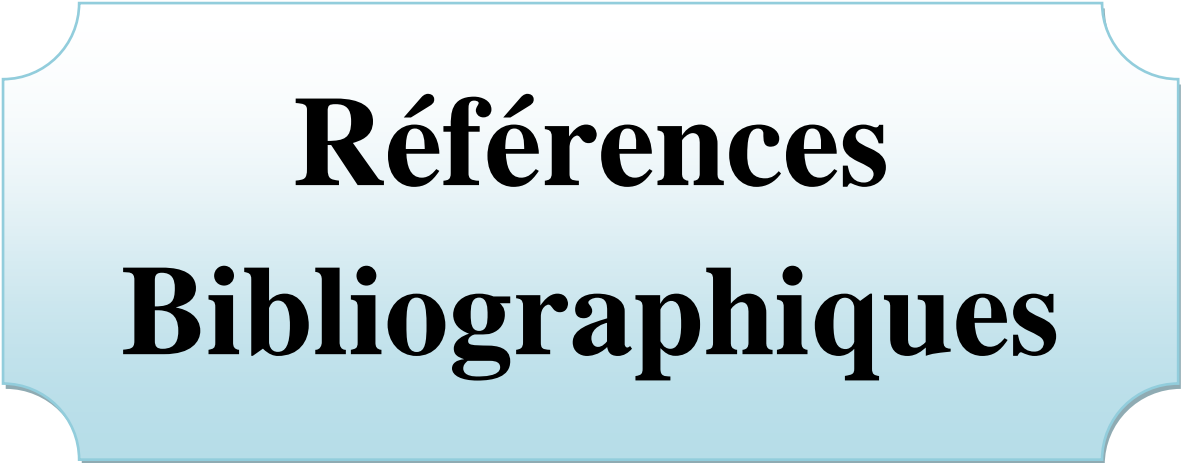
Du point de vue physico-chimique et hydro chimique, les différentes teneurs mesurées et observées pour chaque paramètre étudié, au niveau des deux sources en comparaison avec les normes OMS, et avec l'interprétation des différents diagrammes (Piper, Stabler, Schoeller-Berkaloff, Wilcox et Riverside)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

- D'après la représentation des résultats sur les diagrammes de Piper et de Stabler, les deux sources possèdent des faciès chimiques différents. Le faciès est Bicarbonaté sodique pour la source de Tamarsite alors qu'il est Chlorurée sodique pour la source Djaarir ;
- D'après le diagramme du Schoeller-Berkaloff, on pourrait avancer que les deux sources possèdent une origine différente puisque les deux lignes de représentation des deux sources n'ont pas une même évolution ni de points d'intersection;

Conclusion et perspectives

- Tandis que pour les classifications de Wilcox et de Riverside, qui sont utilisées pour estimer si les eaux de ces deux sources peuvent être utilisées pour l'irrigation, on a pu constater que les résultats caractérisant la source Tamarsite a une médiocre qualité pour l'irrigation et la source Djaarir à une mauvaise qualité, on ne peut pas l'utiliser pour l'irrigation.

Enfin et d'après tous les résultats affichés, on peut dire que la qualité des eaux des sources Djaarir et Tamarsite ne peuvent pas être destinées à la consommation humaine, on peut utiliser les eaux de Tamersit pour l'irrigation mais pas les eaux de la source Djaarir. Elles peuvent être utilisées uniquement pour la baignade.



**Références
Bibliographiques**

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

Aghrab A., (2005). Une méthodologie pour caractériser le climat et la sécheresse dans une région. Ed. Le Munuscrit. p : 14-24.

Aminot A., Kérouel R., (2004). Hydrologie des écosystèmes marins. Ed. Ifremer. p : 41-64.

Anctil F., Rousselle J., Lauzon N., (2012). Hydrogéologie. 2^{ème} Ed. Presses internationales polytechnique. p : 1-24.

Atkins P., Loretta J., (1998). Chimie : molécules, matières, métamorphoses. 3^{ème} Ed. Boeck. 998 p.

Attea O., (2015). Chimie et pollution des eaux souterraines. Ed. Lavoisier. 421 p.

Auby. J.F., (1997). Les eaux minérales : collection que-sais-je Ed. Presse universitaire de France. 127 p.

Auzias D., Labourdette J.P., Costaz A., Brutinot L., (2011). Remise en forme 2011 (santé magazine). Ed. Imprimerie Chirat. p : 3-29.

Auzias D., Tognarelli I., Raymond M., Labourdette J.P., (2012). France–bio. 311 p.

Avenard J.M., Eldin M., Guyot G., Sircoulon J., Touchebeuf P., Guillaunt J. L., Adjanolound E., Perrand A., (1971). Le milieu naturel de la cote d'ivoire. Ed. ORSTOM. p : 88-94.

Ayers R.S., Westcot D.W., (1976). La qualité de l'eau en agriculture. Rapport F.A.O N° 29 Rome. 81 p.

B

B.R.G.M., (1997). Les eaux minérales et le gaz carbonique. Note technique N° 10 France. 19 P.

Bauer W.J., Badound R., Loliger J., Etournand A., (2010). Sciences et technologies des aliments. 1^{ère} Ed. Presses polytechniques et universitaires Romandes. P : 1 - 44.

Bessemoulin P., Carrega P., Dubreuil V., Joly D., Laborde J.P., Roussel I., (2008). Information géographique et climatologie. Ed. Lavoisier. 239 p.

Références bibliographiques

Bistillo V., (2005). Biogéochimie et hydroclimatologie appliquées à l'aménagement des bassins fluviaux modèles de mélange diagnostique et prévision, thèse de doctorat N° d'ordre 2229 Université de Toulouse. 232 p.

Boubelli S., (2009). Identification et mise en évidence les formations hydrogéologique de la wilaya de khenchela (nord-est algérien). Magister. Université Badji Mokhtar Annaba. p : 4 - 24.

Boulicot M.C., Desloges S., Leroux L., Moise B., Rambant M., (2006). Les services en milieu rurale et les besoins des usages. Ed. Educagri. p : 160-167.

C

C.F., (2016). Presentation general de la wilaya de khenchela. 2 p.

Cano N., Barnound D., Scheidre S., Vasson M.P., Hasselmann M., Leverve X., (2006). Traité de nutrition artificielle de l'adulte. Ed. Springer shop. 1189 p.

Cissé O., (2012). Les décharges d'ordures en Afrique. Ed. Karthala. 373 p.

D

D.E., (2016)., Présentation de la zone d'accueil. 15 p.

Degrémont, (2005). Mémento technique de l'eau 10^{ème} Ed. Tome 1. Degrémont SUEZ, 2503 p.

Delarras C., Trébaol B., Durand J., (2010). Surveillance sanitaire et microbiologique des eaux. 2^{ème} Ed. Lavoisier. p : 14 -19.

D.P.A.T., (2012). Situation administrative de la wilaya de Khenchela.10 p.

D.P.A.T., (2016). Situation administrative de la wilaya de Khenchela. 10 p.

D.S.P., (2016). Les cartes de la wilaya de Khenchela. 18 p.

Druon E., (2012). Ecolonomies entreprendre et produire autrement. Ed. Pearson. 211 p.

E

Enckell M., Badertscher E., Chenal R., Corthay A., Cottier J.M., Kolb G., Lehmann P., Marthaler F., Morel N., Nissim C., Rosselet A., Claude A., Steiner M., Van singer C., (1997). L'énergie au futur. Ed. Bas. p : 157- 227.

Références bibliographiques

F

- F.A.O., (1971). Les eaux souterraines le séminaire de grenade. Ed. Rome. 290 p.
- F.A.O., (1988). Culture protégées en climat méditerranéen. Ed. Rome. p : 106-145.
- Figuier L., (1873). Les merveilles de l'industrie. Ed. Paris. 693 p.
- Flammarion C., (1872). L'atmosphère description des grands phénomènes de la nature. p : 610 - 624.

G

- Gausсен C., Rognon P., (1995). Désertification et aménagement au Maghreb. Ed. L'Harmattan. p : 21-38.
- Gautier C., Fellous J.L., (2008). Eau, Pétrole, Climat ; un monde en panne sèche. Ed. Odile Jacob. 323 p.
- Gicquel R., Gicquel M., (2013). Introduction aux problèmes énergétiques globaux. 2^{ème} Ed. Presses des mines. 40 p.
- Gilli E., Mangan C., Mudry J., (2012). Hydrogéologie. 3^{ème} Ed. Lavoisier. p : 84- 88.
- Guérit G., (2007). Magazine faire faire. p : 8-15.
- Guyot G., (1999). Climatologie de l'environnement. 2^{ème} Ed. Dunod. pp : 106-165, 287-340, 345-459.
- Gwenaelle D.P., Bertin J., De Gérando B., Hannedouche B., Deveza Barrau A.H., (2011), Bâtiments et performance énergétique. Ed. Lamy. 276 p.

H

- Hermann C.J.J., (2004). Les eaux souterraines. Ed. Des sciences et des arts, pp : 8, 31,37.
- Hours D., (2012). Société française de médecine thermale. Disponible sur :
- Hufty A., (2001). Introduction à la climatologie. Ed. Padié. pp : 113-125, 353-385.
- Hugh S., (2005). Répercussion environnementales de l'utilisation d'azote en agriculture. (Disponible sur : (<http://www.omafr.gov.on.ca/french/engineer/facts/05-074.htm>.)

K

Références bibliographiques

Kergreis A., Clande J., (1991). Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. Jhon Libbey eurotext. 345 p.

L

Lambert R., (1996). Géographie du cycle de l'eau. Ed. Presses universitaires du mirail. pp : 32-36, 50-60.

Lalaounna M., Merdaci I., (2012). Etude comparative des eaux naturelles de deux sources. Ain Sfa et Ain Karma. Mémoire master. Université de Khenchela. 80 p.

Le pimpec D., Liénard A., Bonnard R., Lafont M., Cazin B., Boussard P., Hubert B., Bray M., (2002). Guide pratique de l'agent préleveur chargé de la police des milieux aquatiques. Ed. Maurice Merlin. p : 75-86.

Lecoq H., (1839). Recherche sur les eaux thermales. Ed. Imprimerie de Perol. p : 3 - 29.

Legros J.P., (2007). Les grands sols du monde. Ed. Romandes. p : 95-131.

Luyckx E., (2004). L'énergie expliquée aux enfats. Ed. Edipro. p : 35-43.

Lydie S., (2015). Les végétations : les relations avec leur environnement. Ed. Quae. p : 12-26.

M

M'hirit O., Benzyeme M.B., Benchakroun F., Elyousfi S.M., Bendaanoun M., (1998). L'Arganier. Ed. Mardaga. p : 25-43.

Main P., (2001). Eaux thermales. Magazine H₂O.

Malgoire P., Héteu T., (2004). Les certificats verts et l'électricité renouvelable. Ed. Presses universitaires de Louvain. p : 9-12.

Mathis P., (2014). L'énergie, moteur de progrès. Ed. Quae. p : 53-106.

Mccarty L.B., Rodriguez B., Todd Bunnelle B., Clint Waltz F., (2003). Fundamentals of turfgrass and agriculture chemistry. Ed. Jhon Wiley fnd sons. p : 72-125.

Mercier D., (2001). Le ruissellement au Spitsberg. Ed. Presses universitaires Blaise Pascal. p : 43-89.

Moret L., (1946). Les sources thermominérales Hydrologie géochimie biologie. Ed. Abe books. 146 p.

N

Références bibliographiques

Nifenecker H., (2012). Elément pour une politique raisonnée de l'énergie. Ed. Save the climate. 172 p.

O

O. N .M. S. K., (2016). Données climatiques de la wilaya de Khenchela. 50 p.

O.E.C.D., (2007). Etude de l'OCDE commerciale produits énergétiques et écologique. Ed. OCDE. p : 81-125.

Olivier A., (2015). Chimie et pollutions des eaux souterraines. Ed. Lavoisier. p : 3-15.

Olivier W., Dufraisse A., Pétrequim P., (2008). Sel, eau et foret d'hier à aujourd'hui. Ed. Presses universitaires de franche-comté. 573p.

Ouali S., (2008). Division Energie Solaire thermique et géothermie. Bulletin 013-10. p : 16-18.

Ouli S., Khellaf A., Baddari K., (2006). Etude géothermique du sud de l'Algérie. Article. Revue des énergies renouvelables vol 9 N° (2006) 297-306. 306 p.

P

Péguy C.P., (1970). Précis de climatologie. 2^{ème} Ed. Masson & C^{ie}. 468 p.

Penez J., (1994). Dans la fièvre thermique. Ed. Institut d'étude du massif central. 365 p.

Q

Quevauviller P., (2010). Protection des eaux souterraines « législation européenne et avancées scientifique ». Ed. Lavoisier. p : 1-8.

R

Ramade F., (2002). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. 2^{ème} Ed. Dunod. 534 p.

Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L., (2005). L'analyse de l'eau. 8^{ème} Ed. Dunod. 1383 p.

Rodier J., Logude B., Ecoll M., (2009). Analyse de l'eau. 9^{ème} Ed. Dunod. 1511 p.

S

Santé pratique, (2010). Prévention des maladies et des accidents (Santé magazine). 1^{ère} Ed. Chemins de traverse. Section 4.

Sallot J.M., De pery P., Lachat B., Grangirard V., (2006). Etudes d'impact sur l'environnement. 2^{ème} Ed. Revie augmentée. p : 191-240.

Références bibliographiques

Sarlos G., Haldi P.A., Verstraete P., (2003). Système énergétiques : offre et demande d'énergie. Ed. Presses polytechniques et universitaires Romandes. 875 p.

Sterry Hunt M.T., (1867). Compte rendu des hebdomadaires des séances de l'académie de la science Paris. Volume 4. 1363 p.

T

Tréherne J., (2009). Disponible sur : (<http://www.eauxdesources.org/definition-d-une-eau-de-source-c28-p51.html>)

Tron G., Isbérie C., Chol P., (2013). La tensiométrie pour piloter les irrigations. 2^{ème} Ed. Educagri. 248 p.

U

Urban L., Urban I., (2010). La production sous serre tom 1. 2^{ème} Ed. Lavoisier. p : 181-248.

V

Van Haasteren J.A., (1993). Pesticides et eau souterraine. Ed. Conseil de l'Europe. p : 5-14. (www.socmedthermale.org/app/.../B_2_CrenobalneoForestier.pdf. Consulté le 15/02/2016).

W

Wehner R., Gehring W., (1995). Biologie et physiologie animales. 23^{ème} Ed. Allmande p : 514-545.

| | |
|--|---------------------------|
| Présenté par : HAMADOU Soltana DJEHAICHE Manel | Soutenu le : 12 Juin 2016 |
|--|---------------------------|

Diplôme : Master académique en écologie et environnement
Option : Ecologie et Environnement

Thème : Etude comparative de deux sources thermales : la source Djaarir et la source Tamersit

Résumé

La wilaya de Khenchela, située à l'Est de l'Algérie, est l'une des Wilayas qui souffre d'une forte demande des ressources en eau dans ses différentes localités, en raison de l'importance de cette matière vivante. Le choix de ce sujet consiste à déterminer les caractéristiques physico-chimiques des deux sources thermales fortement utilisées par la population de la wilaya et par les autres wilayas pour la baignade. La première est la source thermale de Djaarir, située dans la commune de Bouhmama et la seconde source de Tamersit, située à la commune de Kheirane. Après quelques visites de la zone d'étude, nous avons effectué des prélèvements à analyser. Les données climatiques rassemblent températures, précipitations, ETR (évapotranspiration réelle), ETP (évapotranspiration potentielle), et déficit agricole sont effectuées pour déterminer l'équilibre hydrique. Une recherche spécifique est effectuée pour déterminer les différentes formations géologiques de la zone comprenant les deux sources. L'hydrochimie a permis de faire une classification de l'eau en utilisant les diagrammes de Piper, Stabler, Schoeler-Berkaloff, Wilcox et Riverside. L'interprétation des différents résultats et des diagrammes réalisés a été faite en les comparant aux normes de l'OMS et celles algériennes. La Configuration du climat et des formations géologiques affectent la qualité des eaux des deux sources qui sont non conformes pour l'usage humaine (potabilité) et pour l'irrigation des terres agricoles excepté pour la source Tamersit. Les populations utilisent les deux sources pour la cure thermique traditionnelle.

Mots clés : Hydrochimie, thermalisme, géologie, irrigation, Djaarir, Tamersit.

Jury de soutenance :

| | | |
|---------------------|--------------------------|--|
| Présidente | : Dr KADI Kenza | M.C.A Université Abbès Laghrour -Khenchela- |
| Promotrice | : DELLAA Yasmina | M.A.A Université Abbès Laghrour -Khenchela- |
| Examinatrice | : HALASSI Ismahan | M.A.A Université Abbès Laghrour -Khenchela- |