الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supèrieur et de la Recherche Scientifique

جـــامعـــة محمد الصديق بن يحيى جـيـــجـــل

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de l'Univers

كليـة عـــلوم الطـبيعـة و الحـــياة
قســـم : علوم الارض و الكون

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Sciences de la Terre et de l'Univers**

Filière: Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

Etude du fonctionnement géochimique des sources thermo-minérales de la wilaya de Guelma(NE, Algérien)

Membres de Jury :

Président: DJORFI Samir
Examinateur: RIHIA Djamel
Encadreur: DROUICHE Abdelmalek

Présenté par :

BELKSIER Med Akram
OUBADI Tarek Aziz

Année Universitaire 2021-2022

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Remerciements

Nous remercions tout d'abord «Allah», le tout puissant de nous avoir données la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail.

À notre encadreur, Monsieur ***DROUICHE Abdelmalek****, nous adressons notre plus profonde reconnaissance pour son bon encadrement et pour les conseils fructueux qu'il n'a cessé de nous prodiguer.*

Nous remercions également les membres de jury, Monsieur ***DJORFI Samir*** *et Monsieur* ***RIHIA Djamel****, pour le grand honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce mémoire.*

Merci à tous nos enseignants, pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve durant toutes ces années d'études.

Dédicace

Premièrement, j'ai remercié «Allah» qui m'a aidé à arriver en cette bonne journée.

Je dédier ce mémoire

A mon chère Papa -Ellah Y rahmou- qui n'a pas eu l'occasion d'être présents à cet événement.

A ma chère Maman pour ça patience avec moi, son amour qui est l'essence de mon parcours et son encouragement tout au long de mes étude.

A mes frères sœurs, Meriem, Ammar, Mohammed, Imane et Dyaa eddine pour leur soutien physique est morale.

A mon binôme Mohammed Akram et à toute sa famille

A tous mes amis et camarade et surtout

Houssam, Abd satar, Mohammed, Aymen, Said, Ishak, Ammar

Tarek Aziz

Dédicace

Je dédier ce mémoire à mes chère parents : mon père (Mohammed) et ma mère (Ihcen) pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements

Et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mes études.

A ma meilleur Soumia A mon frère Salah eddine

A mes grandes père Allah Yrhmhom et mes grandes mère et tout la grande famille.

Med Akrem

Résumé

Les sources thermales sont très répandues sur le territoire de l'Algérie du Nord. Elles sont plus abondantes dans la partie nord-est de l'Algérie. Cette partie est caractérisée par l'abondance des manifestations néotectoniques où ces sources émergent à travers ces accidents tectoniques majeurs.

Dans notre projet de fin d'étude, nous allons étudier le fonctionnement géochimique des sources thermales en relation avec le contexte géologique et les accidentes tectonique. Au totale 09 sources ont été échantillonnés et analysés pour les différents paramètres chimiques.

L'interprétation des analyses chimiques a permis de faire sortir deux types de faciès : sulfaté sodique (H. Debagh) et sulfaté calcique dans les autres sources.

L'utilisation des rapports caractéristiques a fait sortir trois mécanismes géochimiques qui contrôlent la chimie des eaux des sources ; (i) la dissolution des formations évaporitiques, (ii) l'altération des silicates et (iii) les échanges cationique. Les calculs de la géothermométrie montrent que la température des eaux des sources variées entre 104,83°C à la source de Hammam Belhachani (S7) et 141,41°C à la source de Hammam Debagh (S2) selon le géothermomètre Na-k-Ca et des températures dépassant les 220°C (Hammam Ouled Ali) selon le géothermomètre Na-K.

Mots clés : Source hydrothermale, hydrogéochimie, géothermomètres chimiques, Guelma, Algérie.

Abstract

The thermal springs are very widespread on the territory of North Algeria. They are more abundant in the north-eastern part of Algeria. This part is characterized by the abundance of neotectonic manifestations where these springs emerge through these major tectonic accidents.

In our final study project, we will study the geochemical functioning of thermal springs in relation to the geological background and tectonic accidents. A total of 09 springs were sampled and analyzed for different chemical parameters.

The interpretation of the chemical analyses allowed to show two types of facies: sodium sulfate (H. Debagh) and calcium sulfate in the other springs.

The use of the characteristic reports revealed three geochemical mechanisms that control the chemistry of the spring waters; (i) dissolution of evaporate formations, (ii) silicate weathering and (iii) cation exchange. Geothermometry calculations show that the temperature of spring waters varied between 104.83°C at Hammam Belhachani spring (S7) and 141.41°C at Hammam Debagh spring (S2) according to Na-k-Ca geothermometer and temperatures exceeding 220°C (Hammam Ouled Ali) according to Na-K geothermometer.

Keywords: Hydrothermal spring, hydrogeochemistry, chemical geothermometers, Guelma, Algeria.

ملخص

الجزائر غنية بالينابيع الحارة في الشمال ، ولا سيما في الشمال الشرقي ، قالمة لها عدة ينابيع موزعة في جميع أنحاء الإقليم وتستخدم في الاحتياجات العلاجية.

في مشروع التخرج، أجرينا دراسة حول الأداء الجيوكيميائي فيما يتعلق بالسياق الجيولوجي والحوادث التكتونية. في المجموع ، تم أخذ عينات من 09 ينابيع وتحليلها بواسطة تحليل كيميائي لمختلف العناصر الكميائية, حيث كشف تفسير

التحليلات الكيميائية عن نوعين من السحنات: كبريتات الصوديوم (حمام دباغ) وكبريتات الكالسيوم في الينابيع الأخرى.
كشف استخدام المقارنة بين العناصر عن 3 آليات جيوكيميائية تتحكم في كيمياء مياه الينابيع المتدفقة وهي: انحلال التكوينات التبخرية ، حت او تآكل السيليكات ، والتبادلات بين الشوارد الموجبة .قباسات حرارة الأرض Na-k-Ca أن حرارة خزنات الينابيع مختلفة فيما بينما (104.83 درجة مئوية لحمام بلحشاني -المنبع 1- و 141.41 درجة مئوية لحمام الدباغ -المنبع 2-) ويظهر قياسات حرارة الأرضNa-K أن حرارة خزان حمام أولاد علي جد مرتفعة (أكثر من 220 درجة مئوية).

الكلمات المفتاحية : منابع مياه حارة, هيدروجيوكيميا, مقياس كيمياء حرارة الأرض, قالمة, الجزائر.

Table des matières

- ***Dédicace***
- ***Remerciements***
- ***Résume***
- ***Abstract***
- ملخص
- ***Table de matières***
- ***Liste des Tableaux***
- ***Liste des Figures***

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Aperçu Bibliographique

I.1 Introduction……..... 3
I.2 le thermalisme…….....…. 3
I.3 les eaux thermales …… 3
I.4 Géochimie des eaux thermo-minérales …… 3
I.5 Origine de sels dissous dans les eaux thermo-minérales …… 4
I.5.1 Origine exogène ……... 4
I.5.2 Origine endogène …… 6
I.6 Températures des eaux thermo-minérales ……... 6
I.7 Origine de la température des eaux thermo-minérales …… 6
I.8 Origine des eaux thermo-minérales …… 7
I.8.1 Origine météorique ……..... 7
I.8.2 Origine Juvénile ……... 7
I.9 Classification des eaux thermo-minérales ……... 9
I.10 Les eaux thermales en Algérie …… 9
I.10.1 Historique …… 9
I.10.2 Les sources thermales de l'Algérie ……..... 10
I.10.3 Législation régissant les eaux thermales …….. 10

Chapitre II : Cadre physique et géologique

II.1 Introduction……..... 12
II.2 Situation géographique de la zone d'étude……... 12
II.3 Caractéristiques morphologique……..... 12
II.4 Climat et réseau hydrographique …… 13
II.5 Population…… 14
II.6 Potentialités économiques …… 14
II.7 Potentialités touristiques …….. 15
II.8 Cadre géologique régionale……... 16
II.8.1 le domaine interne …… 16
II.8.1.1 Socle kabyle…….. 17
II.8.1.2 Dorsale kabyle …….. 17
II.8.2 Domaines des flysch …… 18
II.8.2.1 Le flysch maurétanien…… 18
II.8.2.2 Le flysch massylien…… 18
II.8.2.3 Les flysch du Numidien…… 18
II.8.3 Domaine externe ……... 19
II.9 Cadre géologie locale…… 19
II.9.1 Etude litho-stratigraphique de la zone d'étude…….. 20
II.9.1.1 Trias……... 20

II.9.1.2 Crétacé..... 21
II.9.1.3 Tertiaire 22
II.9.1.4 Quaternaire..... 23
II.10 L'étude tectonique 24
II.11 Conclusion..... 25

Chapitre III : Caractéristiques climatiques et hydrogéologiques

III.1 Introduction 26
III.2 Aperçu sur le climat de la région étudiée 26
III.3 Localisation de la station météorologique du barrage de Bouhamdane 26
III.4 Les précipitations..... 26
III.4.1 Précipitations annuelles et interannuelles..... 27
III.4.1.1 Précipitations moyennes saisonnières..... 27
III.4.1.2 Précipitations moyennes mensuelles..... 28
III.4.2 Les températures 28
III.4.2.1 Températures moyennes mensuelles 28
III.5 Diagramme pluviothermique 29
III.6 Bilan hydrique 30
III.6.1 Détermination des paramètres du bilan 30
III.6.1.1 L'évapotranspiration 30
III.6.1.2 Le ruissellement (R)..... 32
III.6.1.3 L'infiltration (I) 32
III.6.2 Etablissement du bilan hydrique..... 32
III.7 Les ressources en eau de la région de Guelma..... 33
III.7.1 Les ressources superficielles 33
III.7.2 Les ressources souterraines 33
III.7.2.1 La nappe alluvionnaire de Guelma 33
III.7.2.2 La nappe des calcaires néritiques et sénoniens d'Héliopolis 34
III.7.2.3 La nappe des calcaires éocènes de SellaouaAnnouna - Ras El Agba..... 34
III.7.2.4 La nappe des formations carbonatées de la région d'Ain Larbi- Bou Hachana..... 34
III.8 Les sources thermales de la région de Guelma..... 34
III.8.1 Sources thermales de Hammam Ouled Ali..... 34
III.8.2 Sources thermales de Hammam Debagh 35
III.8.3 Sources thermales de Hammam Belhacheni..... 36
III.8.4 Sources thermales de Hammam Guerfa..... 36
III.9 Conclusion..... 37

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1 Introduction 38
IV.2 Prélèvement d'eau pour les analyses chimiques..... 38
IV.3 Choix et localisation des stations de prélèvements..... 38
IV.3.1 Localisation des points de prélèvement..... 38
IV.4 Mesures des paramètres physico-chimiques et des éléments chimiques 40
IV.4.1 les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)..... 40
IV.4.2 Les éléments chimiques (analyses au laboratoire)..... 40
IV.4.2.1 Dosage des bicarbonates (HCO_3^-) par méthode volumétrique..... 40
IV.4.2.2 Dosage de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) par méthode compléxometrique..... 41
IV.4.2.3 Dosage des chlorures (Cl^-) par la méthode de Mohr..... 42
IV.4.2.4 Dosage de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) par le photométre a flamme 43
IV.4.2.5 Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) par spectrometrique..... 43
IV.5 Conclusion..... 44

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1 Introduction 45
V.2 Etude des paramètres physico des eaux thermales 45
V.2.1 La température 45
V.2.2 Le PH 46
V.2.3 La conductivité 47
V.3 Etude des paramètres chimique des eaux thermales 48
V.3.1 Les éléments majeurs 48
V.3.1.1 Le Calcium (Ca^{2+}) 48
V.3.1.2 Le magnésium (Mg^{2+}) 48
V.3.1.3 Le Sodium (Na+) 49
V.3.1.4 Le potassium (K^{+}) 50
V.3.1.5 Les sulfates (SO_4^{2-}) 51
V.3.1.6 Les bicarbonates (HCO_3^{-}) 51
V.3.1.7 Les chlorures (Cl^{-}) 52
V.3.2 Facies chimique 53
V.3.2.1 Faciès chimique des eaux 53
V.4 Les rapports caractéristiques 55
V.4.1. Le rapport rCa^{2+}/rMg^{2+} 55
V.4.2 Le rapport $rCa^{2+}/rHCO_3$ 55
V.4.3 Le rapport Ca^{2+}/SO_4^{-2} 56
V.4.4 Le rapport Ca^{2+}/Na^{-}, Mg^{2+}/Na^{+} 56
V.4.5 Le rapport Na^{+}/Cl 57
V.4.6 Le rapport Ca^{2+}/Na^{+} 58
V.5 Indice d'échange de base (ieb) 58
V.6 Géothermométrie 59
V.6.1 Les géothermomètres chimiques 60
V.6.1.1 Géothermomètre Na/K 60
V.6.1.2 Géothermomètre Na/K/Ca 61
V.7 Conclusion 63
Conclusion Générale 64
Références Bibliographiques 66

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tab.1:	Précipitations moyennes saisonnières……...……..……..	27
Tab. 2 :	Bilan hydrique de la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019).....	32
Tab. 3 :	Températures estimées en °C dans les sources étudiées à la région de Guelma par différents géothermomètres chimiques ……	62

Figure	Titre	page
Fig. 1	Schéma de l'origine météorique des eaux thermo-minérales	7
Fig. 2	Schéma de l'origine magmatique des eaux thermo-minérales…	8
Fig. 3	Schéma de l'origine mixte des eaux thermo-minérales	8
Fig. 4	Situation géographique de la zone d'étude	12
Fig. 5	représentation de l'ensemble des oueds	14
Fig. 6	Esquisse structurale du Nord- Est Algérien…	15
Fig. 7	Carte géologique de la région de Guelma (Extraite de la carte géologique de l'Algérie1/500000)…	19
Fig. 8	Log litho stratigraphique synthétique de la région de Guelma	23
Fig. 9	Variation inter-annuelle des précipitations à la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)	27
Fig. 10	Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)	28
Fig. 11	Variation des températures moyennes mensuelles de la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)	29
Fig. 12	Diagramme Pluviothermique de la station du barrage de Bouhamdane (2000-2019)……	30
Fig. 13	Coupe géologique de Hammam Ouled Ali (Vila, J. M, Busnardo R., Devries A., Magne J. et Sigal J. 1968**)**	35
Fig. 14	Coupe géologique de la région de Hammam Debagh (in Dib 1985)…	35
Fig. 15	Photo de la source thermale et un griffone de Hammam Debagh	36
Fig. 16	Photo De la source de Hammam Belhacheni…	36
Fig. 17	Inventaire des points de prélèvement des sources thermales de la région de Guelma (mars 2022)	39
Fig. 18	photo représentatif d'un GPS de marque GARMIN	30
Fig. 19	Appareillage utilisé pour mesurer les paramètres physiques in-situ	40
Fig. 20	Méthode de dosage des bicarbonates.	41
Fig. 21	Méthode de dosage de calcium	42
Fig. 22	Méthode de dosage de la dureté (TH)	42
Fig. 23	Méthode de dosage des chlorures.	43
Fig. 24	Spectrophotomètre à flamme	43
Fig. 25	Principe de spectrométrie	44
Fig. 26	Spectrophotomètre (SPECORD 50)	44
Fig. 27	Histogramme de la variation de la température des eaux des sources thermales (Mars 2022)	46
Fig. 28	Histogramme de la variation de pH des eaux des sources thermales (Mars 2022)……	46
Fig. 29	Histogramme de la variation de la conductivité électrique des eaux des sources thermales (Mars 2022)	47
Fig. 30	La variation de la concentration en Calcium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)……	48
Fig. 31	La variation de la concentration en Magnésium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)	49
Fig. 32	La variation de la concentration de sodium (mg/l) des eaux des sources	

	thermales (Mars 2022)…….....……	50
Fig. 33	La variation de la concentration de potassium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)……	50
Fig. 34	La variation de la concentration des sulfates (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)……	51
Fig. 35	La variation de la concentration en bicarbonates (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)……	52
Fig. 36	La variation de la concentration des chlorures (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)……	53
Fig. 37	Faciès chimiques des eaux des sources thermales selon le diagramme de Piper	54
Fig. 38	Représentation graphique des faciès chimiques sur le Diagramme de Stiff …..	54
Fig. 39	Le couple Ca^{2+}, Mg^{2+}……	55
Fig. 40	Le couple Ca^{2+}, HCO_3^-……	56
Fig. 41	Le couple Ca^{2+}, SO_4^{-2}……	56
Fig. 42	Graphique bivarié de Na-normalisé de Ca par rapport à Mg. Les carrés représentent les plages de compositions approximatives des trois principaux membres finaux de la source (évaporats, silicates et carbonates) sans aucun mélange……....	57
Fig. 43	Le couple Na^+, Cl^-……	58
Fig. 44	Le couple Ca^{2+}, Na^+……	58
Fig. 45	Echanges de bases dans les eaux des sources thermales de la région de Guelma…….	59

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRAL

Ce jour-là, les eaux thermales acquises une importance pour ces différents avantages dans des divers domaines et en particulier leurs effets thérapeutiques.

L'Algérie un pays riche en sources thermales, il y a plus de 200 sources thermales et chaque source a des caractéristiques différentes à l'autre, et cette diversité est en relation avec la variété du contexte géologique. Les premières civilisations qui donnent une grande importance aux sources thermales sont les romains, ils construisirent leurs sites autour de ces sources. Aujourd'hui, nous connaissons ; l'origine de quelques émergences thermales, la géologiques de leurs gisements, la chimie de ses eaux, la relation entre les structures géologiques qui les composent, et les orientations thérapeutiques.

Parmi les 200 sources thermales qui existent en Algérie, le plus grand nombre se trouve dans l'Est algérien. Les températures mesurées à l'émergence varient de 39°C à Ben Haroune à 98°C à Hammam Debagh.

Les premières études scientifiques sur le thermalisme en Algérie fait en 1823 par quelques auteurs ayant contribués par leurs travaux en Algérie dans ce domaine. En 1852, M. Ville a publié ses recherches sur « Les roches, les eaux et les gites minéraux des provinces d'Oran et d'Alger », en 1889, M. Ville a effectué une notice sur « Les sources thermales et minérales d'Algérie », en 1911, Hanriot publiera un ouvrage intitulé «les eaux minérales de l'Algérie», en 1940 et 1947, S. Guigue a étudié « Les sources thermo-minérales de l'Algérie » dans le cadre de service de la carte géologique de l'Algérie, en 1974, M. P. Verdeil a établié une carte au 1/500000 des eaux minérales, thermales et thermo-minérales de l'Algérie. Puis dans le cadre de l'association internationale des hydrogéologues (A.I.H.) H. Dib-Adjoul en 1985 a étudié « Le thermalisme de l'est algérien » dans le cadre de sa thèse de doctorat de troisième cycle. En 1992, A. Issaadi a réalisé une thèse de doctorat d'état intitulé « Le thermalisme dans son cadre géostructural » où il a basé sur le côté géostructurale.

Dans ce travail de mémoire, nous avons essayé de revérifier les processus géochimiques qui contrôlent la chimie des eaux thermales de la région de Guelma, en se basant bien-sûr sur les travaux antérieurs, particulièrement celles de Mme Dib H. et Mr Bouaicha F. Pour mener à bien ce travail, nous avons structuré notre mémoire en cinq chapitres :

- ***Le premier chapitre*** représente une synthèse bibliographique dans lequel nous avons essayé de rappeler les notions de thermalisme, les principaux caractéristiques et

constituants des eaux thermale, les principaux origines des eaux thermale et enfin un aperçu sur le thermalisme en Algérie.

- ***Le deuxième chapitre*** est consacré à la présentation générale de la zone d'étude en abordant aussi le contexte géologique de la région de Guelma.
- ***Le troisième chapitre*** a pour objectif de présenter les caractéristiques climatiques et hydrogéologiques de la zone d'étude.
- ***Le quatrième chapitre*** traite la stratégie de prélèvement, le matériel utilisé et les méthodes d'analyses physicochimiques utilisées.
- ***Le dernier chapitre*** a pour but d'étudier hydro-chimique des eaux des sources thermales de la région de Guelma, à travers la représentation graphique des résultats, puis l'interprétation en cherchant l'origine probable pour chaque élément, ainsi que l'étude des phénomènes géochimiques influençant la chimie des eaux thermales, avec le calcule à la fin des géothermomètres des différentes sources.

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

Chapitre I

Aperçu Bibliographique

I.1. Introduction

L'eau, au contact des terrains qu'elle rencontre, se charge en divers éléments qui vont influer sur sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol, et vont définir la qualité « naturelle » de l'eau brute. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir : des matières organiques, des matières dissoutes provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds, …) et des particules en suspension.

I.2. Le thermalisme

Le thermalisme est l'utilisation thérapeutique des propriétés de certaines eaux minérales naturelles pour guérir ou soulager des personnes souffrant d'affections diverses. L'ensemble des moyens médicaux, sanitaires, administratifs, sociaux et d'accueil est mobilisé pour l'utilisation des eaux minérales, des gaz thermaux et des boues thermales à des fins thérapeutiques : on parle de thérapeutique thermale ou crénothérapie. La médecine thermale est naturelle par définition.

C'est une médecine douce, complémentaire et constitue une alternative aux autres soins médicaux **(Lakhdari&Bouaicha, 2016).**

I.3. Les eaux thermales

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

I.4. Géochimie des eaux thermo-minérales

- Principaux anions: Parmi Les anions, nous mettrons dans l'ordre d'importance Cl^-, Br^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, I^-, et F^-

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

- Principaux cations : Le cation sodium est le plus répondu et est rarement absent. Sa teneur est variable. Il est combiné à l'état de chlorure, bicarbonates, sulfures. Le potassium K^+ est subordonné au sodium mais on plus faible quantité. Le lithium Li^{2+} toujours en petite quantité. Le calcium est le cation le plus fréquent car il est très courant dans ses roches sédimentaires. Le

Magnésium Mg^{2+} accompagne très souvent le calcium à l'état de carbonates et chlorures. Le fer Fe^{2+} est fréquent dans toutes les sources, combiné on carbonate, sulfates on complexe organiques. Le barium Ba^{2+}, le strontium Sr^{2+} et l'aluminium Al^{3+} sont plus rares.

I.5. Origine de sels dissous dans les eaux thermo-minérales

Ils ont soit une origine exogène soit une origine endogène.

I.5.1. Origine exogène

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

Lessivage des terrains: Les chlorures proviennent de la dissolution de sels naturels: sel gemme, sals de potasse. C'est pourquoi le Trias donne naissance à de nombreuses sources thermo-minérales. Les carbonates et bicarbonates sont fréquents dans les roches: carbonates de calcium, de magnésium. Les sulfates, sulfures, hypo-sulfites, l'hydrogène sulfuré et le Soufre proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ($Ca\ SO_4\ 2H_2O$), suivie éventuellement d'une réduction et de la décomposition des sulfures métalliques FeS_2, FeA_sS, $Cu\ Fe\ S_2$ ou des Pyrites de fer. Cette origine à partir du gypse explique la liaison fréquente des eaux sulfatées et moins fréquemment sulfurés avec le Trias. L'iode de provient de la circulation dans les terrains riches en substances organiques végétales fossiles, comme par exemple les schistes à posidonomies. Le lithium peut provenir de minéraux de roches silicatées acides au type granulites, ou leur altération donne des micas à base de lithium. Le fer est fourni par la décomposition de Pyrites ou par la dissolution de bicarbonates. Le sodium peut être issu également de la sericitisation des plagioclases par la transformation de leur feldspath sodique en un mica potassique avec libération de Na.

Les réactions chimiques transforment les sels dissous. Les sulfates sont réduits par les matières organiques ou végétales, en présence du CO_2 libre des eaux pour libérer de l'hydrogène sulfuré suivant La formule:

$SO_4\,Ca + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca\,CO_3 + H_2S$ ..... (1)

En fait les réactions chimiques sont les complexes. Par exemple les réactions chimiques qui se produisent à la source de Hammam Salhine de Biskra Sont to suivantes **(Guigue, 1947).**

Dans une première phase le sulfate de sodium $SO_4\,Na_2$ est réduit en sulfure par l'action de matières organiques selon deux réactions:

$SO_4\,Na_2 + 2C \rightarrow Na_2\,S + 2\,CO_2$…… (2)

$SO_4Na_2 + 4H_2 \rightarrow Na_2 + 4H_2O$..... (3)

En solution dilué le sulfure Na_2Cl s'hydrolyse en selfhydrate

$2Na_2S + H_2Cl \rightarrow Na_2Cl + 2Na\ HS$ …. (4)

Mais Na HS instable se dissocie:

$2Na\ HS \rightarrow Na_2S + H_2S$…....(5)

L'hydrogène sulfuré réagit sur la sonde libéré par l'hydrolyse de sulfure (Equa 04) pour regénérer le sulfhydrate.

$Na_2\ CL + 2Na\ HS \rightarrow H_2\ CL$ …… (6)

Nous obtenus ainsi un mélange de Na_2 S, Na HS, Na_2 Cl et H_2S en équilibre. Si dans ce mélange circule du CO_2 il entraine H_2S et se combine à la soude libre, détruisant l'équilibre.

$Na_2S + H_2O + CO_2 \rightarrow Na_2\ CO_3 + H_2S$..... (7)

Nous obtenus ainsi la réaction générale (Equa 1) En présence d'excès de CO_2, il est possible d'obtenir du bicarbonate

$Na_2S + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow Na\ HCO_3 + H_2S$ .....(8)

La décomposition de Pyrites en présence d'eau s'effectue sels une des deux réactions suivantes:

$FeS_2 + 3O_2 + H_2O \rightarrow Fe\ SO_4 + H_2S$ ..... (9)

$2Fe\ S_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe\ SO_4 + 2SO_4 + 2H_2$..... (10)

L'acide sulfurique dissociée et l'oxygène transforment le sulfate ferreux on sulfate ferrique.

$4FeSO_4 + 2SO_4 + 2H_2 + O_2 \rightarrow 2(SO_4)_3\ Fe_2 + 2H_2O$ … (11)

$2Fe\ SO_4 + 2SO_4\ H_2 + 4CaCO_3 + H_2 + O_2 \rightarrow 2\ Ca\ SO_4 + 2Fe\ (OH)_3 + 4CO_2$ ..... (12)

Les eaux se chargent en SO_4 Ca et en $(HCO_3)_2$ par dissolution du gypse (Ca $SO_4 2H_2O$). Les sulfates sont réduits en sulfures par le processus décrit au-dessus. L'origine des eaux sulfurées calciques de Hammam Debagh qui renferme en effet une forte teneur en CO_2 **(Guigue, 1947)** s'explique par les réactions.

$Ca\ S + CO_2 + H_2O \rightarrow Co_3Ca + H_2S$.... (13)

La composition chimique des eaux est due au lessivage du Trias qui apporte des sulfates. Ensuite la circulation dans les schistes hydrocarbures du Lias est accompagnée d'une réduction du sulfate avec production de H_2S. Ce dernier est réduit an niveau des griffons Sous l'action des bactéries pour donner du soufre.

L'action de micro-organismes est surtout importante pour les sulfates qui sont réduits. Elle est à l'origine également de la production du Soufre par oxydation de l'hydrogène sulfure

$2H_2S + O_2 \rightarrow 2\ H_2O + 2S$ …… (14)

Ou

$H_2S + H_2CO_3 \rightarrow 4\ CO\ OH + S + H_2O$ .....(15)

Le soufre peut à son tour oxydé pour produire de l'acide sulfurique

$2S + 3O_2 + H_2O \rightarrow 2SO_4\ H_2$ ……(16)

Echanges de bases: c'est un mécanisme de permutation qui se fait en présence des argiles, ils jouent un rôle important dans le chimisme des eaux particulièrement souterraines. Le processus d'échanges de bases a été illustré par **Guigue(1947)** sur la source thermo-minéral de hammam N'Bail avec un faciès sulfaté sodique ou le $(HCO_3)_2$ Ca et le SO_4 Ca provenant de la dissolution du gypse donnent Les réactions :

Argile sodique + Ca H_2 $(Co_3)_2$→ argile calcique + $2NaHCO_3$ ...(17)

Argile sodique +SO_4Ca → argile calcique +SO_4 Na_2 … (19)

I.5.2. Origine endogène

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

I.6. Températures des eaux thermo-minérales

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

Une source est dite thermale lorsque ses eaux ont une température supérieure de 05 à 06 °C la température moyenne de la zone d'émergence.

I.7. Origine de la température des eaux thermo-minérales

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

Gradient géothermique: Il est défini comme la profondeur de pénétration dans le sol exprimé en mètre, nécessaire pour que la température augmente de 1°C. Se valeur moyenne est de 30 à 35m. Elle diminue dans les régions volcaniques (10 à 15m) et augmente dans les massifs granitiques (60 à 80m) **(Castany, 1963).**

Volcanisme: l'activité volcanique produis de la chaleur par les émissions de magna et d'eaux juvéniles hyperthermales.

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

I.8. Origine des eaux thermo-minérales

Plusieurs hypothèses ont été mises quant à l'origine des eaux thermo-minérales, par exemple **A.Dambrée (1887) *in* Castany(1663)** a mis une origine exclusivement volcanique, après **A. De Lannay (1899)**, démontré que la minéralisation et La température des eaux thermo-minérales de s'expliquent par la circulation des eaux à différentes profondeurs. Quelques années après **Suess, (1903)** admettent une double origine météorique et juvénile.

I.8.1. Origine météorique

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

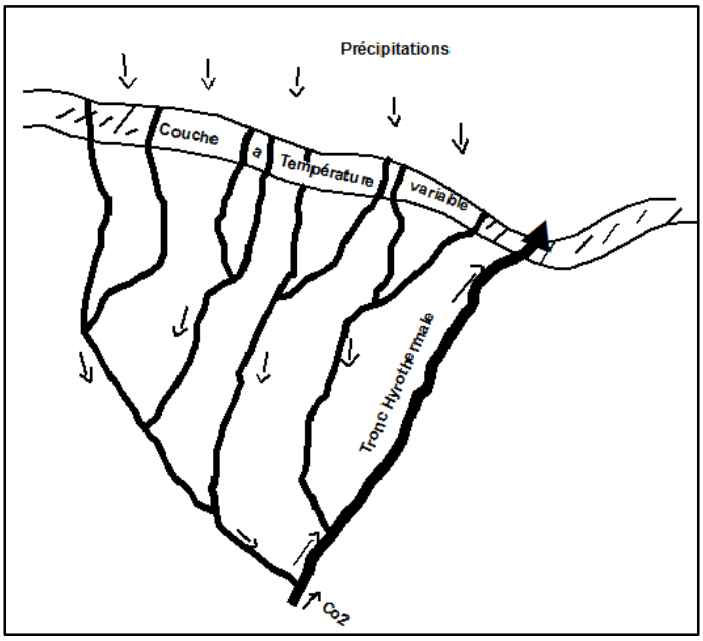


Fig.1. *Schéma de l'origine météorique des eaux thermo-minérales*

I.8.2. Origine Juvénile

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

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

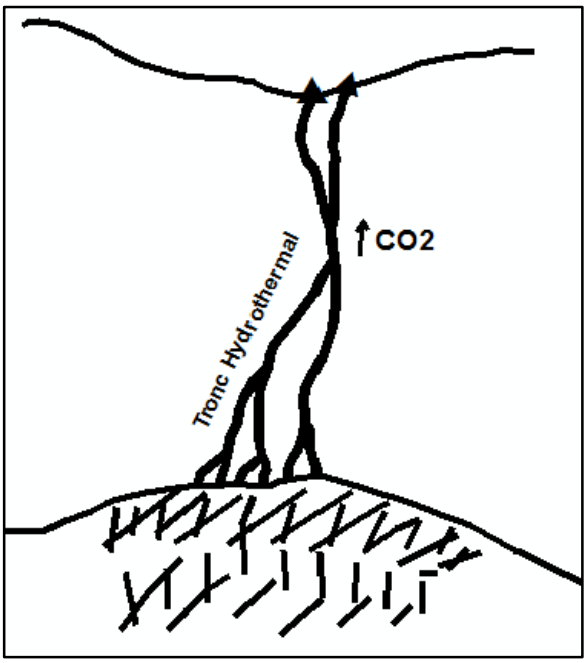


Fig.2.*Schéma de l'origine magmatique des eaux thermo-minérales*

Origine Volcanique*:* les eaux juvéniles peuvent provenir de la consolidation des laves et de la vapeur d'eau d'origine volcanique. Cette émission de vapeur d'eau est accompagnée de gaz carbonique, d'azote, H_2S, Hcl, Hf et SO_2 **(Fourmarior, 1955).**

Eau de réactions chimique: Les réactions chimiques intenses au sein de la croute terrestre, libèrent de l'eau.

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

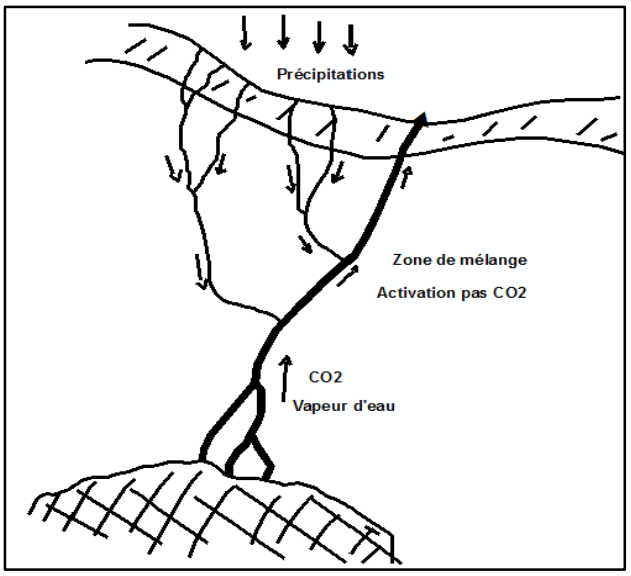


Fig.3. *Schéma de l'origine mixte des eaux thermo-minérales*

I.9. Classification des eaux thermo-minérales

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

- **Eaux Athermales :** eaux dont la température est inférieure à la température moyenne annuelle du lieu d'émergence ;
- **Eaux Hypothermes :** eaux dont la température est égale à la température moyenne annuelle du lieu d'émergence ;
- **Eaux Mésothermes :** eaux dont la température est comprise entre la température moyenne annuelle du lieu d'émergence plus 4°C et 37°C qui est la température du corps humain ;
- **Eaux Orthothermes :** eaux dont la température est comprise entre 37°C et 45°C.
- **Eaux Hyperthremes :** eaux dont la température est supérieure à 45°C.

I.10.Les eaux thermales en Algérie

I.10.1 Historique

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

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

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

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

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

I.10.2 Les sources thermales de l'Algérie

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

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

Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias si répandu en Algérie **(Guigue, 1940)** ce cas est rencontré à titre d'exemple à Hammam Melouane 29.42 gr/l, Hammam El Biban 15 gr/l, Hammam Salhine 9 gr/l.

L'Algérie septentrionale contient en abondance des sources thermo-minérales de composition très variées. La répartition des eaux thermo-minérales en Algérie, et très irréguliers. Ces sources sont augmentent en nombre au fur à mesure que l'on se rapproche de l'Est du pays. Cette répartition semble suivre celle des gites métallifères. C'est ainsi que l'on compte une vingtaine de sources dans la région ouest, environ 40 dans le centre et 150 dans l'Est.

Un inventaire effectué dans les années 1970 récence quelques 202 source, classées comme suit : 136 sources locales, 55 régionales et 11 nationales. Le décret n˚98-370 de 23 novembre 1998 relatif au classement des communes ou groupement de communes en station classées, signale quant à lui quelques 41 stations hydrominérales.

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

I.10.3 Législation régissant les eaux thermales

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

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

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

Art.2. - Les eaux thermales sont des eaux captées à partir d'une émergence naturelle ou d'un forage qui, en raison de la nature spéciale de leurs principes, de la stabilité de leurs

caractéristiques physiques et de leur composition chimique, peuvent avoir des propriétés thérapeutiques.

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

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

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

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

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

Chapitre II

Cadre physique et géologique

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la description de la zone d'étude, à savoir la wilaya de Guelma. Nous montrerons sa situation géographique et ses caractéristiques. Et nous essayerons de définir le cadre régional, local et structural de la zone d'étude sur une étude litho stratigraphique détaillée d'une part et une analyse morpho structurale d'autre part.

II.2. Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya de Guelma est située au Nord-Est de l'Algérie à environ 60 Km de la mer Méditerranée. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Annaba, au Nord-Ouest par la wilaya de Skikda, au Nord-Est par la wilaya d'El Tarf, à l'Ouest par la wilaya de Constantine et au Sud-Est par la wilaya de Souk Ahras et Oum-El Bouagui (Fig.1). Elle couvre une superficie de 4 101 km^2 **(Khallef, B, all, 2020)**. Ces coordonnées géographiques sont :

- Latitude : 36° 27'50''N.
- Longitude : 7°26'50''E.

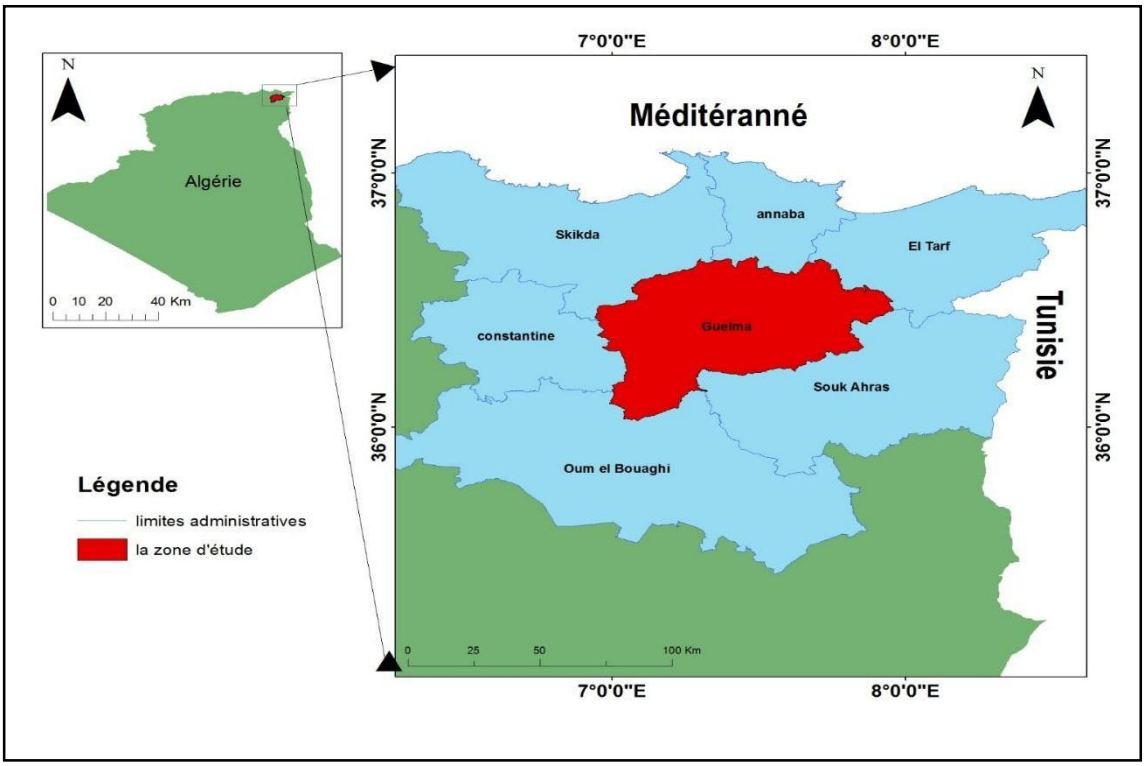


Fig.4. *Situation géographique de la zone d'étude.*

II.3. Caractéristiques morphologiques

Sur le plan morphologique, la wilaya de Guelma est caractérisée par différents types de reliefs, à savoir :

a) Les zones montagneuse, dominé la majorité de superficie (37,82%). Il y a quatre principales montagnes : Dj Mahouna (1411 m), Dj Houara (1292 m), Dj Taya (1208 m), et Dj Debar (1060 m) **(Laib.H, et Boubaa, F, 2018)**.

b) Les Plaines et les plateaux, constituent 27.22% de la superficie totale de la wilaya de Guelma.

c) Les collines et les Piémonts, constituent 26.29% de la superficie totale, et des autres types de relief constituant 8.67% **(Beldjazia.A, 2016)**.

La région de Guelma englobe toute la partie médiane du Nord vers le Sud. Elle est organisée en auréole, tout autour de la plaine centrale constituée de terrasses alluviales, qui s'étale le long de l'Oued (la vallée de la Seybouse).

Cette région se caractérise aussi par une importante couverture forestière au Nord et à l'Est. Par contre, la partie Sud souffre de dégradations répétées de cette couverture forestière fournie en dépit du caractère montagneux de cette région, d'où une grande vulnérabilité à l'érosion. **(Beldjazia.A, 2016).**

II.4. Réseau hydrographique

Cette wilaya est caractérisée par un important réseau hydrographique formé par un ensemble des Oueds dont les principaux sont:

- Oued Sybousse le deuxième plus long oued en Algérie après Oued Chéliff, il présente l'axe de drainage du grand bassin versant de la Seybousse. Oued Sybousse à un apport annuel de 408 Hm^3/an à la station de Boudaroua et prend naissance dans les hautes plaines de Haracta, Ain Abid et Sedrata et se jette dans la mer méditerrané après un parcours de 160 km (Debbieche, 2002). Son débit non régulier varie entre 10 m^3/s et 100 m^3/s, mais il atteindre une valeur de 630 m^3/s (observé en janvier 1985).
- Oued Bouhamdane (37,49 km), alimenté par Oued Sabath (10,86 Km) et Oued Zenati (52,40 Km), il apporte un volume d'eau de 96 Hm^3/an à la station de Medjaz Amar II (point de confluence avec l'oued Cherf).
- Oued Cherf (36,46 km), situé au sud-ouest de Guelma, il a un apporte de 107 Hm^3/an à la station de Medjaz Amar I.
- Oued Mellah, au sud-est, il a un apport de 151Hm3/an à la station-service naftal de Bouchegouf **(Bouaicha.F, 2018)**.

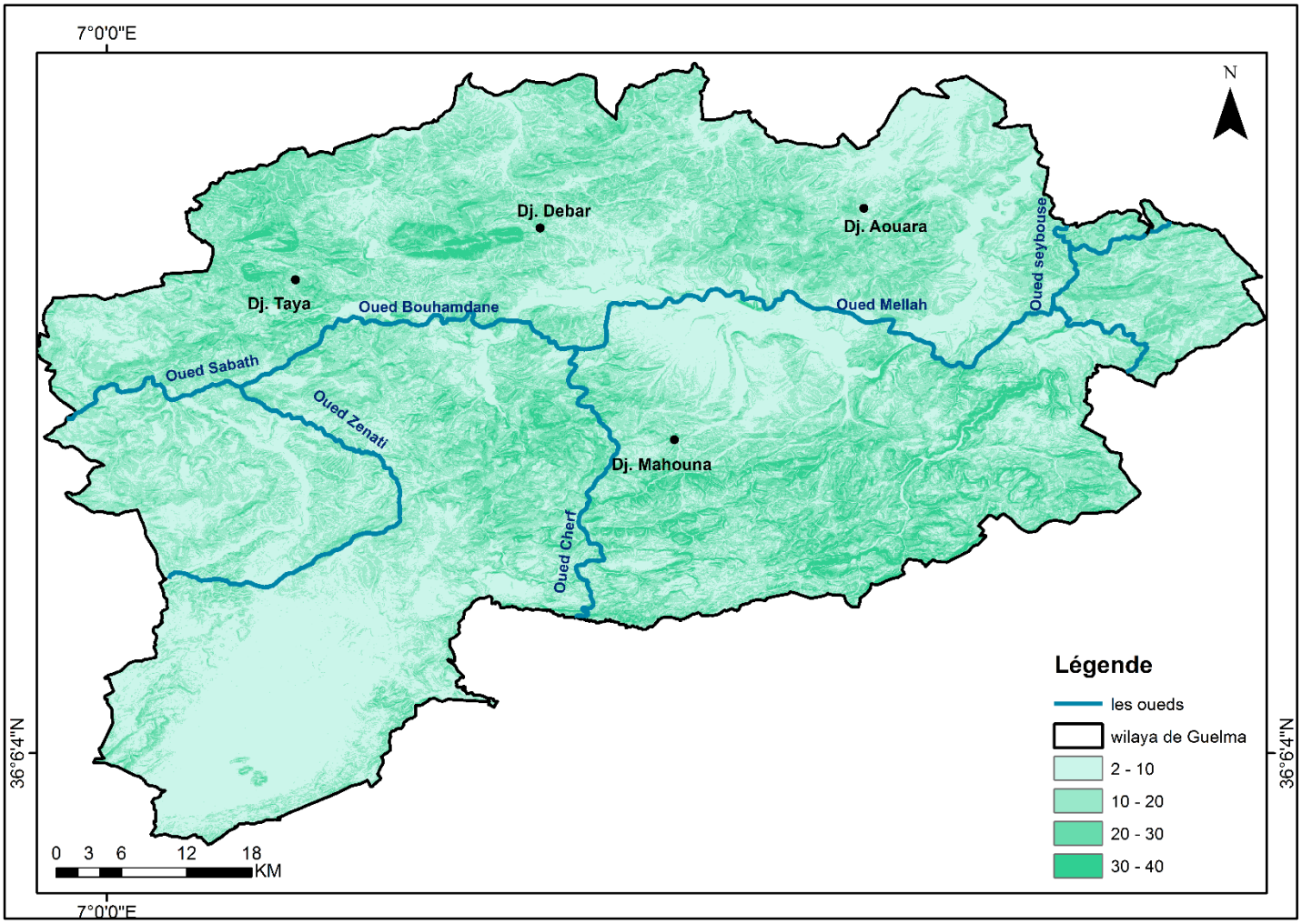


Fig.5.*représentation de l'ensemble des oueds.*

II.5. Population

D'après les résultats du dernier recensement de 2008, la wilaya de Guelma abrite une population de l'ordre de 482 430 habitants.

II.6. Potentialités économiques

Sur le plan économique, la wilaya de Guelma est une région à vocation essentiellement agricole, elle recèle un important potentiel foncier en terme SAU (sol agricole utilisable), céréales d'hiver, pomme de terre et fourrages secs, à une surface agricole totale de 266.000 Ha, soit 72 % de la superficie totale; Une superficie forestière de 105.395 Ha, soit 28% de la superficie totale **(Laib.H, et Boubaa.F, 2018)**.

II.7. Potentialités touristiques

Le potentielle touristique de la wilaya riche et varié : paysage magnifique, lacs sous terrain à Bir Osman, sites naturels et historiques (forêt de la Maouna, grotte de Taya ...). Elle possédé également plusieurs sources thermales : (hammam Debagh, N'bails, Ouled ali, Guerfa, Belhachani…) **(Laib.H, et Boubaa.F, 2018)**.

II.8. Cadre géologique régionale

La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides (fait partie de l'orogène alpin périméditerranéen d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien **(Delga, 1969 ; Bouillin, 1986)**.

En Algérie, la chaîne des Maghrébides est constituée de plusieurs nappes charriées sur la plateforme Africaine et montre du nord au sud les domaines suivants (Fig.6)

- Le domaine interne.
- Le domaine des flyschs (médian).
- Le domaine externe qui représente la marge téthysienne du continent africain.

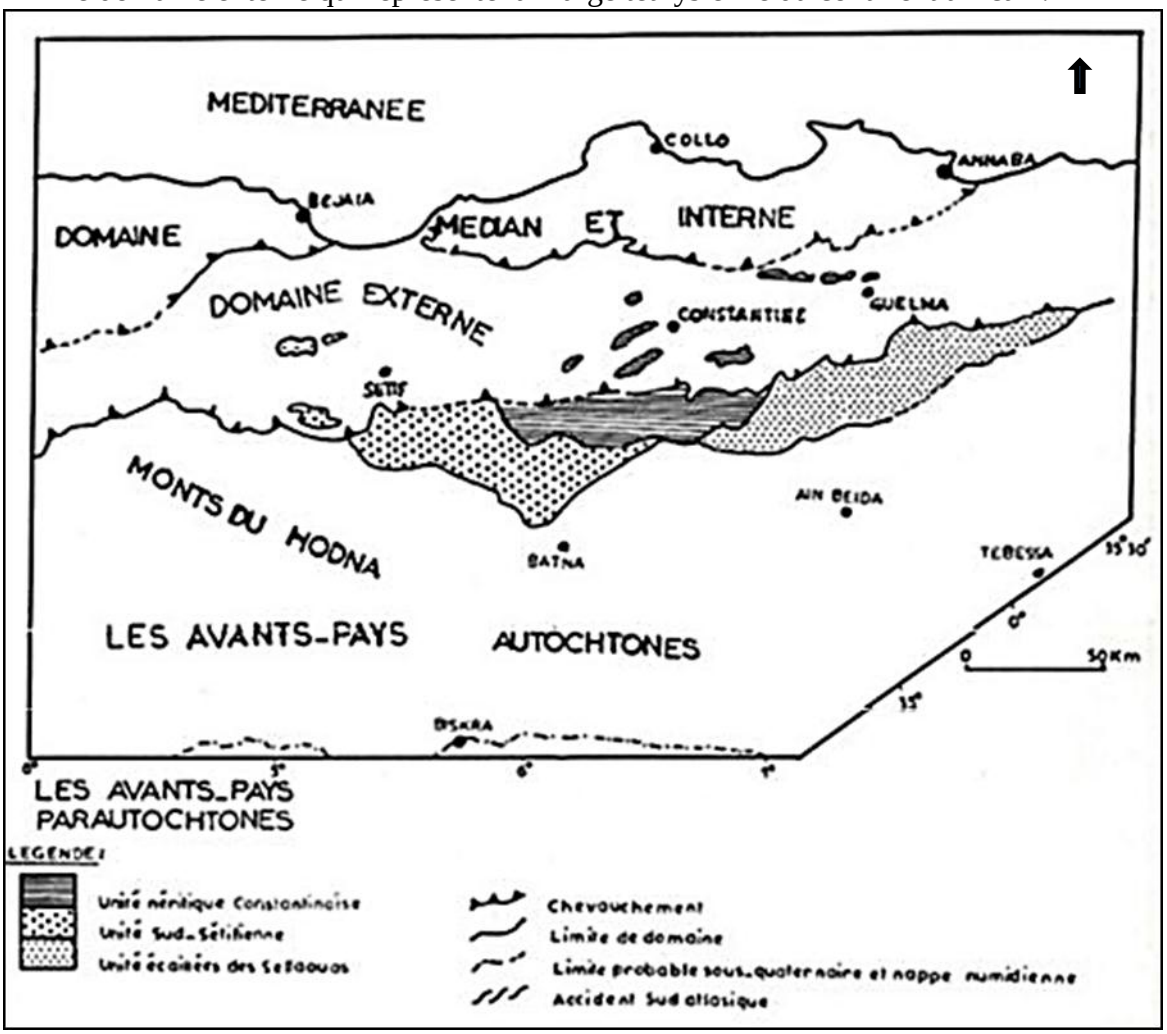


Fig.6. *Esquisse structurale du Nord- Est Algérien,* ***(W. Wildi, 1983).***

II.8.1. Le domaine interne

Ce domaine se présente sous formes des massif anciens, isolés les uns les autres (Coiffait, 1992), il est constitué d'affleurements de socle métamorphique de nature variées (Vila, 1980), et

formées des éléments dilacérés de la plaque Alboran **(Wildi, 1983)** et une couverture sédimentaire du Paléozoïque au Tertiaire.

Le domaine interne comprend le socle kabyle et la dorsale kabyle :

II.8.1.1. Socle kabyle

Les formations du socle se trouvent dans la grande Kabylie, la petite Kabylie et les massifs de Chenoua (Ouest d'Alger). Il est formé essentiellement par les roches cristallophylliennes comme les granites, les schistes et les basaltes **(Delga, 1969 ; Bouillin, 1977 ; Raoult, 1974)**. Le socle kabyle comporte de bas en haut les ensembles suivants :

- un ensemble cristallin profond appartenant au faciès des granulites ;
- un ensemble gneissique, admettant des intercalations de quartzites, d'amphibolites, de marbres et de pyroxénites ;
- un ensemble phylladitique qui a subi un métamorphisme de basse pression avec une zone inférieure à biotite et une zone supérieure à chlorite.

II.8.1.2. Dorsale kabyle

La Dorsale kabyle constitue la couverture méridionale du socle kabyle, elle marque la limite entre ce dernier au Nord et les zones telliennes au Sud, elle est constituée par des formations sédimentaires allant du Permo-Trias jusqu'à l'Oligocène qui y affleurent généralement sur une frange très étroite **(Vila, 1980)**.

Il y distingue plusieurs unités qui sont du Nord vers le Sud :

- La Dorsale interne qui montre une série complète du Permo-Trias au Néocomien surmontée directement par des dépôts continentaux et littoraux du Lutétien supérieur (Raoult, 1974) (calcaires biogènes à caractère épicontinental) ;

- La série de la Dorsale médiane comporte des termes du Pemo-Trias, du Lias et du Crétacé inférieur Elle est caractérisée par une sédimentation marneuse à microfaune pélagique;

- La Dorsale externe présente une série composée par des radiolarites au Dogger-Malm et sédimentation détritiques grossière au crétacé sup et Paléocène **(Djellit, 1987 ; Bourefis, 2006)**. Elle est intermédiaire entre les autres séries de la Dorsale et le bassin des flyschs maurétaniens **(Abbassene, 2016).**

II.8.2. Domaines des flysch

Le domaine des nappes de flyschs correspond à un secteur marin profond et mobile du Jurassique moyen au Burdigalien. Il occupe une position allochtone par rapport aux zones externes.
On y distingue du Nord au Sud deux grands groupes : les flyschs maurétaniens et le flyschs massyliens aux quelles vient s'ajouter un troisième type : les flyschs gréso-micacés ou flyschs Numidiens.

II.8.2.1. Le flysch maurétanien

Ce flysch montre une série allant du Malm au Priabonien. Il comporte de bas en haut :
- Des calcaires du Tithonique-Néocomien, passant vers le haut à une puissante masse de pelite et de grès (flyschs de GERROUCH) de l'Albo-Aptien.
- Des micros brèches silicifiées à ciment sparitique à quartz détritique du Cénomanien et Turonien inférieur.
- Un ensemble complexe de marnes, de calcaires microbréchiques et sableux, des conglomérats au sommet et enfin, des grès micacés du Turonien au Lutétien supérieur. **(Boukrouh, 2009).**

II.8.2.2. Le flysch massylien

Le terme de flysch massylien a été proposé par Raoult en 1969 pour caractériser les formations détritiques schisto-quartzeuses (flysch albo-aptien de **Glangeaud, 1932)**.Ce flysch comporte les termes lithologiques suivants :
- Argiles et grès plus ou moins quartzitiques de l'Albo-Aptien ;
- Des Phtanites argileuses et conglomérats avec des marnes à bancs calcaires du Cénomanien inférieur ;
- Des marnes et des argiles schisteuses à lits de grès calcareux et des conglomérats du Sénonien. **(Boukrouh, 2009)**

II.8.2.3. Les flysch du Numidien

Les formations du flysch Numidien sont les plus répandues dans la région de Guelma. Elles forment l'essentiel du massif d'El Houara et la partie Nord du massif des Beni Marmi. Le sommet de la série Numidienne est représenté par des grés à grains de quartz hétérométriques de couleur variable (blanchâtre, jaunâtre, grisâtre, brunâtre). Ces grés sont organisés en bancs épais, intercalés de lits argilo gréseux. Ces grés surmontent une assise d'argiles jaunes schisteuses, admettant en intercalation des niveaux de calcaires argilo-gréseux. La base de la série numidienne se termine par des argiles schisteuses, fossiles, de couleur souvent brun rosé, contenant des lentilles et des rognons de quartzites noirs **(Lahonder, 1987).**

II.8.3. Domaine externe

Le domaine externe représente la marge Téthysienne du continent Africain **(Wildi, 1983)**, Il est constitué par un ensemble des nappes allochtones pelliculaires à matériel essentiellement marno-calcaire chevauchant le sud de l'avant pays Africain (Villa, 1980 ; Coiffait, 1992). On y, distingue deux grands types de séries :

- Les séries telliennes ;
  - ***L'unité ultra tellienne :*** formée d'un ensemble particulièrement homogène qui contient un Crétacé marneux à Ammonites et à Rotaliporas et un Eocène caractérisé par des marnes sombres et des calcaires à silex noirs **(Delga, 1969)**.
  - ***Unité Tellienne sensu stricto S.S :*** Elle forme une couverture très importante qui va des chaînes côtières des Babors jusqu'aux premières pentes des monts du Hodna. Elle est formée des conglomérats au jurassique, de dépôts terrigènes détritiques au Crétacé inférieur et de marnes à l'Eocène.
  - ***Unité péni tellienne :*** Elle montre des séries néritiques, marnes et calcaire, du Crétacé à l'Oligocène, ces séries sont confondues avec les formations de plateforme réputées autochtones **(Vila, 1977)**.

- Les séries de l'avant pays.
  - ***L'avant pays allochtone ou para autochtone :*** Il se situe au Sud des domaines précédents et il correspond à des séries sédimentaires d'âge mésozoïque. Dans ces séries, les formations carbonatées, souvent dolomitiques y sont largement développées. Elles constituent des môles rigides qui ont plus au moins résisté aux compressions alpines. On distingue d'Ouest en Est les structures suivantes :

a- Les avants pays stables ;

b- Les pays autochtones plissés à séries sédimentaires mésozoïques épaisses ;

c- Les avants pays plissés et écaillés vers le sud

II.9. Cadre géologie locale

La région de Guelma, fait partie en majeur partie des zones externes d'Algérie nord orientale, elle est caractérisée par des formations allant du Trias au Quaternaire (Fig.7), C'est un empilement chronologique de formations géologiques de lithologie plus au moins différente. Ces formations sont de haut en bas : le Quaternaire, le Mio-Pliocène, la nappe numidienne, les nappes des flyschs, la nappe ultra tellienne, la nappe tellienne, les écailles des Sellaoua et enfin la nappe néritique constantinoise.

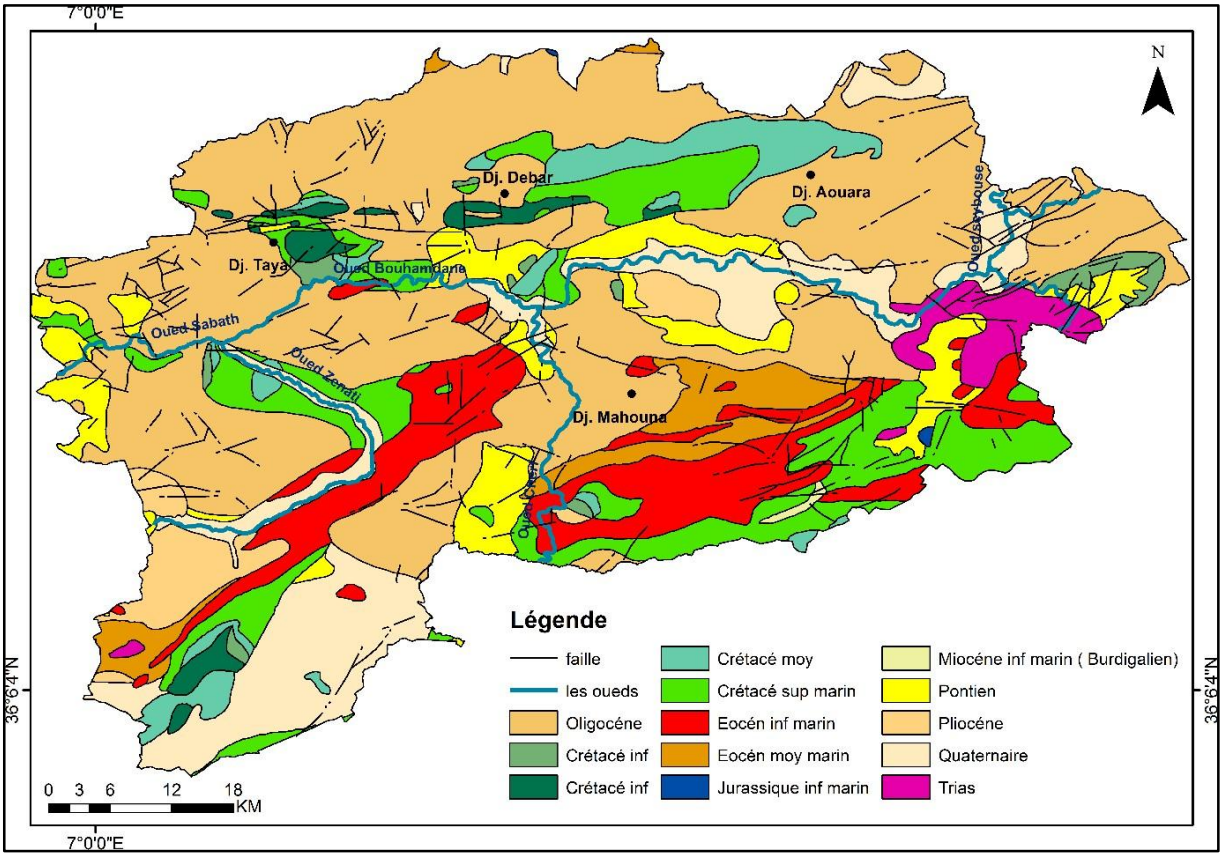


Fig.7. *Carte géologique de la région de Guelma (Extraite de la carte géologique de l'Algérie 1/500000)*

II.9.1. Etude litho-stratigraphique de la zone d'étude

Grâce aux travaux de nombreux auteurs qui ont étudié la géologie du la région du Guelma, soit sous forme des ouvrages ou des articles. Parmi ces auteurs on peut citer : Chavane, (1910) ; Vila et Magné, (1969) ; Vila, (1978, 1980) ; Bouilin, (1986) ; Lahondère, (1987) et Chouabbi, (1987), ainsi que l'examen de la carte géologique de Guelma avec un log lithostratigraphique, nous avons pu dégager les formations géologiques présentent dans la zone d'étude. Ces formations seront décrites du plus ancienne au plus récente.

II.9.1.1. Trias

Les formations triasiques de la région du Nador N'Bails et de la Mechrouha se présentent comme une association de cargneules, de dolomies, de calcaires dolomitiques, de schistes et de grès, englobés dans des argiles rouges et des gypses **(Chouabi, 1987)**.Le Trias apparaît souvent en position chevauchante sur les terrains avoisinants : c'est le cas au Sud de la station du Nador, sur les molasses néogènes du bassin de Guelma **(Vila, 1971).** L'étude détaillée des contours montre que le Trias jalonne les contacts anormaux qui ont données naissance au grand bassin molassique de Guelma **(Chouabi, 1987),** c'est le cas du bassin Mechrouha-Ain Tahmamine. **(Bouaicha,2018).**

a. Formations du Néocomien

Elles sont représentées par des calcaires sombres, parfois micritiques, et parfois dolomitiques. Ces calcaires forment des bancs très épais et montrent un alignement Est-Ouest sur plus de 2,5 km. Ces calcaires sont surmontés en concordance par la série marneuse complète du Crétacé moyen et supérieur **(Chavane, 1910)**. Vers les extrémités Est et Ouest, cette série apparaît étirée et comprimée de telle sorte que les calcaires à inocérames du Sénonien viennent reposer presque directement sur les calcaires Néocomiens **(Chavane, 1910)**.

Ces phases d'étirements et de décollements de strates semblent être à l'origine de la mise à jour des minéralisations (calamine, galène, antimoine aciculaire, barytine) qui apparaissent principalement aux deux extrémités de ce massif calcaire, notamment à Hammam Berda.

II.9.1.2. Crétacé

a. Formations du Barrémien

Elles sont parmi les formations les mieux représentées dans la région de Guelma. Elles sont formées essentiellement de marnes et de marno-calcaires.

Ces formations Barémiennes affleurent à environs 4 Km au Sud-Ouest de la ville de Guelma sur la rive droite de la Seybouse, ainsi que dans le ravin de Chabet El Biade, à proximité de Dra el Keroucha et à Djebel Bou Sba **(Vila et al, 1969)**. Elles sont recouvertes à l'Ouest par des grés ; alors qu'au Nord et à l'Est, elles sont recouvertes par les argiles gypseuses et les molasses du miocène ainsi que par les travertins pliocènes de Guelma.

b. Formations de l'Aptien

Elles affleurent à Koudiat Enchir, Djebel Djabana et à Bou Zitoun. Ces formations comportent des calcaires gris bleu parfois oolithiques en bancs atteignent parfois 6 mètres, sur lesquels viennent des calcaires gris bleu micritiques en bancs de plus en plus épais et contenant une riche faune représentée par des foraminifères **(De La Chavane, 1910)**.

c. Formations de l'Albien

Les formations de l'Albien affleurent sur le versant Sud-Est du djebel Bou Sba. Elles sont représentées par des marnes schisteuses noires ou grises. Ces marnes renferment de petits lits de calcaire micritique noirâtre et/ou verdâtre vers le sommet.

d. Formations du Cénomanien

Le Cénomanien débute par une alternance de petits bancs décimétriques de calcaire micritique verts et de marnes de même couleur. L'importance des niveaux de marnes vertes croit vers le haut de la série. Ce premier ensemble peut dépasser 50 mètres d'épaisseur. Les parties supérieures de cet étage deviennent plus marneuses et les bancs de calcaires micritiques sont

espacés de plus de 1 mètre, les teintes reste vertes. L'épaisseur de cet ensemble supérieur varie entre 10 et 20 mètres **(Lahonder, 1987)**, le Cénomanien affleure à l'Ouest de Djebel Bou Sba **(Vila, 1980)**.

e. Formations du Turonien

Le Turonien est représenté par des formations calcaires très réduites, renfermant des débris d'oursins, d'inocerames et de melobesiées, ces calcaires Turoniens affleurent au Kef Hahouner **(Raoult, 1974)**.

f. Formations du Coniacien

Les formations de cet étage sont difficiles a séparé des formations
Turoniennes, le Coniacien est représenté par des alternances de biomicrites et des marnes qui prennent de l'importance au sommet **(Lahonder, 1987)**.

g. Formations du Santonien

Le Santonien affleure à Djebel Bou Sba, il est représenté par des marnes feuilletés bleues à la base, surmonté par des marnes argileuses de teinte verdâtre **(Lahonder, 1987)**.

h. Formations du Sénonien (Campanien et Maastrichtien)

Le campanien : les formations de cet étage affleurent au Sud-Ouest de Guelma au niveau de Koudiat Djebissa, il débute par des marnes bleutées avec des niveaux de biomicrite, plus fréquents vers le sommet de la série, l'épaisseur est de l'ordre de 100 mètres.
Le Maastrichtien : affleure autour de Djebel Bou Sba, représenté par des marnes pyriteuses grises a bleues qui sont surmontées par des calcaires biomicritiques clairs **(Lahonder, 1987).**

II.9.1.3 Tertiaire

a. Formations du Paléocène

Représenté par des marnes noires à globigerina et globorotalia, cette formation affleure au- dessus des formations Maastrichtiennes du massif de Bou-Zitoune, l'épaisseur est de 20 à 25 mètres **(Lahonder, 1987).**

b. Formations de l'Eocéne inférieur et moyen

Au nord de la vallée de la Seybouse, au-dessus des couches du Paléocène inferieur à échinides affleure une assise importante de calcaires et de marno-calcaire de couleur gris bleue à noire, admettant en intercalation des lits à rognons de silex noir, (**Chavane (1910)) (Lahonder, 1987).**

c. Formations de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène

Elles sont représentées par des formations de type flyschs, avec leur faciès gréseux et argilo-gréseux habituel. Ces formations recouvrent de vastes étendues dans la région de Guelma. Elles

sont formées d'une manière générale, par un ensemble d'assises de grés plus ou moins grossiers et quartzeux et par des argiles souvent feuilletées et schisteuses, intercalées parfois, de bancs de quartzites et/ou de marno-calcaires en plaquettes **(Lahonder, 1987).**

d. Formations du Miocène

Les formations du Miocène sont largement représentées dans la région de Guelma. Le Miocène inférieur est représenté par des dépôts franchement marins (grès verdâtres glauconieux) ; alors que le Miocène moyen et supérieur sont successivement représentés par des dépôts laguno- marins, laguno-saumâtres et enfin fluvio terrestres (des marnes, des argiles et du gypse).

Les affleurements les plus importants des marnes gypseuses du Miocène moyen et supérieur s'observent sur les flancs des collines des localités dites Mechtat El Acheche et Belkheir se trouvant à environ 3 kilomètres au Sud-Est de Héliopolis qui domine la rive gauche de la Seybouse, où les marnes gypseuses du Miocène moyen et supérieur montrent leur plus grande puissance **(Boukrouh, 2009)**.

e. Formations du Pliocène

Dans le bassin de Guelma, le Pliocène est représenté par deux terrasses alluviales en étage :

- une terrasse représentée par des formations alluvionnaires à stratification horizontale, comportant principalement des galets roulés assez volumineux, noyés par endroits dans des limons rougeâtres.

Ces alluvions anciennes se relient au pied du massif gréseux d'El Houara à un important cône de déjection torrentiel et forment ainsi, le plateau du Djebel Zemzouma ;

- un deuxième niveau, représenté par deux faciès principaux, tous les deux continentaux ; le premier des alluvions et calcaires travertineux, comblent les ravins de la précédente terrasse dans le fond de la vallée de la Seybouse, le deuxième des alluvions du Pliocène constituées soit par des galets roulés assez volumineux appartenant en majorité aux formations du flysch gréseux.

II.9.1.4. Quaternaire

a. Formations du Pléistocène

Comme les formations du Pliocène, les formations du Pléistocène sont représentées dans cette région par des sédiments fluvio-continentaux. Elles montrent également, deux types de faciès: un faciès alluvionnaire (cailloux roulés de taille variables) et un faciès travertineux qui résultent des sources thermales.

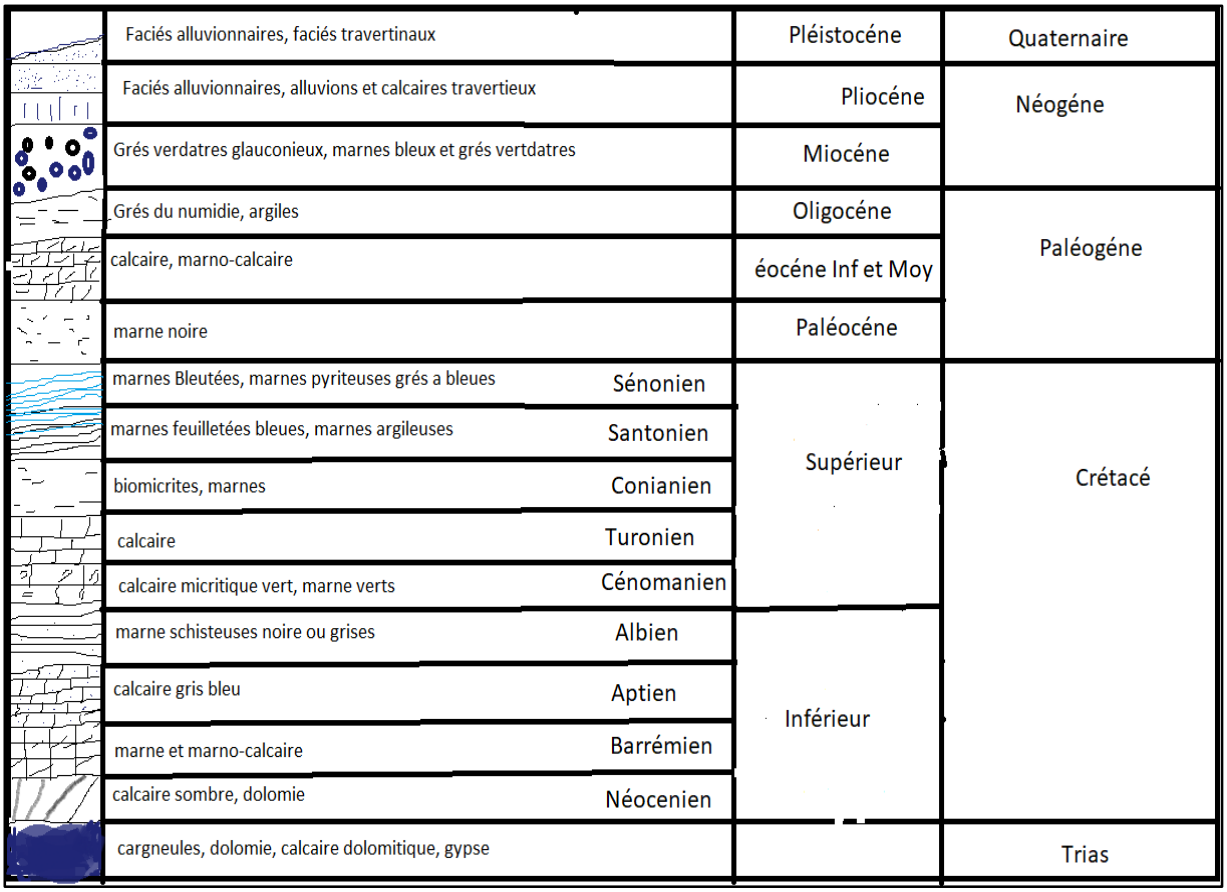


Fig.8. *Log litho stratigraphique synthétique de la région de Guelma*

II.10. L'étude tectonique

La région de Guelma, située entre le littoral et les abords des Hauts plateaux se caractérise par un dispositif structural assez complexe. C'est précisément dans cette zone que se sont manifestés successivement à toutes les époques avec le plus d'intensité les mouvements orogéniques qui ont affecté cette partie de l'Algérie.

Selon **Chavane (1910)**, les effets tectoniques dans la région de Guelma se sont manifestés surtout par des phénomènes de compression et de refoulement intense des plis qui sont en général déversés vers le Sud et le Sud-Est. Ces plis souvent empilés les uns sur les autres, se chevauchent et se recouvrent à la façon d'écailles imbriquées. Ce phénomène de structure écaillée est fréquent dans la chaîne atlasique. Dans ces plis déversés, les flancs inverses sont le plus souvent supprimés par compression et/ou par étirement.

- **Les plis**

Les mouvements tectoniques tertiaires et en particulier, les mouvements post-Eocène moyen, contemporains des mouvements pyrénéens, paraissent avoir été les plus importants dans cette région. Ils se sont manifestés par des alignements (plis ordinaires, plis déversés, plis imbriqués, dômes en chapelet, affleurements anormaux de Trias en lame et en ellipse à orientation Est- Ouest, légèrement courbés dans la direction Sud Ouest-Nord Est.

Dans la région de Guelma, les plis d'orientation Est-Ouest sont représentés au niveau de la chaîne du Taya-Debagh et qui se prolongent vers l'Est par le massif du Bou Zitoun et du djebel El Haouara. Quant aux alignements Nord-Sud, la boutonnière barrémienne de Guelma et celle du djebel Bou Sba montre un exemple fort démonstratif. Un autre alignement s'observe plus à l'Est, et sa direction paraît être indiquée par les affleurements triasiques du djebel Tifech, de Ras El Alia, de Hammam N'Baïl's et du massif du Nador. Cette transformation successive des tronçons de plis de direction Est-Ouest vers le Nord, détermine la direction générale des lignes orographiques qui sont sensiblement Sud Ouest-Nord Est.

- **Contacts anormaux**
  - *Les contacts par failles :* ce type de contacts par failles s'observent généralement, autour des dômes et des brachy-anticlinaux constitués par les calcaires récifaux Eocènes et Crétacés de la chaîne du Taya-Debagh. A titre d'exemple, dans les massifs du Taya et djebel El Grar, suite à l'effondrement de la partie centrale du dôme de calcaires récifaux, les retombées périphériques de ce dôme s'observent reposant en discordance sur les assises marneuses du Barrémien.
  - *Les chevauchements :* ce type de contact est induit d'une part, par le déversement des plis (cas du chevauchement par pli déversé dans le massif de Djebel Bou Sba) et d'autre part, par la montée diapirique des formations du Trias, qui traversent des terrains de différente nature et de différents âges (depuis le Lias jusqu'au miocène).Ces accidents favorisent la remontée diapirique des masses marno-gypsifères du Trias.
- **Discordances**

Les discordances de la région de Guelma sont essentiellement représentées par la discordance des flyschs sur les formations crétacées et miocènes et la discordance des formations pliocènes sur les formations du Miocène supérieur.

II.11. Conclusion

La région de Guelma fait partie des zones externes (Domaine tellien), où on peut distinguer trois ensembles de formations :

1- Domaine Post-nappes (formations récentes) : comporte les alluvions quaternaires, les travertins du bassin de Guelma, les travertins du bassin d'Ain Makhlouf et les calcaires lacustres (Mio-Pliocène) ;

2- Domaine allochtone : représenté par les formations numidiennes, les formations Ultra-telliennes, les formations telliennes à Globigérines et à Nummulites et les calcaires yprésiens ;
3- Domaine Para-autochtone : regroupe les formations de Sellaoua et les formations néritiques.

Chapitre III

Caractéristiques climatiques et hydrogéologiques

III.1. Introduction

L'étude hydro climatologique occupe une place très importante dans chaque étude hydrogéologique car elle nous permet d'évaluer les effets des fluctuations climatiques sur les apports d'une part et les écoulements d'autre part. Elle est indispensable pour évaluer l'alimentation des ressources hydriques et des réserves souterraines.

Dans ce présent travail, nous examinerons seulement les facteurs qui conditionnent les apports aux différents systèmes aquifères, et qui nous permettent également l'établissement du bilan hydrologique. Nous essayons de faire une synthèse hydrogéologique régionale et même locale où nous identifions les différents systèmes aquifères constituants la région quel que soit leurs origine (superficiels ou profonds), ou leurs constituants (poreux, fissurés ou karstique).

III.2. Aperçu sur le climat de la région étudiée

La région de Guelma est caractérisée par un climat de type méditerranéen caractérisé par hiver doux et printemps et automne souvent humides et été sec.

III.3. Localisation de la station météorologique du barrage de Bouhamdane

La station de Bouhamdane est située dans la commune de Bouhamdane, cette dernière est située à l'Ouest de la wilaya de Guelma, elle est bordée au nord par la commune Roknia au sud par la commune de Houari Boumédiéne, à l'est par la commune de Medjez Amer et Hammam Debagh, et à l'ouest par la commune de Bouhamdane.

III.4. Les précipitations

On englobe sous le terme de précipitations, toutes les eaux météoriques qui tombent à la surface de la terre, tant sous forme liquide (pluie, bruine) que solide (neige, grêle).C'est également l'élément le plus important du cycle de 1'eau. Les précipitations sont une influence sur les eaux de surface que ce soit en termes de ruissellement ou d'altération. Dans notre cas d'étude on est intéressé seulement par les précipitations liquides.

III.4.1. Précipitations annuelles et interannuelles

Pour l'étude des précipitations moyennes mensuelles nous avons basé sur les données pluviométriques fournies par la station du barrage de Bouhamdane pour une période de 19 ans (2000 - 2019). L'analyse de l'histogramme de variation inter-annuelle des précipitations montre un grand écart entre l'année la plus arrosée (2002/2003) avec 845mm et l'année la plus sèche (2016/2017) avec 200mm. Le module pluviométrique est de l'ordre de 559,44mm

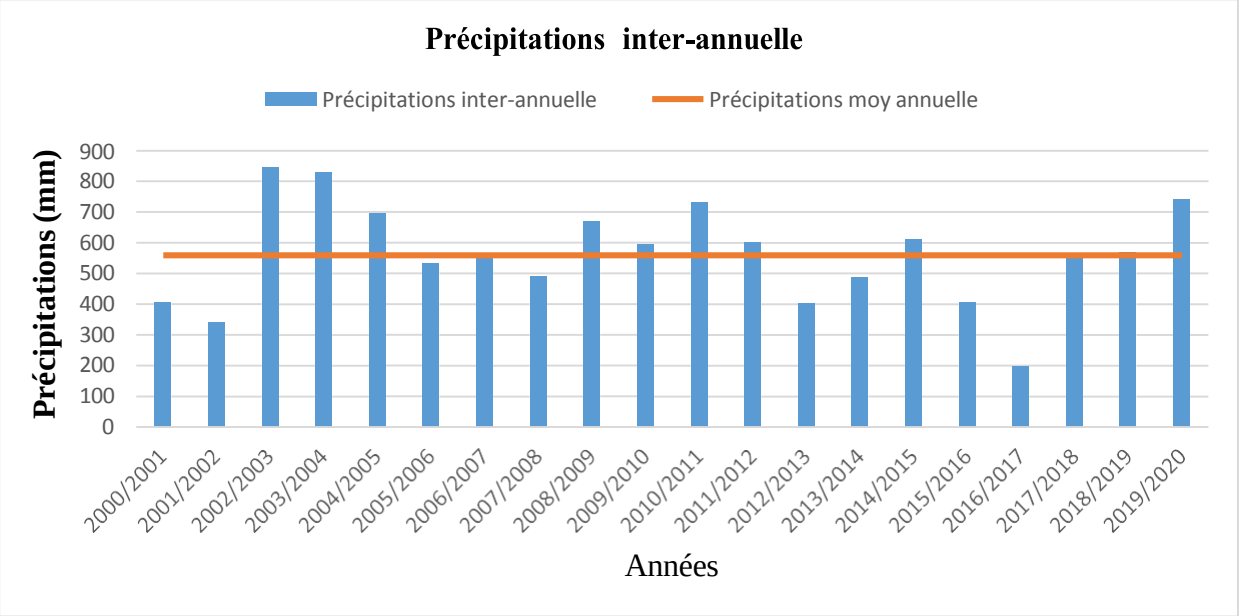


Fig.9. *Variation inter-annuelle des précipitations à la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)*

III.4.1.1. Précipitations moyennes saisonnières

L'étude des précipitations saisonnières permet de donner une idée sur la distribution de la lame d'eau précipité durant une année et selon les quatre saison .Elle se fait de la façon désignée dans le tableau.01:

Tab.01. *Précipitations moyennes saisonnières*

	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Moyenne annuelle
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
P (mm)	143,67			230,93			157,88			26.96			559,44
P (%)	25,68			41,27			28,22			4,77			100%

On en remarque un maximum pluviométrique hivernal (de Décembre à Février), donc la saison la plus arrosée est l'Hiver tandis que l'Eté représenté la saison la plus sèche.

III.4.1.2. Précipitations moyennes mensuelles

La courbe de variation des précipitations moyennes mensuelles (2000-2019) montre que

- Le mois le plus arrosé est le mois de janvier avec une précipitation moyenne mensuelle de 80.8mm
- Le mois le plus sec est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de 3.47mm

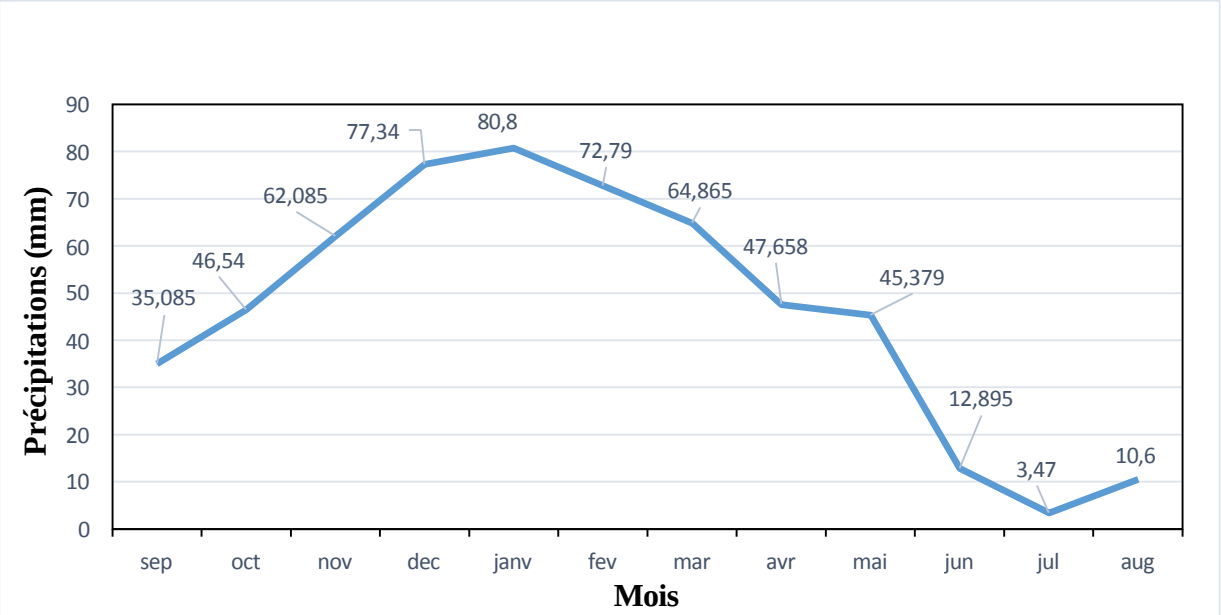


Fig.10. *Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)*

III.4.2. Les températures

La température est un facteur très important, régissant le phénomène d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. C'est un paramètre ayant une grande influence sur le bilan hydrologique, elle constitue l'autre élément majeur conditionnant le climat de la région.

III.4.2.1. Températures moyennes mensuelles

D'après la courbe de variation des températures moyennes mensuelles, on a constaté que les mois de janvier et février sont les mois le plus froids de l'année avec des températures de 8.14 et 8.89°C respectivement tandis que les mois les plus chauds sont juillet et août avec respectivement 29 et 28.44°C.

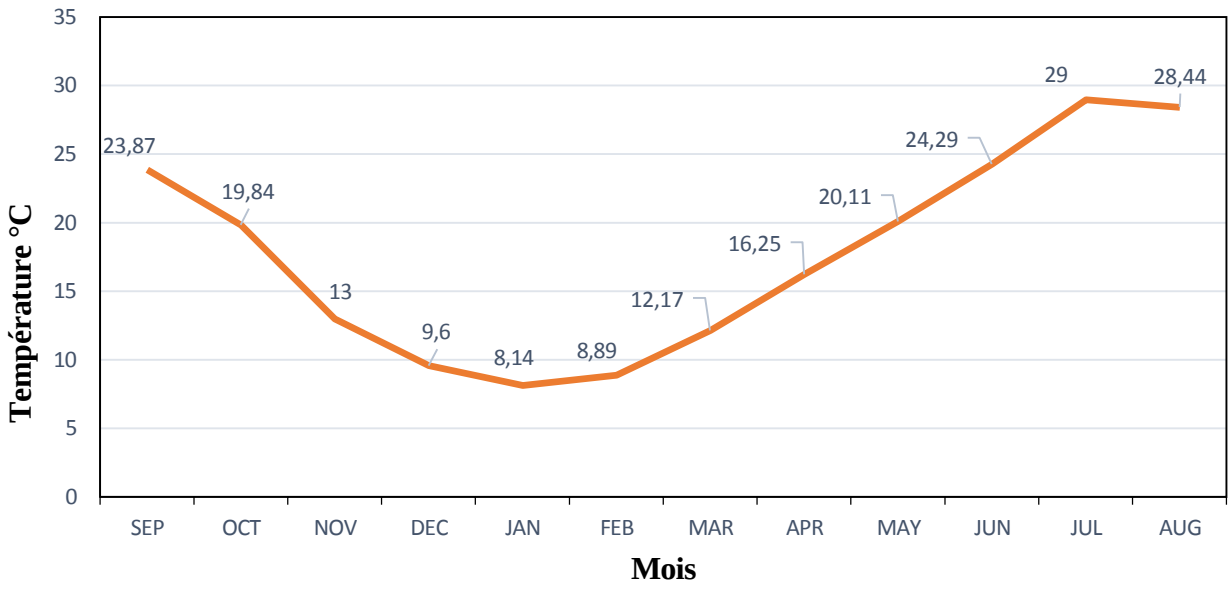


Fig.11. *Variation des températures moyennes mensuelles de la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)*

III.5. Diagramme pluviothermique

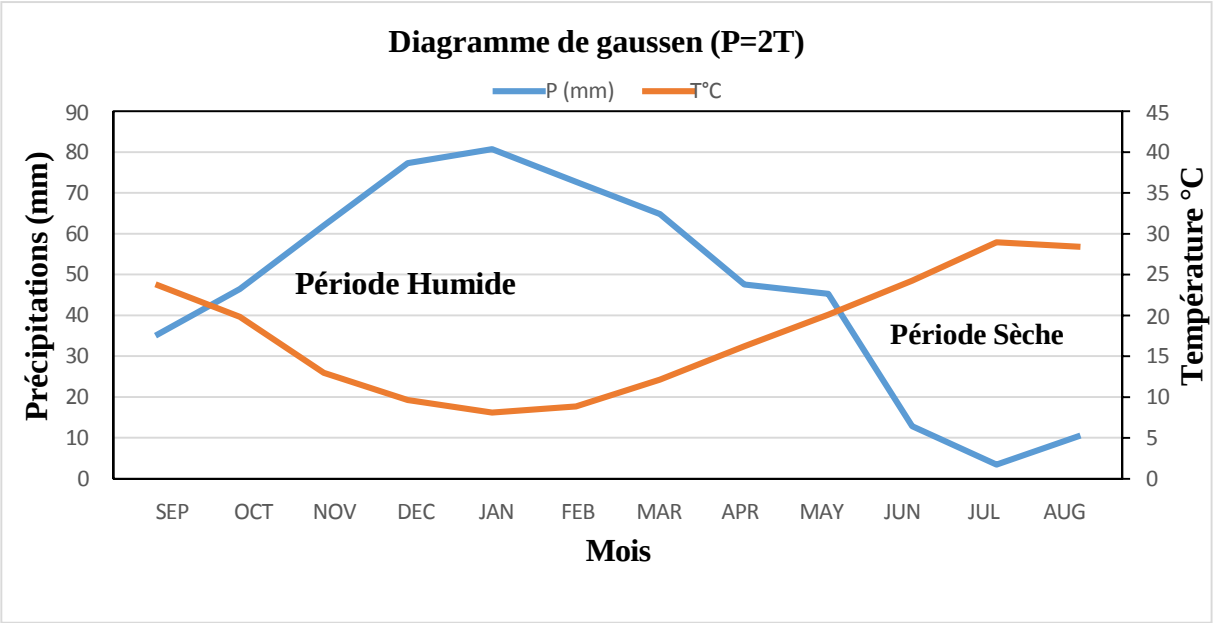


Fig.12. *Diagramme Pluviothermique de la station du barrage de Bouhamdane (2000-2019)*

Selon Bagnouls et Gaussen (1953), un mois est dit sec si, "le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades"; cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes pluviothermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

L'analyse de la représentation graphique des données de notre station (Fig12), nous a permet de distinguer deux périodes :

- L'une sèche qui s'étale de la fin du mois de Mai jusqu'au début mois de Octobre
- L'autre hivernale (humide), s'étale du mois de Octobre jusqu'aux la fin du mois de Mai

III.6. Bilan hydrique

Le bilan hydrique exprime le processus qui suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de s'évaporer dans l'atmosphère, il est pour objectif de comptabiliser les apports et les pertes en eau de surface.

L'expression générale du bilan est la suivante: **P = R+ETR+I** où

- ETR : l'évapotranspiration réelle (mm) ;
- R : ruissellement (mm);
- I : infiltration (mm);
- P : précipitation (mm).

III.6.1. Détermination des paramètres du bilan

III.6.1.1. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un élément principal du bilan hydrique, il est défini par combinaison de deux phénomènes l'un physique (évaporation) et l'autre biologique (transpiration), ils désignent les pertes en eau par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Il existe deux types d'évapotranspiration: potentielle (ETP) et réelle (ETR).

a. Evapotranspiration potentielle (ETP)

C'est la somme des quantités d'eau qui pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie en considérant des apports d'eau suffisants. ETP est estimée par la formule de « C.W.Thornthwaite » proposée en 1948 et basée essentiellement sur les températures de l'air

$$\mathbf{ETP = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^{a}}$$

Où :

ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle en (mm).

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en (°C).

I : Indice thermique annuel : $I = \sum i$.

i : indice thermique mensuel : $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$.

a : l'exposant climatique donné par la formule : $a = \left(\frac{1.6}{100}\right) I + 0.5$

Pour apporter des corrections aux valeurs de l'ETP, il faut les multiplier par un Facteur correctif K qui dépend de la latitude.

b. Evapotranspiration réelle (ETR)

Les pertes d'eau d'un sol atteignent l'ETP si le stock d'eau de la réserve facilement utilisable (RFU) lui est supérieure ou égale, en cas d'insuffisance elles sont limitées à une quantité plus petite, cette limite est appelée l'évapotranspiration réelle (G. Castany).

L'estimation est faite à partir des formules de Turc et de Thornthwaite:

✓ **ETR selon la formule de "Turc"**

Cette formule est basée sur les températures et les précipitations moyennes annuelles et on a :

$$\boldsymbol{ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}}$$

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).
L : Pouvoir évaporant : **L** = 300 + 25**T** + 0.05 **T**^{3}.
T : température annuelle moyenne en C°.
Application

P = 559.51 mm

T = 17,81 C°

L = 1027,71

ETR = 513,31 mm

✓ **ETR selon "C.W.Thornthwaite"**

- Si ETP > 0 : → P > ETP → ETR = ETP
- Si P - ETP < 0 : → P < ETP

  Ce dernier cas est subdivisé en deux cas:

- P+RFU > ETP → ETR = ETP
- P+RFU < ETP → ETR = P+RFU

III.6.1.2. Le ruissellement (R)

D'après Tixeront et Berkaloff, le ruissellement est estimé par la formule suivante: $R = \frac{P^3}{3ETP^2}$

R : ruissellement (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

Ce qui donne: **R** = 65,71 mm L'inconvénient de cette formule, c'est qu'elle ne tient pas en considération les propriétés physiques du sol ou des formations traversées.

III.6.1.3. L'infiltration (I)

L'infiltration est calculée par la formule: **I = P – (ETR + R) ou I = EX – R**

L'application numérique: **I =** 189,45 mm, ce qui correspond à environ 33,85% des précipitations.

III.6.2. Etablissement du bilan hydrique

En admettant que la réserve facilement utilisable (RFU) est égale à 100 mm (saturation), les résultats précédemment obtenus nous ont permis d'établir le bilan hydrique, la synthèse finale de l'étude climatique. Le tableau.2. Résume le bilan de C.W.Thornthwaite de la station du barrage de Bouhamdane (2000-2019) :

***Tab.2**. Bilan hydrique de la station du barrage de Bouhamdane (2000/2019)*

	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	ANN
T°C	23,88	19,84	13	9,67	8,15	8,89	12,17	16,26	20,12	24,29	29,01	28,44	17,81
P (mm)	35,09	46,54	62,09	77,34	80,8	72,79	64,87	47,66	45,38	12,9	3,47	10,6	559,44
i	10,67	8,061	4,251	2,71	2,095	2,39	3,846	5,96	8,23	10,95	14,32	13,9	/
ETP (mm)	107,8	75,9	34,03	19,4016	14,01	16,53	30,01	51,98	77,9	111,4	156	150,3	845,35
a	1,898												/
I	87,39												/
k	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETPc (mm)	111	73,62	29,26	16,29	12,19	14,05	30,91	57,18	94,26	135,9	193,5	174,4	942,61
RFU		0	32,82	93,86	100	100	100	90,48	41,61	0	0	0	558,77
Da	72,73	29,36	4,764	3,10	1,82	2,48	-0,9	4,31	32,52	98,54	152,6	139,7	541,01
Ws	0	0	32,82	61,04	68,61	58,74	33,95	0	0	0	0	0	255,16
ETR (mm)	35,09	46,54	29,26	16,29	12,19	14,05	30,91	47,66	45,38	12,9	3,47	10,6	304,35

Les résultats obtenus du bilan hydrique de C.W.Thornthwaite nous ont permis de tirer les observations suivantes :

- ✓ La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 559,44 mm et une température moyenne annuelle de 17,81 °C.

- ✓ L'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son maximum au mois de Juillet 193.5 mm et son minimum au mois de Janvier 12.19 mm. L'ETP total est de l'ordre de 942.61 mm.

- ✓ L'Evapotranspiration réelle (ETR) totale est de 304.35 mm.
- ✓ Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine, il y a un surplus d'eau accompagné d'un ruissellement et quand elle a la tendance à se diminuer et au point qu'il sera carrément vide, il y aura un épuisement du stock et par conséquent un déficit agricole s'étalant du mois d'avril jusqu'au mois d'Octobre avec une moyenne annuelle de 541.01 mm.
- ✓ La reconstitution de la RFU atteint son maximum (saturation : 100 mm) au mois de janvier et reste ainsi jusqu'au mois de mars puis elle commence à s'épuiser pour se vider complètement au mois de Juin.
- ✓ L'écoulement débute après le remplissage de la RFU (100 mm), au mois de Janvier et se termine à la fin du mois d'avril avec un maximum au mois de Janvier 68.61 mm et un minimum au mois de novembre de l'ordre de 32.82 mm.

III.7. Les ressources en eau de la région de Guelma

III.7.1. Les ressources superficielles

Les principales ressources des eaux superficielles sont représentées par les oueds : Seybouse, Bouhamdane, Oued Mellah, Charaf. Avec l'existence de deux barrages, le barrage de hammam Debagh d'une capacité de 220 HM³Les ressources souterraines

III.7.1.1. La nappe alluvionnaire de Guelma

Elle est située dans la vallée de l'Oued Seybouse en grande partie sur sa rive droite. Elle est traversée par l'Oued Seybouse d'Ouest en Est, depuis Medjez Amar jusqu'à Nador. C'est une zone d'effondrement comblée par des dépôts Miocènes qui forment le substratum (argiles et marnes à gypses) et quaternaires (alluvions hétérogènes sous forme de terrasses).

Ces alluvions sont perméables et sont alimentés par les eaux d'infiltrations des pluies et les apports latéraux du bassin versant de l'Oued Seybouse. Elle est constituée de trois terrasses distinctes (basse, moyenne, et haute) **(Bouaicha, 2018)**.

- La basse terrasse (terrasse actuelle) : C'est la vallée dans laquelle coule l'actuel Oued Seybouse. Elle est formée de graviers, de sable et de galets. Cette partie est exploitée par des puits ordinaires de quelques mètres de profondeur.
- La moyenne terrasse : Elle est constituée d'éléments détritiques relativement fins en alternance avec des passées argileuses. Le substratum est toujours marneux à gypseux.
- La haute terrasse : Elle est située au Sud de la moyenne terrasse et formée d'alluvions grossières Plio-quaternaires (galets, graviers, grès, sables et quelques passées argileuses) perméables.

III.7.1.2. La nappe des calcaires néritiques et sénoniens d'Héliopolis

Cette nappe est recouverte par la nappe tellienne et ultra telliennes. Formé essentiellement par les calcaires. Elle recèle une karstification très intéressante (située à des profondeurs variables entre 50 et 350 m), du point de vue étude et exploitation du système, cette aquifère est exploité à ce jour par une dizaine de forages avec un débit total de 357 l/s.

III.7.1.3. La nappe des calcaires éocènes de Sellaoua Announa - Ras El Agba

Les calcaires sont les formations dominants, ils font partie des séries telliennes. En distingue de haut en bas l'alternance :

1- Marnes grises d'âge Paléogène.

2- Calcaires massifs d'âge Eocène.

3- Marnes à débris d'âge Lutétien

Cette nappe est exploitée par un ensemble de forages qui donnent un débit de l'ordre de 30l/s, il est proche de celui donné par **Gaud (1976)**, estimé à 25 l/s.

III.7.1.4. La nappe des formations carbonatées de la région d'Ain Larbi- Bou Hachana

Les logs stratigraphiques des forages indiquent la présence de zones fissurées et karstifiées bien développées entre 70 et 100 m de profondeur en moyenne d'après les pertes des boues et l'absence de remontée des cuttings durant l'exécution des forages. Ces formations carbonatées constituent un aquifère important, qui alimentait la ville de Guelma avant l'exploitation des eaux du barrage de Hammam Débagh. L'ancienne source de Halia débitait près de 100 l/s avant la réalisation des premiers forages.

III.8. Les sources thermales de la région de Guelma

III.8.1. Sources thermales de Hammam Ouled Ali

La source thermale de hammam Ouled Ali situé au nord du Guelma caractérisée par des formations néritiques et la présence d'un affleurement transgressif marno-calcaire et schistes noirs, d'âge Sénonien (Fig.13). La source chaude de hammam Ouled Ali se trouve dans un couloir paléogéographique d'accident tectonique (Elle sort le long de la ligne de faille) **(Delga, 1955).** Cette source présente plusieurs griffons qui accompagnent le griffon principal est caractérisés par un débit de **119** l/s **(DRE Guelma, 2011)**.

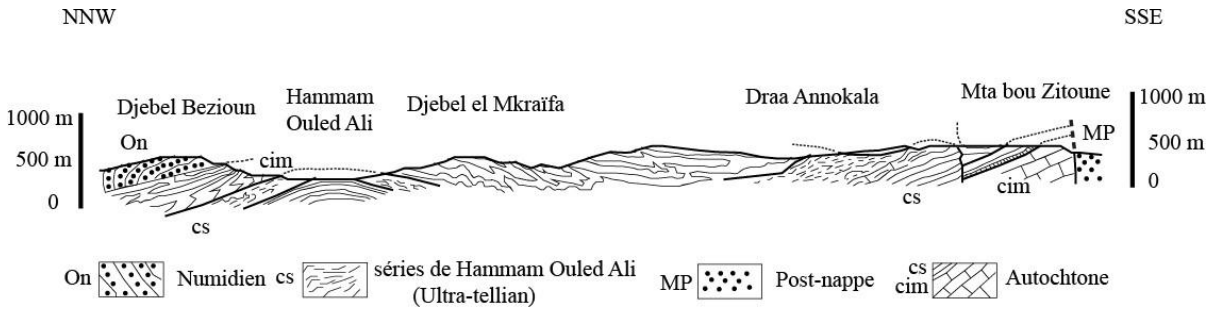


Fig.13. *Coupe géologique de Hammam Ouled Ali (Vila, J. M, Busnardo R., Devries A., Magne J. et Sigal J. 1968)***.**

III.8.2. Sources thermales de Hammam Debagh

Les études hydrogéologique la région de Hammam Debagh, ont permet de distinguer plusieurs sources thermales **(Deleau, 1938, 1952; Dib 1985; Issaâdi, 1992; Verdeil, 1974)**. Ces sources se trouvent dans les formations calcaires de l'Aptien, les marno-calcaires du Sénonien jusqu'au Jurassique dolomitique en profondeur. D'après Deleau in Dib (1985) cette source sort à travers une faille de direction N20°E (Fig.14), cette faille permettre le jaillissement de l'eau, avec des débits importants, avec un débit total de l'ordre de **77.5** l/s pour les 16 griffons **(DRE Guelma, 2013).**

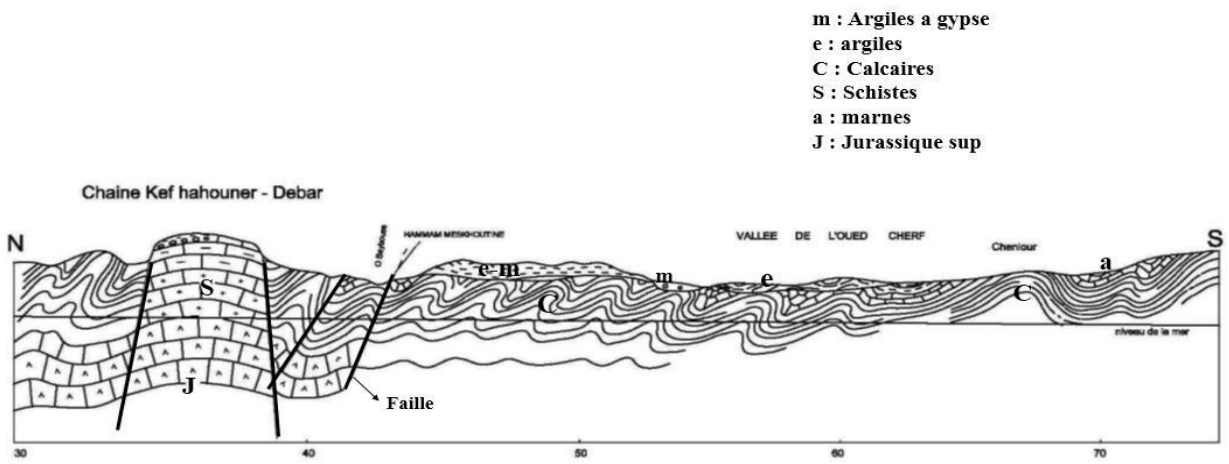


Fig.14. *Coupe géologique de la région de Hammam Debagh* ***(in Dib 1985)****.*

Fig.15. *Photo De la source thermale et un griffone de Hammam Debagh*

III.8.3. Sources thermales de Hammam Belhacheni

Les sources de H. Belhacheni, s'observent dans les formations des calcaires blancs d'âge Yprésien, Lutétien inférieur, émergent dans un terrain de travertins et de tufs quaternaires. L'analyse structurale a montré l'existence d'une faille ou pli-faille qui favorise le traverssement de l'eau dans les fissures des massifs calcaires, on observe dans ces accidents tectoniques les formations : marnes noires et d'argiles grises à gypses parfois rougeâtre à conglomérats. Le débit des sources est estimé à **15** l/s, avec des eaux incolores et une odeur de soufre (dégagement de H2S) **(Dib, 1985).**

Fig.16.*Photo De la source de Hammam Belhacheni.*

III.8.4. Sources thermales de Hammam Guerfa

Les sources thermales de Hammam Guerfa sont caractérisée par des tufs hydrothermaux du Quaternaire avec une pente importante. L'eau de ces sources sort avec une couleur rouge indiquant la présence des particules argileux. Les eaux de ces sources ont les mêmes caractéristiques

organoleptiques que celles de Hammam Belhacheni. Le débit total des sources est de l'ordre de **11**l/s.

III.9. Conclusion

La région de Guelma possède un climat de type méditerranéen caractérisé par des hivers doux et subhumides, des printemps et des automnes souvent humides et des étés secs. La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 559,51 mm. L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR) déterminées par la méthode de Thornthwaite, sont respectivement égales à 942,13mm et 304,35 mm. Le ruissellement (R) estimé par la formule de Tixeront-Berkaloff est de 65,71 mm et l'infiltration (I) est de l'ordre de 189,45 mm, ils représentent successivement 11,74% et 33,85%des précipitations moyennes annuelles.

L'étude hydrogéologique a montré que la région de Guelma est riche en termes de ressources en eau, que ce soit souterrain ou de surface.

Les ressources souterraines sont représentées par la présence de quatre nappe aquifères qui sont : la nappe alluvionnaire de Guelma, La nappe des calcaires néritiques et sénoniens d'Héliopolis, la nappe des calcaires éocènes de SellaouaAnnouna - Ras El Agba et la nappe des formations carbonatées de la région d'Ain Larbi- Bou Hachana.

Les ressources en eau de surface sont représentées par les oueds de Sybouse, Bouhamdane, Mellah et Charaf.

La région de Guelma est caractérisée aussi par la présence de plusieurs sources thermales et qui ont données à la région une autre dimension particulièrement pour l'aspect touristique.

Chapitre IV

Matériels et méthodes

IV.1. Introduction

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages tels que la thérapie, l'industrie…etc. En raison de l'utilisation multiple dans le domaine thérapeutique de ces eaux, cette étude a été menée afin d'évaluer l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans l'espace en étudiant la variabilité de ses paramètres physico-chimiques.

IV.2. Prélèvement d'eau pour les analyses chimiques

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté ; il conditionne cependant les résultats analytiques et leur interprétation. L'échantillon doit être homogène représentatif et obtenu sans modifier les caractères physico-chimiques de l'eau **(Rodier, 2005)**.

Une seule compagne de prélèvement des échantillons des eaux des sources thermales a été effectuée au mois de mars 2022 pour neuf (09) sources. Les prélèvements ont été faite dans des bouteilles en verre .Au moment de l'échantillonnage les bouteilles et leur bouchons sont lavés trois fois avec de l'eau à analyser pour éviter toute contamination des échantillons, puis remplis complètement puis bouchées tout en évitant la formations des bulles d'air.

IV.3. Choix et localisation des stations de prélèvements

Dans le cadre de l'évaluation de l'état chimique des eaux des sources thermales, vis-à-vis des conditions géologiques et des zones d'émergence de ces sources, nous avons échantillonné chaque source thermale, afin d'évaluer l'homogénéité des eaux de chaque source, d'avoir l'influences des accidents tectoniques et l'impact des activités touristiques l'état initiale des eaux des sources (Fig.17).

IV.3.1. Localisation des points de prélèvement

Pour la localisation des points d'eau, nous avons utilisé deux outils : le GPS et Google Earth.

- **Le GPS « Global Positioning System » ou le système de positionnement global** :

C'est un appareil de pointe qui permet de donner la position exacte en 3 dimensions : (latitude X, longitude Y et l'altitude Z) du lieu au niveau duquel on se trouve et où l'on a effectué la mesure ou l'échantillonnage (Fig.18).

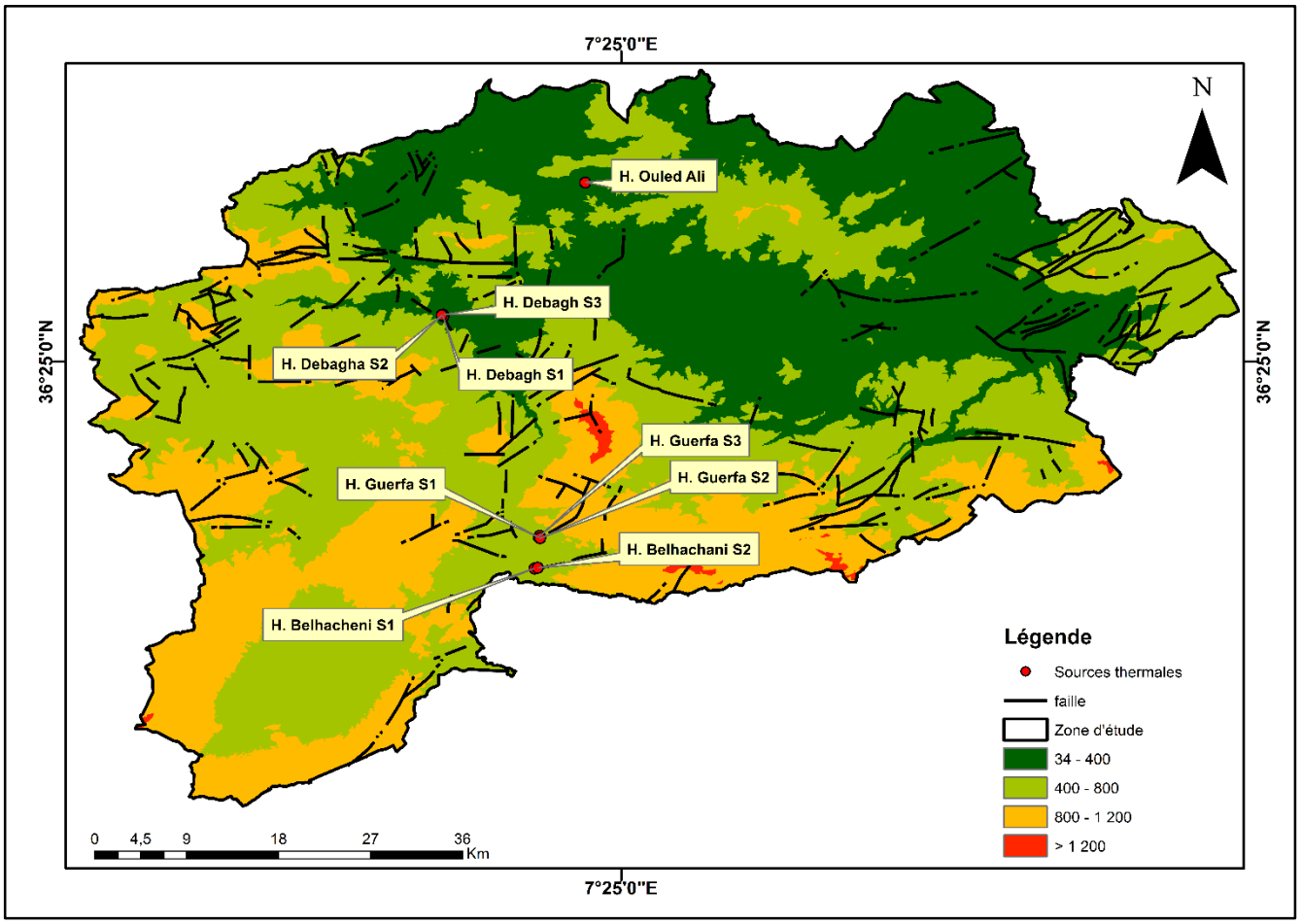


Fig.17. *Inventaire des points de prélèvement des sources thermales de la région de Guelma (mars 2022)*

Fig.18. *photo représentatif d'un GPS de marque GARMIN.*

IV.4. Mesures des paramètres physico-chimiques et des éléments chimiques

IV.4.1. Les paramètres physico-chimiques (mesure in situ)

La température, pH, la conductivité électrique, sont des paramètres très sensibles aux conditions du milieu et susceptibles de varier dans des proportions importante s'ils ne sont pas mesurés in situ.

Ainsi à chaque prélèvement ces paramètres sont mesurés in situ par des appareils étalonnés appartenant au laboratoire de Génie Géologique de l'Université de Jijel (Fig.19), qui possède des électrodes utilisés pour la mesure de la température, de pH et la conductivité.

Thermomètre numérique	Conductimètre	pH mètre

Fig.19. *Appareillage utilisé pour mesurer les paramètres physiques in-situ*

IV.4.2. Les éléments chimiques (analyses au laboratoire)

IV.4.2.1. Dosage des bicarbonates (HCO_3^-) par méthode volumétrique

Cette méthode d'analyse est basée sur, la mesure exacte du volume de la solution du réactif, de la concentration et la préparation d'une solution titrée. La concentration d'une solution aqueuse contenant un acide ou une base est déterminée par le dosage volumétrique. Pour y parvenir, on réalise une réaction acido-basique, que l'on choisit généralement rapide et la plus totale possible. A l'équilibre, les réactifs acides et basiques sont mélangés dans des proportions stœchiométriques déterminées par l'équation de la réaction utilisée.

Si Ca et Cb sont respectivement les concentrations des solutions d'acide et de base réagissant et Va et Vb les volumes de monoacide et de base mélangés à l'équivalence, on a la relation : CaVa = CbVb.

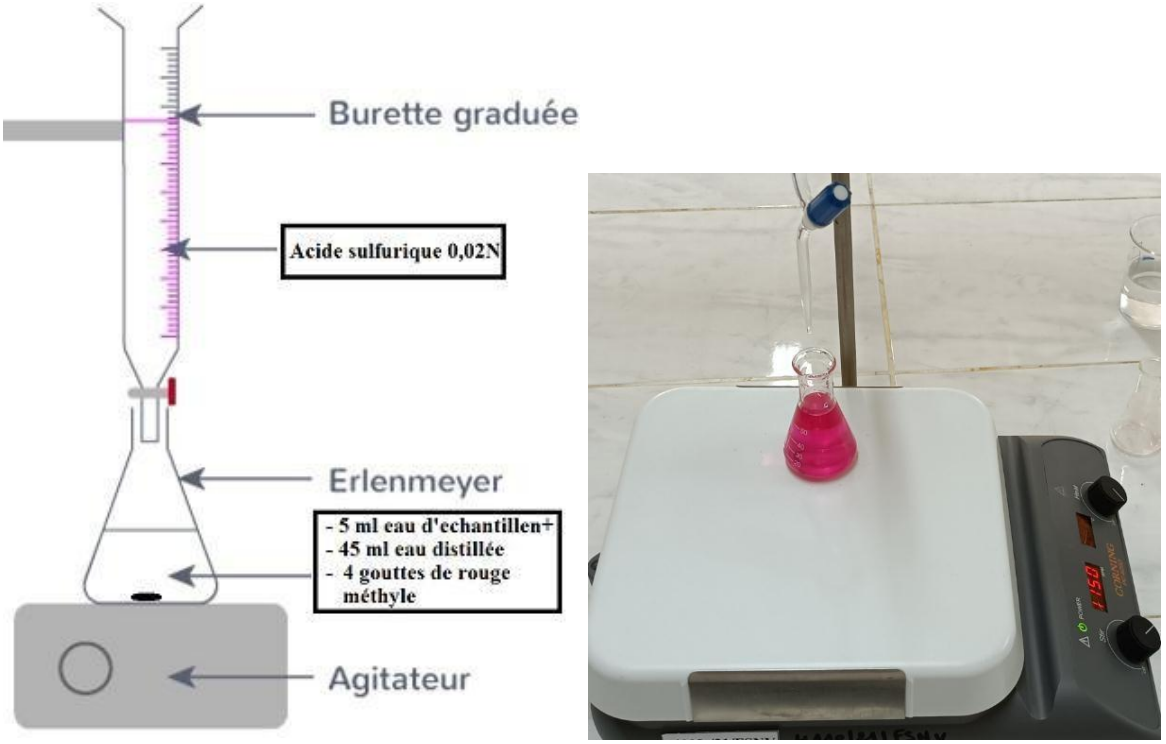


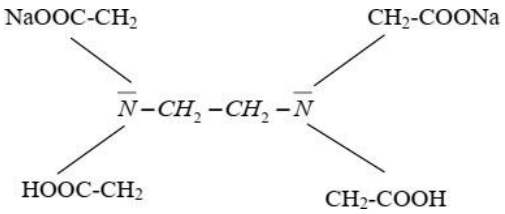
Fig.20. *Méthode de dosage des bicarbonates.*

Cette relation traduit l'équivalence acido-basique. Pour déterminer expérimentalement la fin du dosage, nous utilisons :

- Soit un pH-mètre.
- Soit le virage d'indicateurs colorés judicieusement et précisément choisis dont la variation du pH à l'équivalence soit brusque.

IV.4.2.2. Dosage de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) par méthode compléxometrique

La méthode compléxométrique par (E.D.T.A) est appliquée pour le dosage du TH et de calcium. L'agent complexant utilisé est l'acide éthylène diamine tétracétique (E.D.T.A), de formule suivante :



L'E.D.T.A, complexe quantitativement le Ca^{2+} et Mg^{2+} selon la réaction de compléxation suivante :

$$M^{2+} + H_2Y^{2-} \Rightarrow MY^{2-} + 2H^+$$

$M = Ca^{2+}$ ou Mg^{2+}

MY^{2-} = Complexe (M^{2+}- E.D.T.A)

La libération des protons H^+ montre que la position de cet équilibre est en fonction du *pH*. Celui-ci doit être fixé par addition d'une solution tampon.

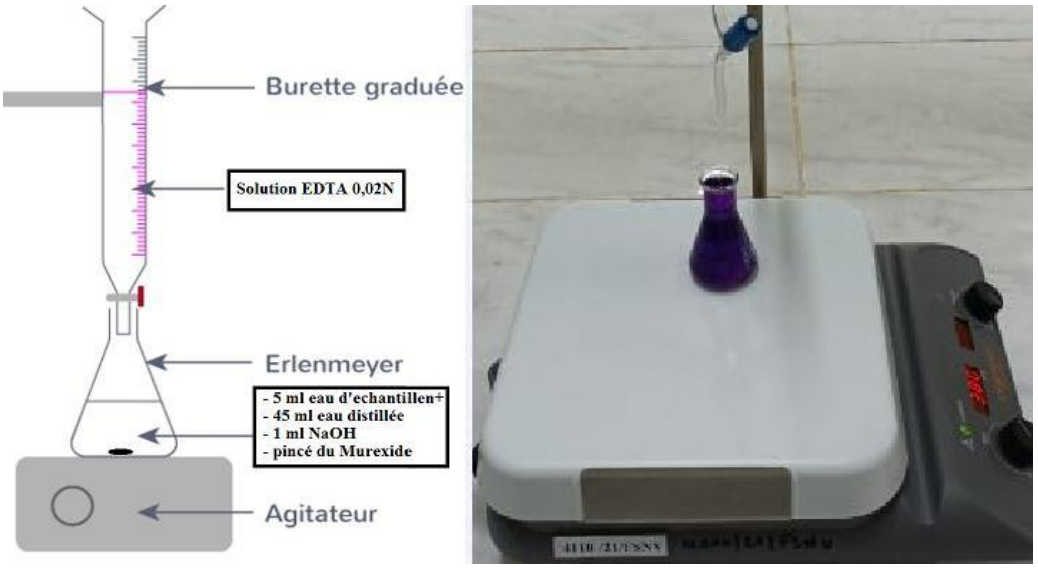


Fig.21. *Méthode de dosage de calcium.*

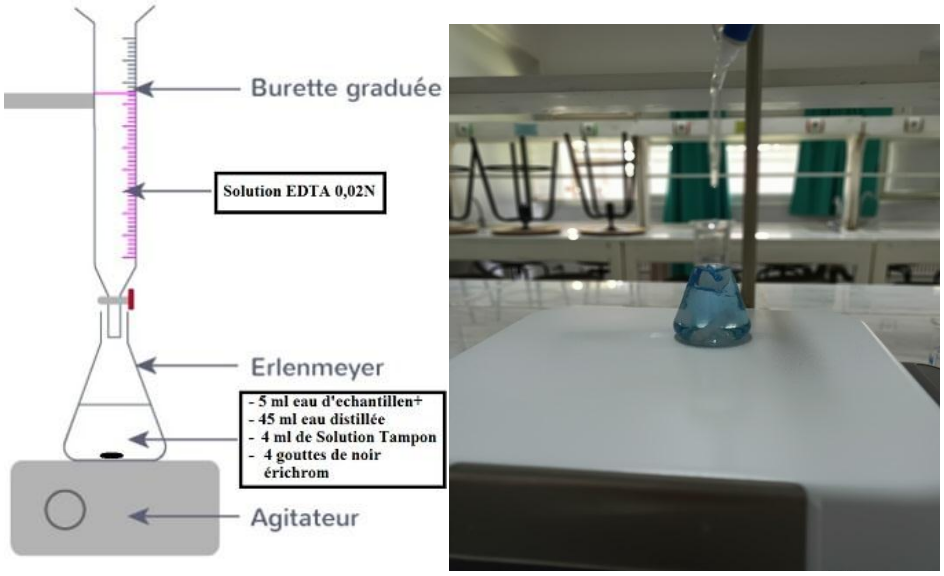


Fig.22. *Méthode de dosage de la dureté (TH).*

IV.4.2.3. Dosage des chlorures (Cl^-) par la méthode de Mohr

La méthode de Mohr est une méthode de titrage des chlorures. Elle consiste en un dosage argentimétrique des ions chlorures par le nitrate d'argent en présence de chromate de sodium. Ce dernier est l'indicateur coloré qui réagite en fin de dosage pour former le chromate d'argent, apparaissant comme un précipite rougeatre.

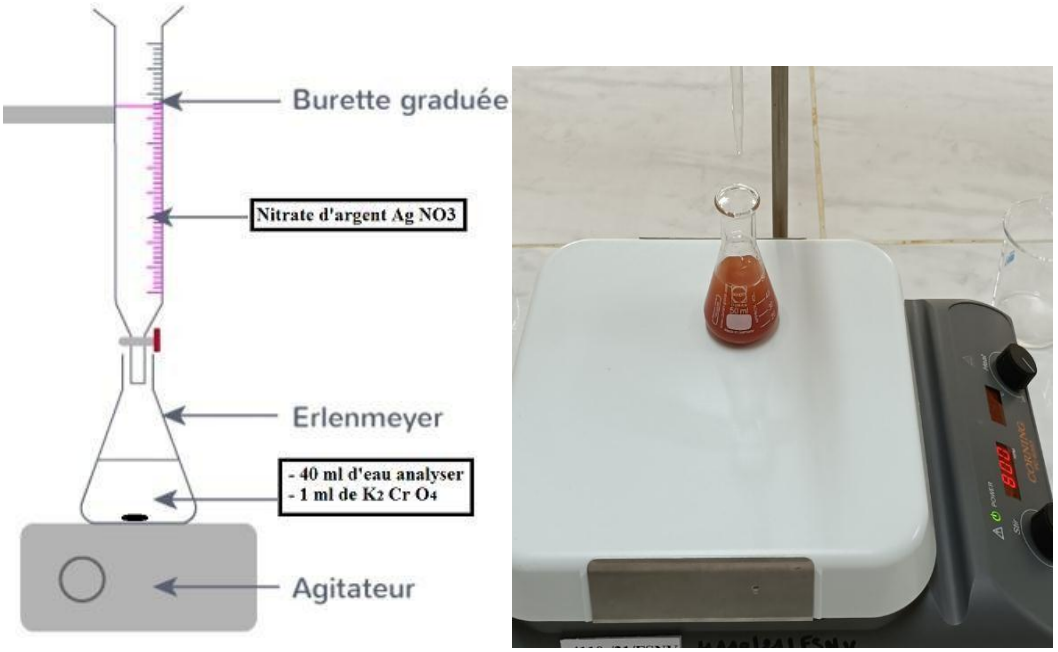


Fig.23. *Méthode de dosage des chlorures.*

IV.4.2.4. Dosage de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) par le spectrophotomètre a flamme

La spectrométrie d'absorption atomique à flamme SAAF, c'est une technique de dosage d'éléments chimique (Na, K, Li...) fondée sur le mesurage de l'absorption de rayonnements photoniques spécifiques par des atomes en phase vapeur dans une flamme**. (Glass and glassware)**

Fig.24. *Spectrophotomètre à flamme*

IV.4.2.5. Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) par spectrométrique

C'est une méthode analytique quantitative et qualitative qui consiste à musere l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donné, généralement en solution. Plus l'échantillon est concentré, plus il absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert.

La densité optique des échantillons est déterminée par un spectromètre préalablement étalonné sur la longueur d'onde d'absorption de la substance à étudier.

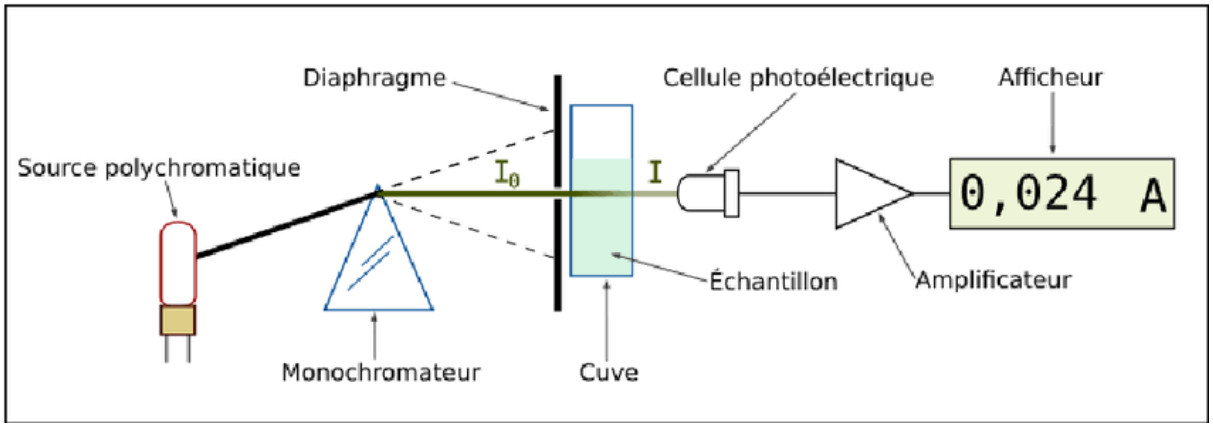


Fig.25. *Principe de spectrométrie*

Soit une solution (S) contenant une substance colorée dissoute dans un solvant incolore. Une mesure en spectrophotométrie est basée sur la comparaison du flux énergétique de deux rayons lumineux :

- un rayon traversant une cuve de référence, appelée communément le **blanc**, contenant uniquement le même solvant que (S), et donc a priori transparente vis-à-vis du rayon lumineux ;
- un rayon traversant une cuve identique contenant la solution (S).

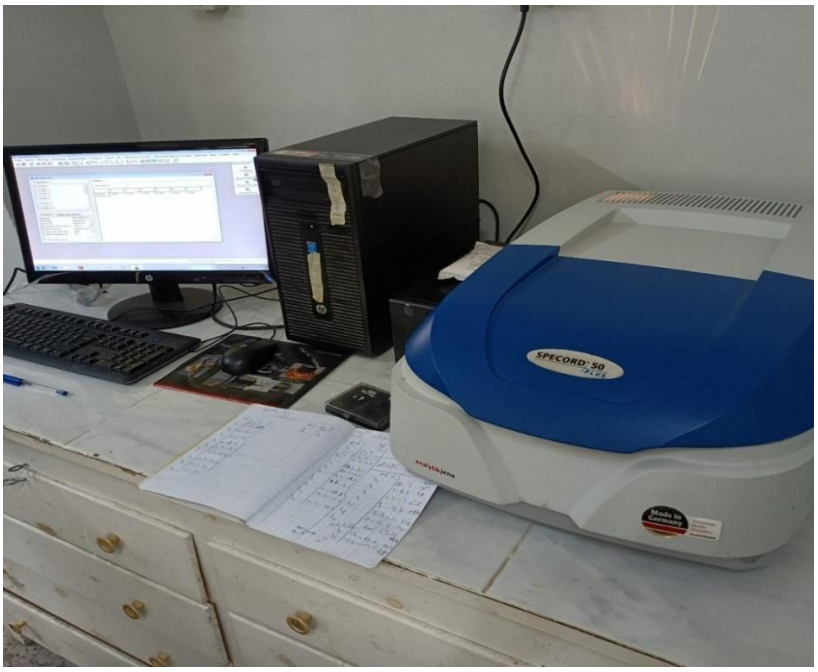


Fig.26. *Spectrophotomètre (SPECORD 50)*

IV.5 Conclusion

La réalisation des analyses chimiques représente une étape délicate et très importante, et qui nécessite beaucoup d'attention et de précession, afin d'avoir des résultats fiables (balance ionique ≤6).

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1. Introduction

La composition chimique d'une eau est importante dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable et autre usages.

Il est important de fournir aux géologues chargés d'étudier l'origine d'une source thermo-minérale, une analyse dans laquelle, à la suite de l'énumération des ions reconnus dans l'eau minérale, soient indiquées les relations probables de ces ions. L'analyse ainsi présentée peut immédiatement renseigner sur la nature du terrain traversé par l'eau, donc sur la cause de sa composition chimique et sa minéralisation **(Moret, 1942).**

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau que nous avons prélevés au niveau des sources thermo-minérales, il concerne essentiellement l'étude des paramètres mesurés in situ (PH, conductivité et la température), et les éléments dosés ont porté essentiellement sur (Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{-2} et Cl^{-}).

V.2. Etude des paramètres physiques des eaux thermales

V.2.1. La température

L'analyse de ce paramètre est très importante, car elle conditionne de nombreux paramètres tels que la conductivité électrique et le pH, ainsi que les réactions des dégradations et des minéralisations de la matière organique. L'élévation de la température s'accompagne toujours d'une modification des propriétés de l'eau, la densité et la viscosité qui favorise l'autoépuration et accroit la vitesse de sédimentation. **(Nalco, 1983).**

Une eau est dite thermale si sa température à l'émergence est supérieure à la température moyenne annuelle de l'air plus de 4-5 °C au lieu de l'émergence **(Schoeller, 1963).** Cette température ne représente pas la température réelle à la source du réservoir, car l'eau peut subir un refroidissement au cours de son ascension vers la surface.

Il est important de rappeler que les températures mesurées aux émergences ne sont pas représentatives de la température réelle du réservoir, car un éventuel refroidissement des eaux thermales peut se produire le long du circuit des eaux thermales lors de l'ascension vers la surface par plusieurs voies ; soit par dégazage, ou bien un échange thermique avec les parois du drain hydrothermal et le plus souvent par un mélange avec des eaux froides en profondeur comme en surface.

D'après les résultats (Fig.27), les valeurs de la température des différentes sources sont se situe dans un intervalle qui va d'une minimum de 46°C à la source de Hammam Guerfa (S6) au maximum de 95°C à la source de Hammam Debagh (El Chellal).

D'après la classification des eaux thermales **(Verdeil, 1986),** on peut diviser les sources thermales de la région d'étude en deux catégories :

La catégorie des eaux mésothermales dont la température varie entre 30 et 50°C, elle est représentée par la source S6 de Hammam Guerfa et Hammam Ouled Ali.

La catégorie des eaux hyperthermales dont la température varie entre 50 et 100°C, elle est représentée par les sources de Hammam Debagh et Hammam Belhachani et deux émergences de Hammam Guerfa.

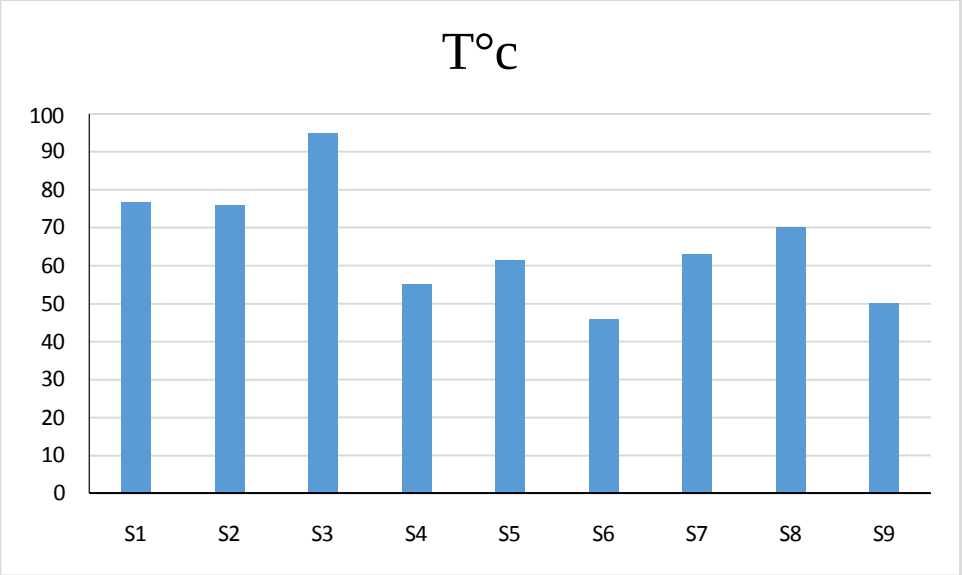


Fig.27. *Histogramme de la variation de la température des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

V.2.2. Le PH

Le PH est un élément important pour définie le caractère agressif ou incrustant d'une eau, il intervient dans des phénomènes complexe avec d'autre paramétrés comme la dureté, le dioxyde de carbone, l'alcalinité et la température **(Nalco, 1983).**

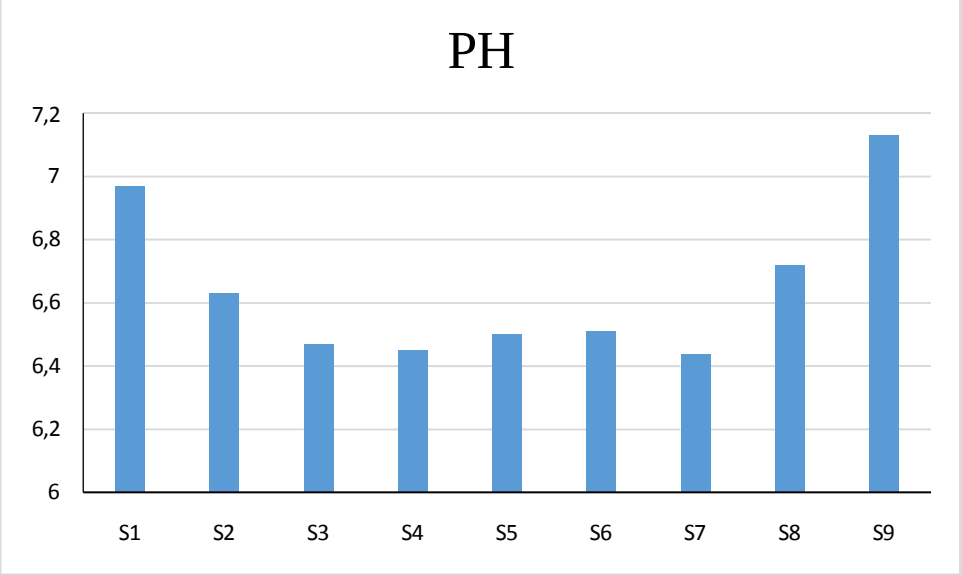


Fig.28. *Histogramme de la variation de pH des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

L'histogramme de variation de pH des différentes sources (Fig.28), montre que toutes les valeurs s'échelonnent entre 6.4 et 7.13 ce qui indique que les eaux des sources thermales ont des valeurs de pH varient autour de la neutralisé avec une tendance à l'acidité. Ces valeurs de pH reflètent l'influence de la température et l'abondance dans les eaux thermales de CO_2 dissous.

V.2.3. La conductivité

La conductivité électrique d'une eau, est la conductance du courant électrique. Elle dépend avant tout de la nature géochimique des formations aquifères, en particulier les substances rendues solubles par l'altération des roches. La conductivité électrique est fonction pour l'essentiel, de la dureté de l'eau (Calcium, Magnésium et Bicarbonates).

Les sources minérales et thermales de l'Algérie sont classées en 4 groupes (Issaâdi, 1992):

- Groupe 1 : la conductivité < 2000 µs/cm
- Groupe 2 : la conductivité comprise entre 2000 et 7000 µs/cm
- Groupe 3 : la conductivité comprise entre 7500 et 15000 µs/cm
- Groupe 4 : la conductivité supérieure à 15000 µs/cm

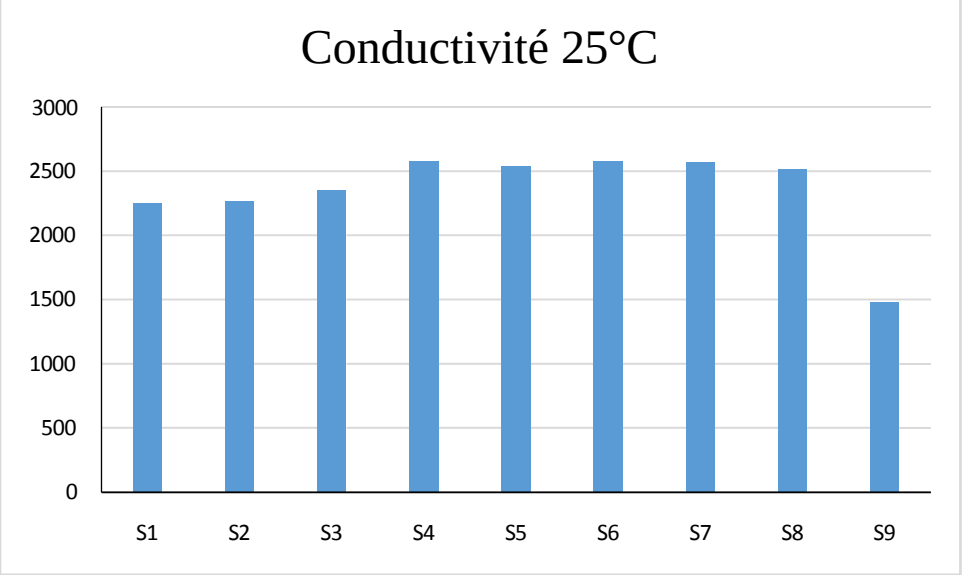


Fig.29.*Histogramme de la variation de la conductivité électrique des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

Les mesures de la conductivité électrique de l'ensemble des échantillons (Fig.29) montrent qu'elle est comprise entre1480µS/cm (Hammam Ouled Ali) et 2580µS/cm (Hammam Guerfa).

D'après la classification des sources on remarque que toutes nos sources sont appartiennent à la classe 2, sauf celle de Hammam Ouled Ali. Ces valeurs élevées de la conductivité peuvent être expliquées par la dissolution des formations évaporitiques.

V.3. Etude des paramètres chimique des eaux thermales

V.3.1. Les éléments majeurs

V.3.1.1. Le Calcium (Ca^{2+})

Cet élément est fréquent dans les roches carbonatées, sa présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3$), soit la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4$) selon les équations suivant **(Zahi, 2014)** :

$CaCO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$

$CaSO_4, 2H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$

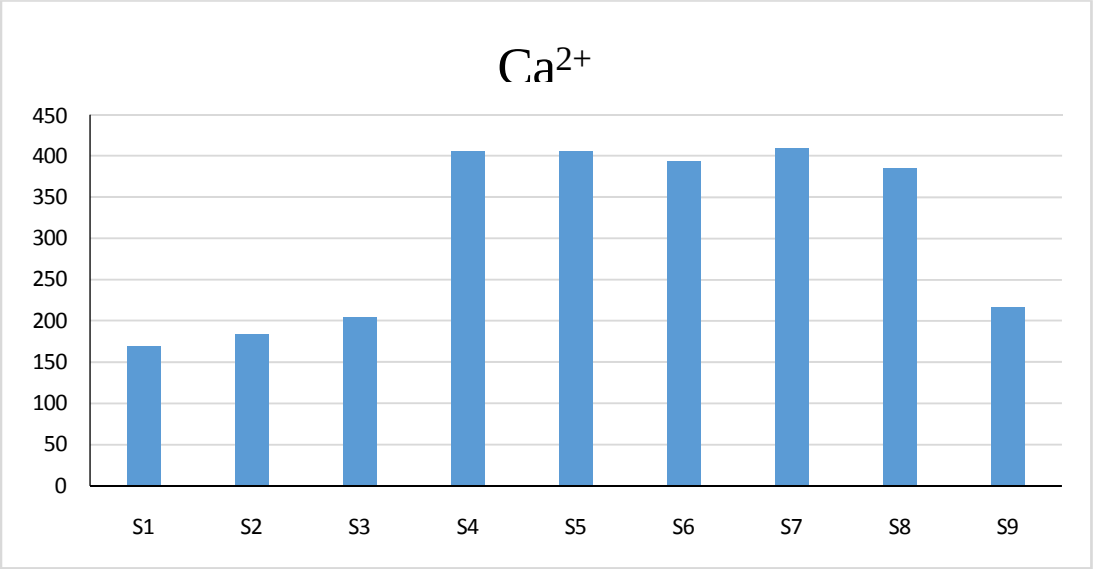


Fig.30. *La variation de la concentration en Calcium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

Les graphiques de variation des teneurs en Ca^{2+}(Fig.30), montre que les teneurs en calcium varie entre 168.34mg/l(S1) et 408.82mg/l (S7). Les teneurs élevées sont liées à la dissolution des formations carbonatées, par contre les faibles concentrations peuvent expliquer par la précipitation du calcium ou l'échange cationique par fixation de calcium sur les matrices argileuses.

V.3.1.2. Le magnésium (Mg^{2+})

La mise en solution de cet ion dans l'eau prend beaucoup de temps, il provient de la dissolution des roches magnésiennes et dolomitiques, de la dissolution d'autres roches dans les eaux continentales (basalte, magnésites, argiles, etc.), il provient aussi des formations métamorphiques tel que les micaschistes. Le processus de dissolution se fait selon les équations suivantes :**(Farah, 1991)**

Magnésite: $MgCO_3 \leftrightarrow Mg^{2+} + CO_3^{2-}$

Dolomite: $CaMg\ (CO_3)_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$

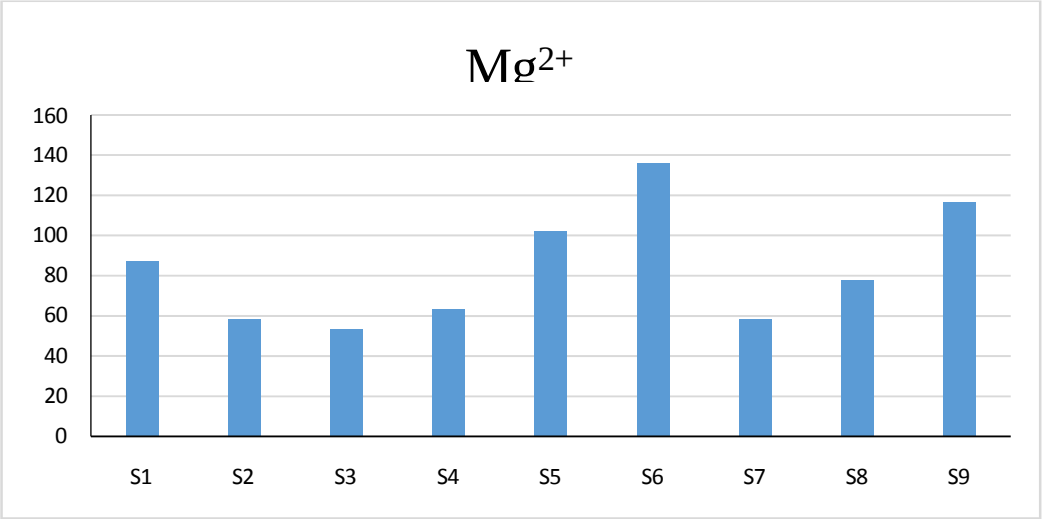


Fig.31.*La variation de la concentration en Magnésium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

D'après le diagramme de variation des concentrations en Mg^{2+}(Fig.31), on remarque que la teneur la plus élevée a été enregistrée au niveau de la source S6 avec une valeur de 136.11mg/l, et la plus faible au niveau de la source S3 (53.47mg/l). L'origine de cet élément est attribuée à la dissolution des formations carbonatées qui sont dominantes dans la géologie de la région d'étude.

V.3.1.3. Le Sodium (Na_+)

Le cation sodium (Na^+) est très abondant sur la terre. On le retrouve dans les roches cristallines, les roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites) et l'Halite (NaCl). L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :

$NaCl \leftrightarrow Na^+ + Cl^-$

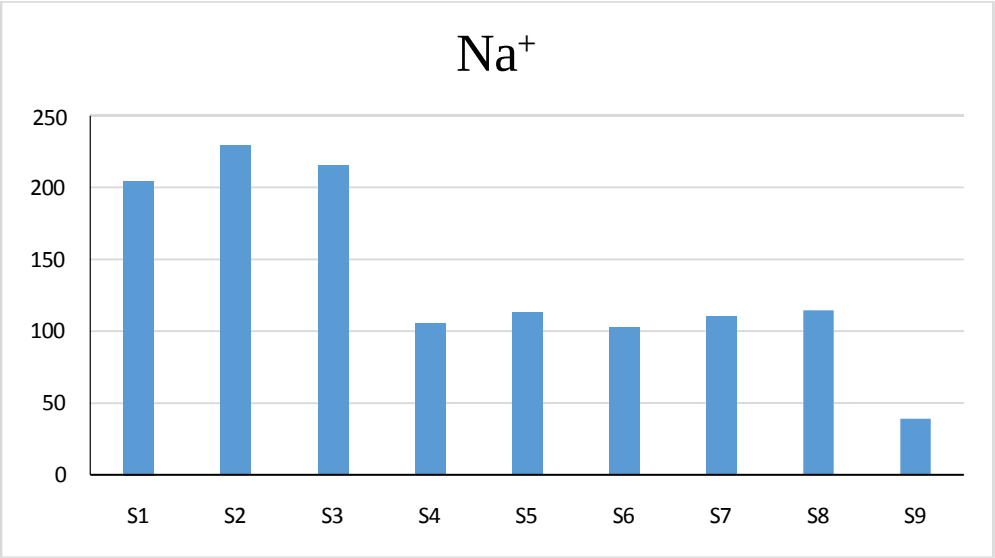


Fig.32.*La variation de la concentration de sodium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

Les teneurs en sodium oscillent entre 39 mg/l (Hammam Ouled Ali) et 229 mg/L (Hammam Debagh).Les teneurs élevées sont principalement liées à la dissolution rapide des formations évaporitiques (Halite). Un échange cationique inverse est toujours prononcé surtout pour les sources de Hammam Debagh.

V.3.1.4. Le potassium (K^+)

Le potassium (K^+) est assez abondant sur la terre, il se trouve dans la nature sous la forme de chlorures doubles dans de nombreux minerais, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombiné dans les sols, sur les argiles notamment **(Zahi, 2014)**. Le potassium provient de l'altération des roches silicatées, des argiles potassiques et des évaporites **(Farah, 1991)**.

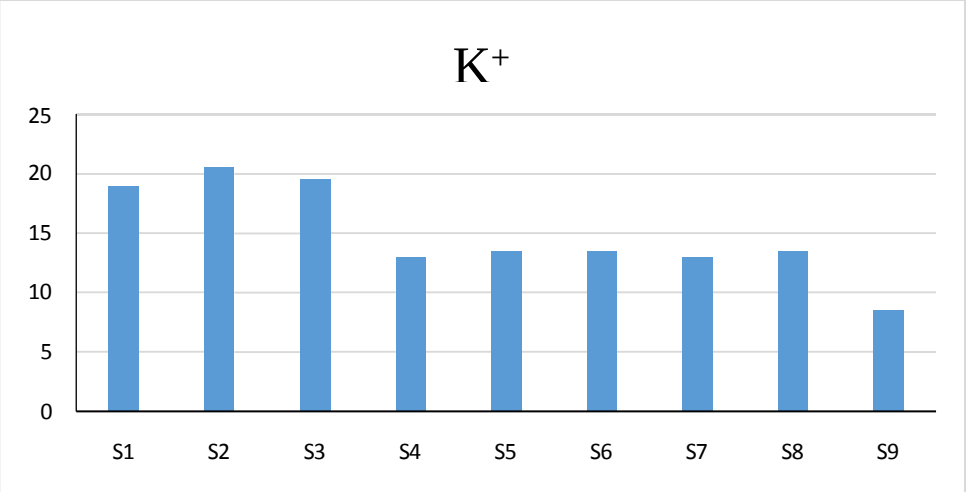


Fig.33. *La variation de la concentration de potassium (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

La représentation graphique de l'évolution spatiale des teneurs de potassium (Fig.33), a montré des teneurs en potassium varient entre 8.5mg/l à Hammam Ouled Ali (S9) et20.5mg/l à Hammam Debagh (S2). Ces apports de potassium peut être proviennent de l'altération des silicates, des échanges cationiques inverses, ainsi que la dissolution des formations évaporitiques.

V.3.1.5. Les sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates sont liés aux cations majeurs : Calcium, magnésium et sodium, leur présence est liée à plusieurs origines, soit à la solubilité du gypse des sédiments argileux des sulfates de calcium et des sulfates de magnésium selon la formule ci-dessous **(Zahi, 2014)**. Soit elle est liée à l'oxydation du soufre ou à l'oxydation des minéraux sulfurés.

$CaSO_4, 2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$

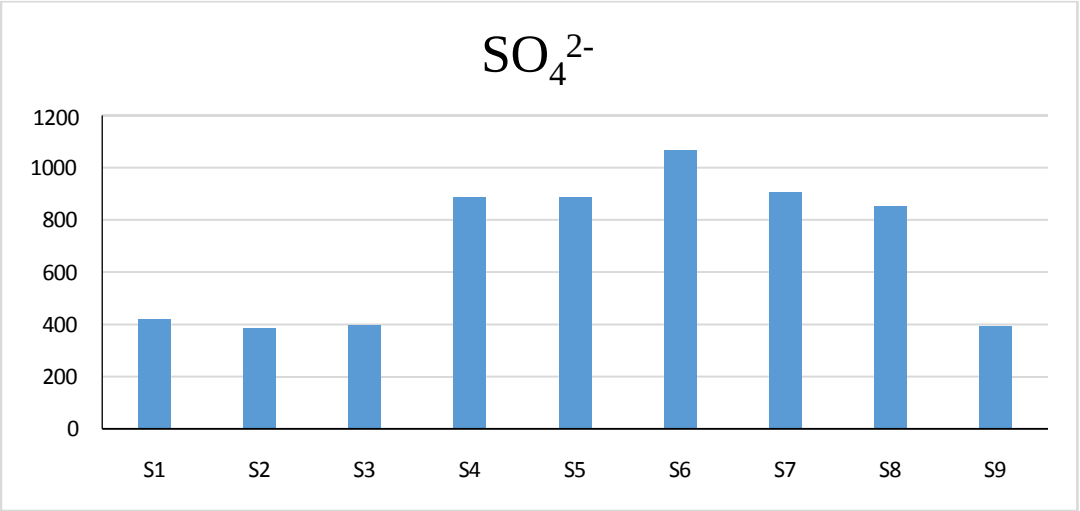


Fig.34.*La variation de la concentration des sulfates (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

D'après les résultats illustrés dans le graphique (Fig.34), on peut dire que les teneurs en sulfates sont généralement élevées, elles varient entre 392.21mg/l à Hammam Ouled Ali (S9) et 1066.36 à Hammam Guerfa (S6).

L'origine des ions sulfate est due à la dissolution des formations triasiques contenues dans la région d'étude, une deuxième origine des sulfates peut être attribuée à l'oxydation des minéraux sulfurés.

V.3.1.6. Les bicarbonates (HCO_3^-)

Sel dérivé de l'acide carbonique à teneur réduite en hydrogène et contenant deux fois plus d'acide que le carbonate. La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie…) selon l'équation suivante **(Mebarkia, 2011)**.

$(Ca^{2+}, Mg^{2+})\ CO_3 + H_2O + CO_2 = 2HCO_3^- + (Ca^{2+}, Mg^{2+})$

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique (Zahi, 2014). De ce fait ses concentrations sont fonction de la lithologie des terrains traversés (calcaire, dolomite), du pH de l'eau, de la tension de CO_2 et de la température de l'eau.

D'après le graphique des bicarbonates (Fig.35), les teneurs des bicarbonates de nos sources analysées varient de 246,44 mg/l (Hammam Debagh) et 427mg/l (Hammam Guerfa), les bicarbonates résultent de la dissolution des roches carbonatées (calcaires) qui forment la majorité du réservoir géothermal dans la zone d'étude.

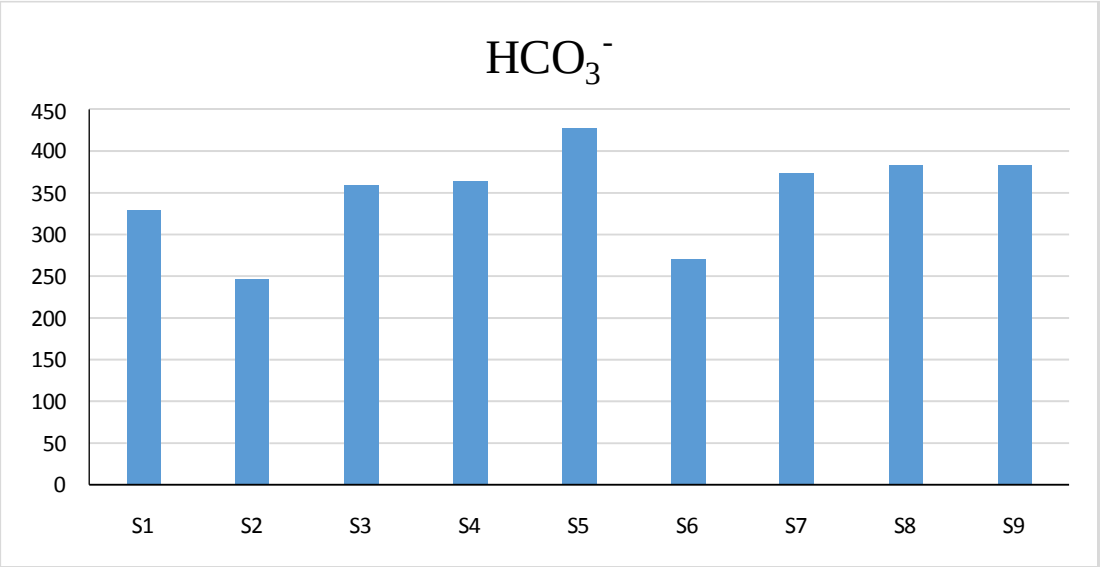


Fig.35.*La variation de la concentration en bicarbonates (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

V.3.1.7. Les chlorures (Cl^-)

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple, soit l'intrusion des eaux marines, ou la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par le lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses. **(Debieche, 2002)** Les résultats d'analyse illustrés dans la (fig.36) montrent que les teneurs en chlorures sont comprises entre 53.25 mg/l (Hammam Ouled Ali) et 186,37 mg/l (Hammam Debagh), elles proviennent de la dissolution des formations salifères. On remarque que les teneurs des chlorures sont plus importantes que celles du sodium pour les sources de Hammam Ouled Ali, Guerfa et Belhachani, en raison du caractère conservatif de cet élément qui ne rentre pas dans le phénomène de précipitation et n'est pas adsorbé par les formations géologiques. Les sources de Hammam Debagh ont des teneurs inférieurs à celles du sodium, expliqué par l'échange cationique inverse.

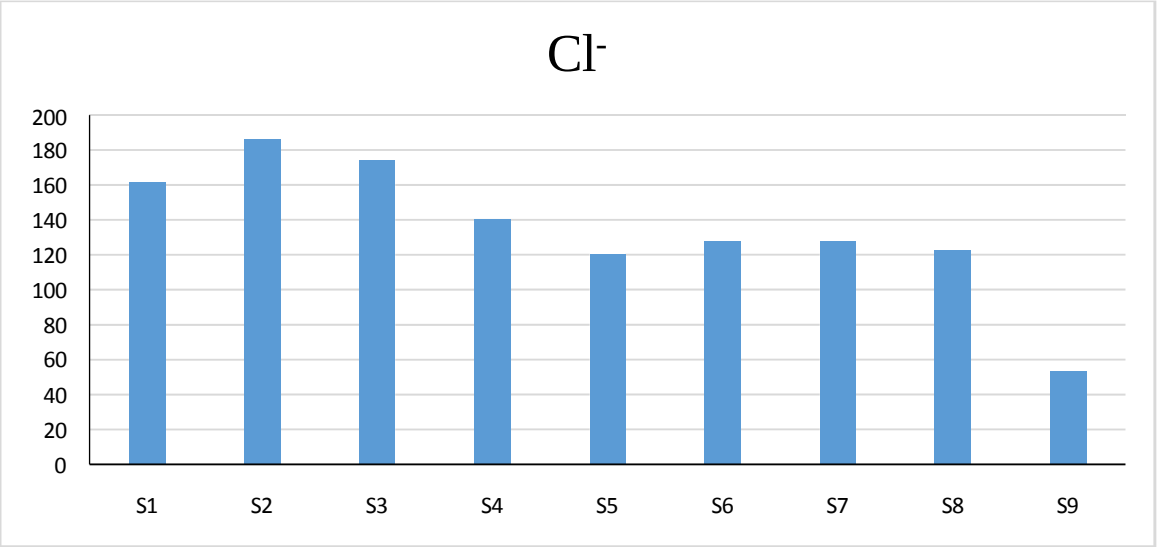


Fig.36.*La variation de la concentration des chlorures (mg/l) des eaux des sources thermales (Mars 2022)*

V.3.2. Facies chimique

V.3.2.1.Faciès chimique des eaux

L'interprétation des résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+},K^{+}, Cl^{-} , SO_4^{2-} et HCO_3^{-} était nécessaire pour bien identifier les faciès hydrochimiques et avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux des sources thermales. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours à la formule ionique pour le calcul des quantités en réaction et la classification des ions et aux diagrammes de Piper et Stiff pour la représentation graphique des résultats. La réalisation de ces derniers a été faite grâce au logiciel Diagrammes, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004).

Diagramme de piper

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global.

Le report des 9 échantillons prélevés des sources thermales sur le Diagramme de piper (Fig.37) a montré l'existence d'une seule famille d'eau qui est la famille Sulfaté-calcique et magnésien.

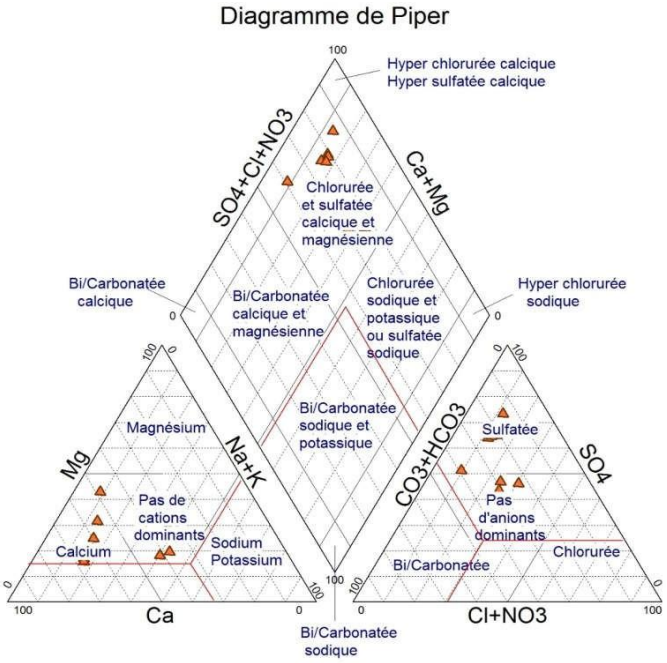


Fig.37. *Faciès chimiques des eaux des sources thermales selon le diagramme de Piper*

Diagramme de Stiff

Ce genre de diagramme permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'une famille d'eau donnée. Les données d'analyse des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche (Na^+, K^+, Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les anions à droite (Cl^-, HCO_3^- et SO_4^{-2}).

Source thermal	Ordre d'abondance des éléments chimiques	Facies chimique
Hammam Debagh (S1)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Na^++ K^+)> Ca^{2+}> Mg^{2+}	Sulfaté sodique
Hammam Debagh (S2)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Na^++ K^+)> Ca^{2+}> Mg^{2+}	Sulfaté sodique
Hammam Debagh (S3)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Na^++ K^+)> Ca^{2+}> Mg^{2+}	Sulfaté sodique
Hammam Guerfa (S4)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Ca^{2+}>(Na^++ K^+)> Mg^{2+}	Sulfaté calcique
Hammam Guerfa (S5)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Ca^{2+}> Mg^{2+}> (Na^++ K^+)	Sulfaté calcique
Hammam Guerfa (S6)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Ca^{2+}> Mg^{2+}> (Na^++ K^+)	Sulfaté calcique
Hammam Belhacheni (S7)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Ca^{2+}>(Na^++ K^+)> Mg^{2+}	Sulfaté calcique
Hammam Belhacheni (S8)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Ca^{2+}>(Na^++ K^+)> Mg^{2+}	Sulfaté calcique
Hammam Ouled Ali (S9)	SO_4^{2-}> HCO_3^-> Cl^- Ca^{2+}> Mg^{2+}> (Na^++ K^+)	Sulfaté calcique

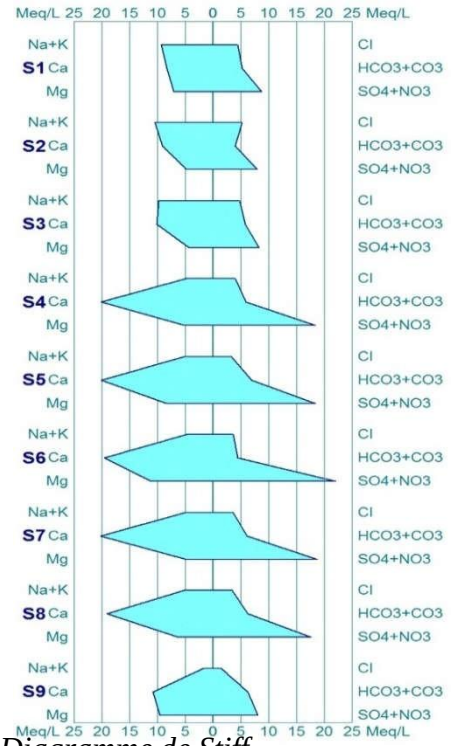


Fig.38.*Représentation graphique des faciès chimiques sur le Diagramme de Stiff*

Le diagramme de Stiff montre l'existence de deux faciès :

- Un faciès Sulfaté sodique pour les sources de Hammam Debagh ;
- Un faciès Sulfaté calcique pour les autres sources ;

V.4. Les rapports caractéristiques

On appelle rapport caractéristique, le rapport de certains éléments chimiques exprimé en quantité en réaction.

Les eaux s'écoulent sur un matériel très hétérogène (des calcaires, des argiles, des dépôts évaporitiques…etc.). Le parcours d'écoulement et les formations traversées influent sur l'acquisition des éléments chimiques. Dans ce sens les rapports caractéristiques à pour objectif de déterminer l'origine probable de tous les ions, en se basant sur les mesures et les analyses chimiques de tous les échantillons.

V.4.1.Le rapport rCa^{2+}/rMg^{2+}

La figure 40 montre que le calcium prédomine le magnésium cela est dû probablement à la forte dissolution des formations gypseuses.

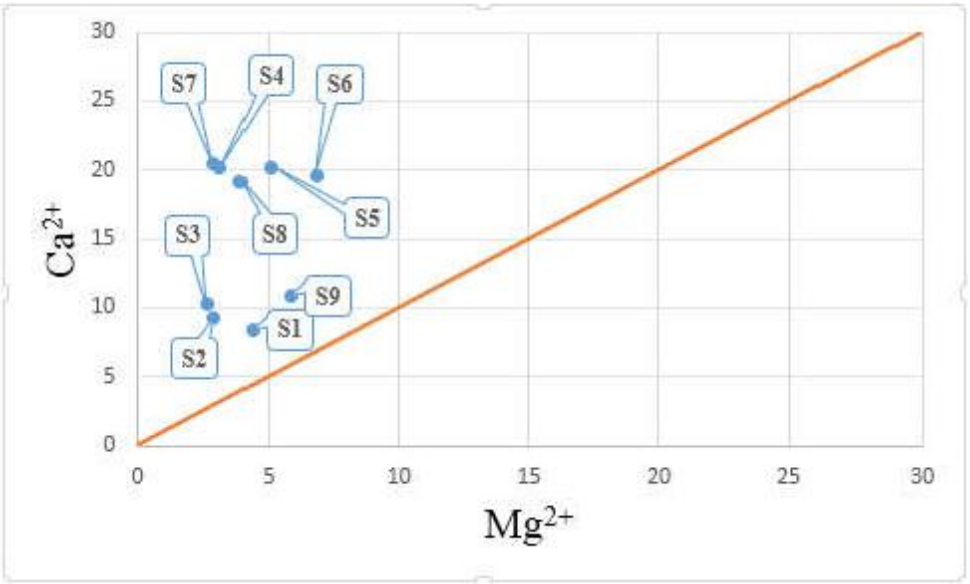


Fig.39.*Le couple Ca^{2+}, Mg^{2+}*

V.4.2. Le rapport $rCa^{2+}/rHCO_3^-$

Le diagramme de dispersion (Fig.40) montre que tous les échantillons des sources thermales sont tracés au-dessus de l'équiligne, indiquant un excès élevé du Ca^{2+} par rapport au HCO_3^-. Cet excès peut attribuer à d'autres processus chimiques, tel que la dissolution des formations évaporitique, l'échange de cations, qui se produisent largement dans les terrains sédimentaires et l'altération des silicates. Bien qu'il n'y ait pas de corrélation évidente entre le Ca^{2+} et le HCO_3^-, il est raisonnable de considérer la dissolution des minéraux carbonatés comme une source de Ca^{2+} et de HCO_3^- en raison de la présence généralisée de roches carbonatées dans la zone d'étude.

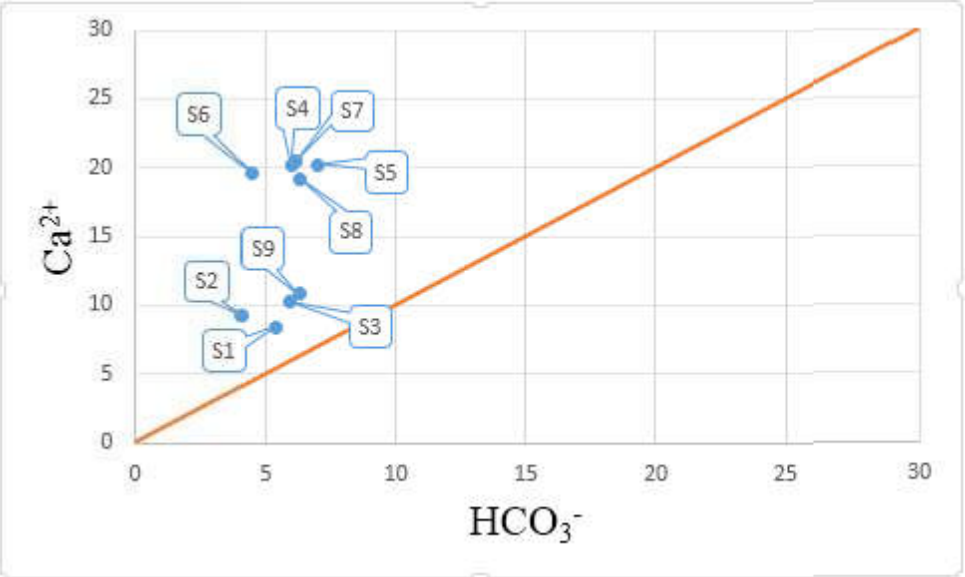


Fig.40. *Le coupleCa^{2+}, HCO_3^-*

V.4.3. Le rapport rCa^{2+}/rSO_4^{-2}

Le Ca^{2+} a une bonne corrélation avec le SO_4^{2-}, ce qui implique que la dissolution du gypse et de l'anhydrite peut être les processus clés contrôlant la composition chimique des eaux des sources thermales

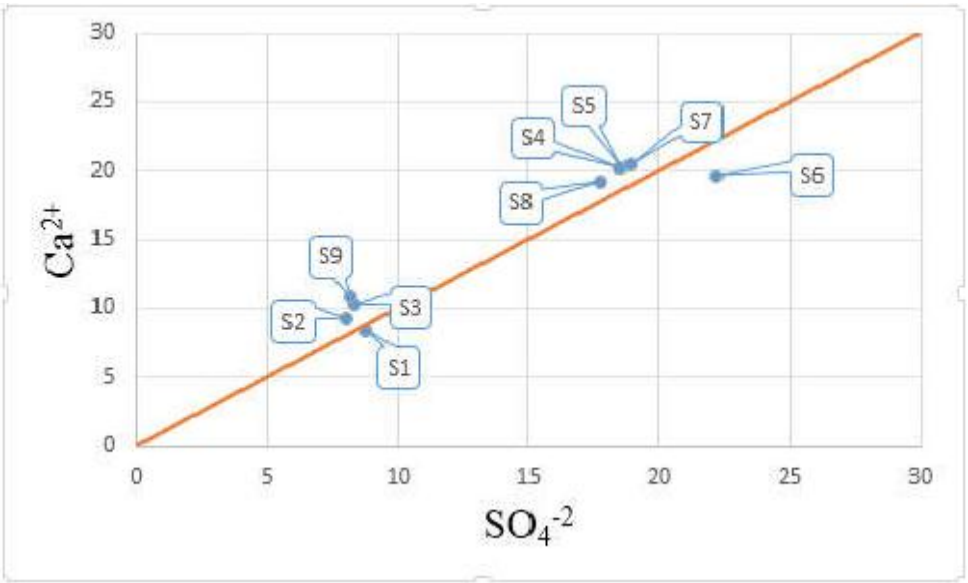


Fig.41. *Le couple Ca^{2+}, SO_4^{-2}*

V.4.4. Le rapport Ca^{2+}/Na^+, Mg^{2+}/Na^+

La contribution relative de trois principaux mécanismes d'altération (silicate, carbonate et évaporation) à la concentration en soluté des eaux souterraines est étudiée par le tracé bivarié du Ca^{2+}, Mg^{2+} et normalisés aux concentrations de Na^+ **(Gaillardet et al. 1999)**. Les eaux drainant des réservoirs carbonatés ont des rapports; Ca^{2+}/Na^+ proche de 50, Mg^{2+}/Na^+ proche de 10.

La (fig.42) montre que les sources de Hammam Debagh indiquent principalement l'influence de l'altération des silicates et les autres sources indiquent la dissolution des carbonates, où ils sont positionnés dans la zone de transition entre l'élément final carbonaté et l'altération silicatée.

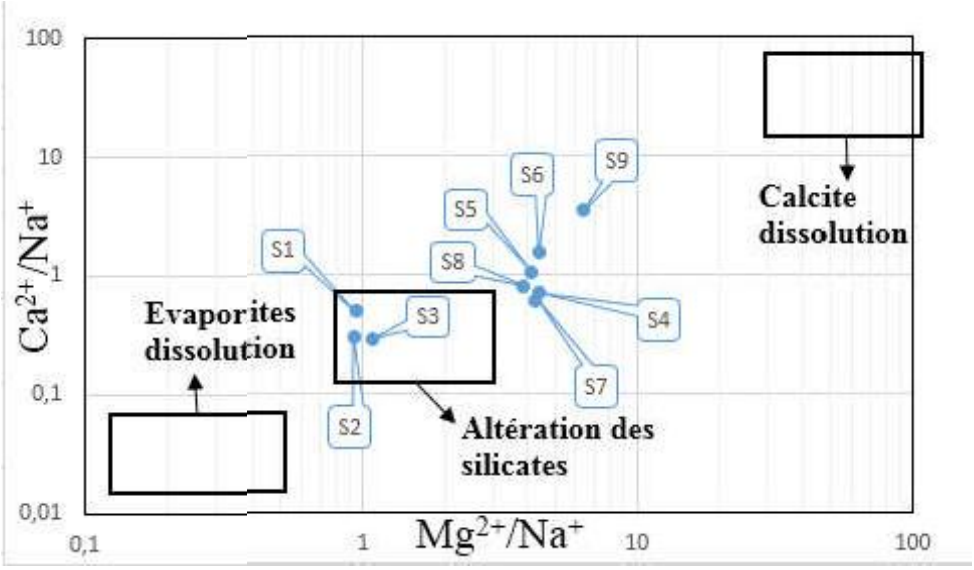


Fig.42.*Graphique bivarié de Na-normalisé de Ca^{2+} par rapport à Mg^{2+} .Les carrés représentent les plages de compositions approximatives des trois principaux membres finaux de la source (évaporats, silicates et carbonates) sans aucun mélange.*

V.4.5. Le rapport rNa^+/rCl^-

Dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na^+ et Cl^- est attribuée à la dissolution de la halite que l'on rencontre dans les formations triasiques. Cependant, les chlorures comme le sodium peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

Afin d'explorer le mécanisme de la salinité, le graphique Na^+ contre Cl^- est largement utilisé **(Sami, 1992 ; Drouiche et al. 2022)**. Théoriquement, la dissolution de l'halite libérera des quantités égales de Na^+ et Cl^- dans la solution, c'est le cas les sources des Hammams Ouled Ali, Guerfa et Belhachani, suggérant que la dissolution de l'halite peut être la principale source de Na^+ et Cl^-. Néanmoins, les sources de Hammam Debagh s'écartent de la relation 1:1 attendue. Il contient plus de Na^+ que de Cl^-. Un rapport Na = Cl plus élevé peut être attribué à l'altération du feldspath et à la dissolution d'autres minéraux contenant du Na. La concentration relativement élevée de Na^+ dans les sources de Hammam Debagh pourrait également être illustrée par l'échange de cations entre Ca^{2+} ou Mg^{2+} et Na^+, comme on le verra plus bas.

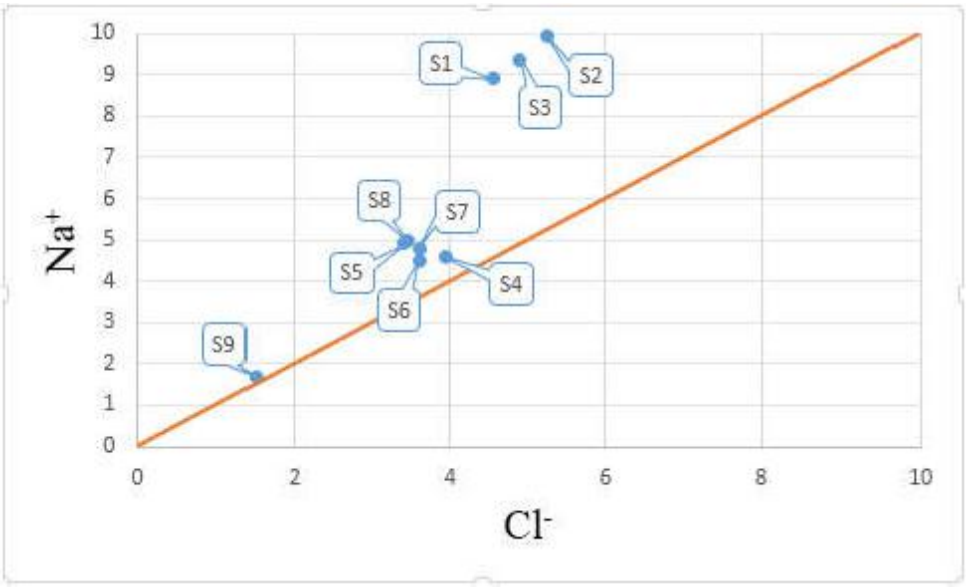


Fig.43. *Le couple Na^+, Cl^-*

V.4.6. Le rapport rCa^{2+}/rNa^+

Ce rapport indique que les sources de Hammam Debagh sont affectées par le phénomène d'échange de base. Par contre les autres sources sont affectées par le phénomène de dissolution des formations géologiques.

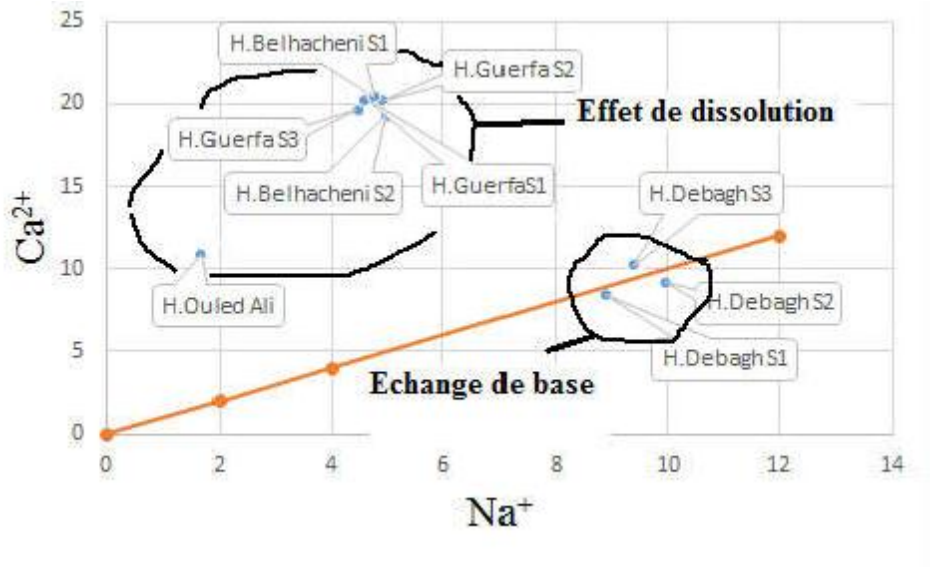


Fig.44. *Le couple Ca^{2+}, Na^+*

V.5. Indice d'échange de base (ieb)

L'indice d'échange de base défini par Schoeller, (1934) est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante : $ieb = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-}$

Si l'ieb est négatif, les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau sont échangés contre les ions K^+ et Na^+ des formations encaissantes. Par contre si l'ieb est positif, les ions Na^+ et K^+ de l'eau sont remplacés par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} des formations encaissantes. Dans le cas où l'ieb est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins de l'encaissant.

Il est préférable de calculer l'ieb par la formule suivante : $\text{ieb} = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rSO_4^{2-} + rHCO_3^- + rNO_3^-}$

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. L'interprétation des données de l'ieb calculé a montré que toutes les sources ont un ieb négatif.

Pour bien expliquer ce phénomène, nous avons essayé d'interpréter le diagramme Ca^{2+}/ (HCO_3^-+ SO_4^{2-}) – Na^+/ Cl^-avec un report de tous les sources (Fig.45). Ce diagramme montre un excès des teneurs en sodium par rapport aux chlorures surtout pour les sources de Hammam Debagh, cet excès de Na^+ est accompagné par un déficit en Ca^{2+}par rapport aux HCO_3^-et SO_4^{2-}. Ces résultats expliquent le phénomène d'échange de base. En effet dans un échange de bases lié aux minéraux argileux, il y a fixation d'un Ca^{2+}après libération de deux Na^+.

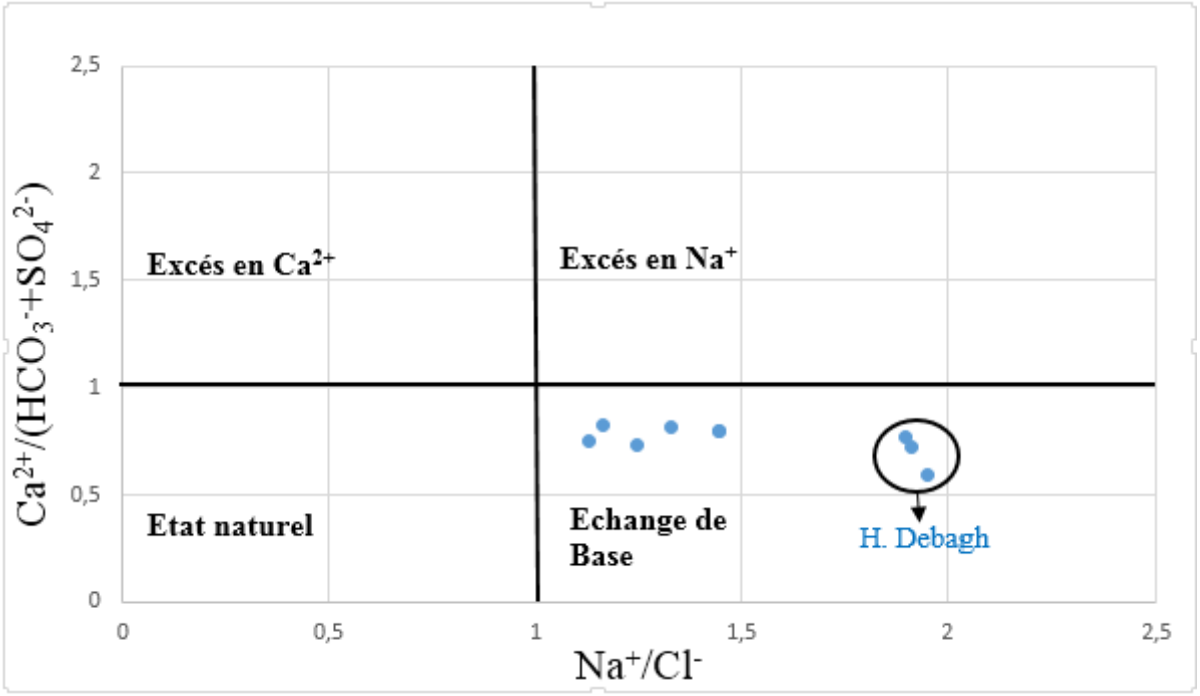


Fig.45.*Echanges de bases dans les eaux des sources thermales de la région de Guelma.*

V.6. Géothermométrie

Les géothermomètres chimiques, géologiques et isotopiques constituent probablement l'outil géochimique le plus important pour l'exploration et le développement des ressources

géothermiques. Ils sont également très importants lors de l'exploitation et dans le suivi de la réponse des réservoirs géothermiques.

La géothermométrie est utilisée pour estimer les températures du sous-sol, c'est-à-dire les températures qui devraient être rencontrées dans le réservoir. Elle est également utile pour mieux comprendre les réactions chimiques qui se produisant en profondeur.

V.6.1. Les géothermomètres chimiques

Le but de la géothermométrie pour connais les températures profonde des sources thermales étudie. Plusieurs auteurs inventé la Géothermomètres chimique **(Ellis, 1970 ; Fournier & Trusdell, 1973 ; Truesdell, 1976)**, ces auteur inventé des méthodes et des formule aidez-nous à découvrir la température profonde à partir de la composition chimique de ces sources. Il existe plusieurs sortes de géothermomètres chimiques :

Le géothermomètre silice

Le géothermomètre K-Mg

V.6.1.1. Géothermomètre Na/K

Ellis (1970) a mis empiriquement en évidence la relation entre le rapport Na/K et la température profonde de l'eau, les teneurs en Na et K des eaux thermales proviennent de la mise en solution de ces éléments dans les feldspaths constituants les roches cristallines, l'équation correspondante :

$$T°C = \frac{908}{\log\left(\frac{Na}{K}\right)+0,7} - 273$$

(A.J. ELLIS .1970)

(Concentrations en mol/l)

$$t°C = \frac{4410}{14-\log(K^2/Mg)} - 273.15$$

(Fournier. R. O. 1979)

$$t°C = \frac{933}{\log(Na/K)+0.933} - 273.15$$

(Tonani 1980)

$$t°C = \frac{933}{\log(Na/K)+0.933} - 273.15$$

(Arnórsson 1983)

$$t^{\circ}C = \frac{1390}{\log(Na/K) + 1.75} - 273.15$$ **(Nieva & Nieva 1987)**

$$t^{\circ}C = \frac{1217}{\log(Na/K) + 1.483} - 273.15$$ **(Giggenbach 1988)**

$$t^{\circ}C = \frac{1052}{1 + e^{(1.714\log(\frac{Na}{K}) + 0.252)}} + 76$$ **(Can, 2002)**

(Concentrations en mol/l)

V.6.1.2. Géothermomètre Na/K/Ca

Ce géothermomètre est proposé par Fournier et Trusdell (1973), il est basé principalement sur la solubilité de Na, K, Ca provenant des plagioclases.

Avec :

$$T°C = \frac{1647}{2{,}24 + log(Na/K) + \beta\log(\frac{\sqrt{Ca}}{Na})} - 273{,}15$$

β = 1/3 si la température de l'eau est supérieur à 100 °C;

β = 4/3 si la température de l'eau est inférieur à 100 °C.

Tab.3.*Températures estimées en °C dans les sources étudiées à la région de Guelma par différents géothermomètres chimiques.*

	La Géothermomètre Na-K-Ca	La Géothermomètre Na/k						
station	R.O.Fournier et A.H.Trusdell (1973)	A.J. ELLIS 1970	TRUESDELL 1976	TONANI 1980	ARNORSON 1983	NIVA & NIVA 1987	Giggenbach 1986	CAN 2002
S1	141,11	189,98	130,96	152,06	152,06	188,45	170,33	162,40
S2	141,41	186,18	127,89	148,94	148,94	185,98	167,72	160,22
S3	135,78	187,27	128,77	149,83	149,83	186,69	168,47	160,84
S4	106,52	220,84	155,78	177,21	177,21	208,04	191,06	180,59
S5	107,37	217,27	152,93	174,33	174,33	205,82	188,70	178,45
S6	111,32	228,14	161,62	183,12	183,12	212,55	195,85	185,00
S7	104,83	216,01	151,91	173,30	173,30	205,04	187,87	177,70
S8	108,15	215,74	151,70	173,08	173,08	204,87	187,69	177,54
S9	120,98	297,71	216,55	238,36	238,36	253,16	239,49	227,91

- les températures calculés à partir de géothermomètre Na-K-Ca **(Fournier & Trusdell, 1973)**, donnée des températures du réservoir qui varient entre 104 °C et 141 °C cette température et plus grande que l'émergence
- les sources de H. Debagh qui sont celle dont les eaux les plus chaudes en profondeur, par ce que la source de Hammam Debagh plus proche d'une fracture de la zone d'étude.
- la géothermométrie Na/K de **(Ellis, 1970)** montre que les températures des sources (S1, S2, S3) entre 186 et 189 °C. Ce sont les sources de Hammam Debagh et les températures des sources (S4, S5, S6, S7 et S8) entre 215,748 et 228,148 ce sont les sources de H. Geurfa et Belhachani. H. Ouled Ali a la plus grande valeur de température 297,716
- la géothermométrie Na/K de **(Giggenbach, 1986)** donne des proche valeurs de température (S1, S2, S3) les sources de H. Debagh entre 167,725 et 170,330 et les sources de H. Geurfa (S4 et S5) entre 188,708 et 191,062. Les températures des sources de H. Belhachani (S6, S7, S8) sont entre 187,693 et 195,857. La source de H. Ouled Ali c'est 239,490 et toujours avoir une grande valeur.
- la géothermométrie Na/K de (Tonani, 1980) et (Arnorson,1983) avoir les mêmes valeurs dans tous les sources.

V.7. Conclusion

D'après les résultats des analyses chimiques, les interactions des eaux thermales avec les roches donnent une minéralisation variée. La classification de stiff nous permette de définie deux types de faciès :

- Faciès sulfaté sodique : concerne les sources thermales de Hammam Debagh
- Facièssulfaté calcique : concerne les sources de Hammam Guerfa et Belhashani et Ouled Ali.

Les rapports caractéristiques expliquent les mécanismes d'acquisition du chimisme des eaux, où on a pu montrer l'existence de trois phénomènes responsables à la chimie des eaux ; la dissolution des roches carbonaté et évaporitique, les échange de base et l'altération des silicates.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous étudions les eaux thermales de la région de Guelma. Située au nord-est L'Algérie à 60 km de la méditerranée. Caractérisée par un relief varié et accidenté subdivisé entre zone montagneuses et hautes plateaux.

La géologie de la région étudiée est caractérisée par un dispositif structural assez complexe, c'est précisément dans cette zone que se sont manifestés successivement à toutes les époques et avec le plus d'intensité les mouvements orogéniques qui ont affecté la partie nord de l'Algérie. Elle est constituée des formations qui s'étalent du Trias jusqu'au Quaternaire, et soumises aux diverses accidents tectoniques comme les failles profondes, les plis et chevauchements. Ces accidents tectoniques sont responsables à l'émergence des sources chaudes. L'analyse lithostratigraphique a permet de distinguer trois ensembles de formations ; (1) les formation du Post-nappes constituent des alluvions quaternaires, des travertins du bassin de Guelma, des travertins du bassin d'Ain Makhlouf et des calcaires lacustres (Mio-Pliocène) (2) les formations allochtones représentées par les formations numidiennes, les formations Ultra-telliennes, les formations telliennes à Globigérines et à Nummulites et les calcaires yprésiens (3) les formations Para- autochtones regroupent les formations de Sellaoua et les formations néritiques.

Du point de vu climatique Guelma possède un climat méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et subhumides, des printemps et des automnes souvent humides et des étés secs. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 559,44 mm/an avec des températures moyennes de l'ordre de 17,81°C.

Le potentiel souterrain de Guelma est repartie en quatre aquifères qui sont : la nappe alluvionnaire de Guelma, la nappe des calcaires néritiques et sénoniens d'Héliopolis, la nappe des calcaires Eocènes de Sellaoua-Announa - Ras El Agba et la nappe des formations carbonatées de la région d'Ain Larbi- Bou Hachana. Un autre potentiel plus profond comporte un réservoir karstique carbonaté responsable à l'alimentation et la circulation des eaux chaude. Le potentiel des eaux de surface est représenté par les oueds Sybouse, Bouhamdane, Mellah et Charaf.

L'étude hydrochimique a révélé des valeurs de pH varient entre 6,4 et 7,13, une conductivité électrique de l'ordre 2348.88µs/cm et des températures variables se situent dans un intervalle qui va d'une minimum de 46°C à la source de Hammam Guerfa au maximum de 95°C à la source de Hammam Debagh.

La classification chimique des eaux effectuée selon le diagramme de Stiff a donnée deux types de faciès ; (1) sulfaté sodique concerne les sources thermales de Hammam Debagh, (2) faciès sulfaté calcique concerne les sources de Hammam Guerfa, Belhashani et Ouled Ali.

Les rapports caractéristiques permettent de donnée l'origine des éléments majeurs. Ces rapports ont montré trois processus chimiques contrôlant la chimie des eaux des sources thermales ; la dissolution des roches carbonatées et évaporitique, les échanges de base et l'altération des silicates. Le calcul des géothermomètres chimiques a donné des températures du réservoir qui varient entre 104 °C et 141 °C.

Références Bibliographiques

Abbassene,F.(2016). Contraintes chronologiques et pétro-géochimiques du magmatisme sur l'évolution pré-et post-collisionnelle de la marge algérienne : secteur de la Petite Kabylie.

Auby, JF. (1954). Les eaux minérales. Collection que-sais-je. Editions Presses Universitaires de France.

Beldjazia, A. (2016). Les perturbations climatiques et leurs indices possibles sur l'écosystème forestier de la Mahouna (Guelma). Thèse de doctorat université Constantine.

Bouaicha, F. (2018). Le géothermalisme de la région de Guelma. Thèse de doctorat université Constantine.

Bouillin, J. P. (1977). Géologie Alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie). Thèse Doctorat, science naturelle. Paris (France). Mémoire Soc.Géol.fr. 509p.

Boukrouh, F. (2009). Etude géologique des dépôts évaporitiques du bassin de Guelma. Mémoire magistère université de Constantine.

Bouragba, N. (2015). Contribution à l'étude des minéralisations de la chaine des Azerou (chaine des Bibans, Bordj Bou-Arreridj). Mémoire de Magistère université de setif.

Can, I. (2002). A new improved Na/K géothermometer by artificial neural networks.Geothermics 31: 751–760.

Castany G., (1963). Traité pratique des eaux souterraines, édition Dunod, Paris, 1963.

Chouabi, A.M. (1987). Étude géologique de la région de Hammam N'Baïls (SE de Guelma,Constantinois, Algérie) : un secteur des zones externes de la chaîne des Maghrébides.(France.123p.).

Dareste, De La Chavane, J. C. (1910) .La région de Guelma, études spécial des terrains tertiaires. Bull. Serv. Carte géolgique, Algérie. Thèse sciences, Lyon (France), 256p.

Debieche T.H, (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle , Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-est algérien ,Thèse de Doctorat, Université Franche-Compte, France, 235 p ;

Drouiche A, Zahi F, Debieche TH, Lekoui A, Mahdid S (2022). Assessment of surface water quality: a case of Jijel region, North-East Algeria. Arabian Journal of Geosciences 15: 252. DOI: 10.1007/s12517-022-09458-9

Deleau, P. (1938). Etude géologique des régions de Jemmaps, Hammam Meskhoutine et du col des oliviers.

De Launay, L., (1899). Recherché, captage et amménagement des sources thermominérales. **Baudry et Cie**, Paris.

Deleau, P. (1952). Le pays constantinois.

DHW Guelma.(2011). Inventaire des sources thermales existantes dans la wilaya de Guelma (rapport interne).

DHW Guelma.(2013). Inventaire des sources thermales existantes dans la wilaya de Guelma (rapport interne).

Dib. H, (1985). Le thermalisme de l'Est algérien. Thèse de doctorat 3ème cycle, I.S.T. USTHB, Alger, Algérie, 315p.

Dib. H. (2008). Guide pratique des sources thermales de l'Est algérien. Editions du Service Géologique national (Alger): 106 pp.

DIB, H. (2004). Le thermalisme de l'extrême Est Algérien : Guelma, Souk Ahras, Skikda et Tarf. Encadrement d'un Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie. Faculté des Sciencesde la Terre et de l'Aménagement du Territoire. Université de Constantine.P, 5, 6,7, 8, 63,55.

Durand Delga, M., (1955). Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. (France. 533p.).

Durand, D. M. (1969) .Mise au point sur la structure du Nord Est de la Berbérie. Publ. Serv.Carte géol., Algérie, nouv. Série, n°39.

Farah A.S, (1991). Etude du comportement hydro chimique d'un oued en zone méditerranéenne semi–aride d'Afrique du Nord et de ses causes naturelles et anthropiques : l'Oued Rhumel, Constantinois, Algérie, Thèse de Doctorat en Géologie Appliquée (Hydrogéologie, Université d'Orléans, 217 pp ;

Fourmarier P., (1955). Reflexions au sujet de l'origine des eaux thermales de Chaudfontaine (vallé de la Vesdre). Ann. Soc. Géol. Belg., LXXVIII, pp. 491-510.

Fournier, R.O. & Truesdell, A.H., **(1973).**An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochimica et Cosmochimica Acta 37: 1255–1275.

Fournier. R. O., (1979). A Revised Equation for the NA/K Geothermometer. Geothermal Resources Council.3, 221-224p (Davis, Calif.).

Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allègre CJ (1999). Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. Chemical Geology 159(1-4): 3- 30. DOI: 10.1016/s0009-2541(99)00031-5

Gaud, B. (1976). Etude hydrogéologique de la nappe alluvionnaire de Guelma.

Giggenbach, W.F., (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta 52: 2749–2765.

Goguel, J., (1953). Le régime thermique de l'eau souterraine. Ann. Des Mines, Pris, 10, pp. 3-32.

Guigue, S. (1947). Les sources thermo-minérales de l'Algérie, étude géochimique, bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie, série 3, volume 2.

Hellal, S. (2017). Étude de la nature de l'eau de source d'Ain Franine (Kristel, wilaya d'Oran) et son utilisation. Thèse magister université sidi bel Abbes.

Issaâdi, A. (1992). Le thermalisme dans son cadre géostructural. Apports à la connaissance de l'Algérie profonde et de ressource géothermales.

Jean rodier et coll dunod paris, (2005). L'analyse de l'eau eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 8PeP édition.

Journal officiel de la république algérienne N°13 a publié le 3 safar 1428-21 février 2007. Un décret relatif aux eaux thermales.

Julie. (2015).Article les 10 plus belles sources d'eaux chaudes du monde. Site : easy l'officiel des vacances.

Kachi, N. (2015). Impacts du périmètre irrigué sur la qualité des eaux souterraines dans le Bassin-versant de la Seybouse. Thèse de doctorat. Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie.175 p.

Khallef,B, Brahmia,K, Oularbi.A.R.(2020). À Application des indices de télédétection à la cartographie des zones urbaines et sols nus : cas de la ville de Guelma (Nord-est de L'Algérie). International journal of innovation and applied studies ISSN 2028-9324 Vol. 28 No. 2 Jan 2020, pp. 452-457.

Lahonder, J. C. (1987). Les séries ultratelliennes d'Algérie Nord-Orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Thèse doctorat, univ Paul Sabatier, Toulouse (France).242p.

Laib.H, et Boubaa, F. (2018). Les sources thermo minérales de la wilaya de Guelma influence des conditions lithologiques et structurales. Mémoire de master Université de Jijel.

Lakhdari.F, Bouaicha.K, (2016). Diagnostic de la qualité des eaux de source et thermales De la Wilaya de Saida-Algérie- Effets thérapeutiques. Thèse de master Université de Mostaganem.

Mammeri, M. (2017). Le thermalisme de la région de Mila. Mémoire de magister en hydrogéologie université Constantine.

Mebarkia A, (2011). Etudes des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface, cas du barrage d'Ain Zada wilaya de Bordj Bou-Arreridj (NORD-EST ALGÉRIEN), Mémoire de Magistère, Université Badji Mokhtar, Annaba, 228p ;

Nalco, (1983) Manuel de l'eau, Edition TEC- DOC – Lavoisier, Paris ;

Nieva, D. & Nieva, R., (1987). Developments in geothermal energy in Mexico—part twelve. A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. Heat Recovery Systems and CHP 7: 243–258.

Parkhurst, D.L. & Appelo, C., **(2013).** Description of input and examples for Phreeqc version 3.A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse

geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p., available only at https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/.

Raoult, J. F. (1974). Géologie du centre de la chaîne nummidique (nord du constantinois, Algérie). Thèse sciences, Paris (France), Mémoire. Soc Géol. Fr. nouveau. Série, n°121.

Rodier J., (2005). L'analyse de l'eau : eaux naturelle, eaux résiduaires, eaux de mer, Edition Dunod, Paris, 1320 p ;

Sami K (1992). Recharge mechanisms and geochemical processes in a semi-arid sedimentary basin, Eastern Cape, South Africa. Journal of Hydrology 139(1-4): 27-48. DOI: 10.1016/0022-1694 (92)90193-y

Schoeller H, (1962). Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche,exploitation et évaluation des ressources. Editions Masson et Cie, 642 pages.

Schoeller. H, (1963). La Classification Géochemique des eaux,. IASH publication,, GeneralAssembly of Berkeley: 16–24.

Société française d'ingénierie (Sogréah). (2005). Etude d'actualisation et de finalisation du plan national de l'eau.

Steve Hagimont. (1848). Los banos minérales. Université de Versailles-Saint-Quentine.

Suess, E., (1902). Ueber heisse Quellen. Verh. Gesell. Deutch Nat. Und Aerzte ni Karlsbad, Bd. I, Leipzig.

Tonani, F.B., (1980). Some Remarks on the Application of Geochemical Techniques in geothermal exploration. In: Strub, A.S. & Ungemach, P. (eds): Advances in European Geothermal Research. Springer Netherlands (Dordrecht): 428–443.

Trabelsi.s, bouri.S & ben bhia.H. **(2007).** Contribution des approches hydro chimiques et géothermométries à l'étude des eaux thermales de la province fluorée tunisienne (Nord-Est Tunisien). Revue des énergies renouvelables CER'07 Oujda, 85-88.

Verdeil, P. (ed.). (1974). Carte 1/50000 des eaux minérales, thermales et thermominérales de l'Algérie.

Vila J. M., (1971). Carte géologique de Guelma, Sonatrach-Algérie.

Villa, J. M. (1969). Relation paléogéographiques et structurales entre le flysch de penthiévre et les unités externe de la dorsale kabyle dans la région de jemmapes. Bull. Soc. Géol., Paris(France).

Villa, J. M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-Tunisiens. Thèse doctorat, université de Pierre et Marie Curie, Paris VI (France), 2 Vol, 665p. Pp 133-140.

ZAHI, F. (2014). Hydrogéologie approfondie. Cours de master I. université de Jijel.

Site internet :

-www.guide-piscine.fr : articles les différents types d'eaux thermales. (Dernière visite 26-03-2022).
-https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/(Dernière visite 8-03-2022).
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Guelma#cite_note-RGPH2008:1-2 (Dernière visite 3-03-2022)..