

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma
Département des Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Géologie Appliqué

Option : Hydrogéologie

THÈME :

**Hydrochimie des eaux des sources de la localité de AIN
LARBI (wilaya de Guelma)**

▪ **Présenté par :**

✚ **Aouissi Roumayssa**
✚ **Houili Kenza**

▪ **Devant le jury :**

✚ Président : Ghreib Lassaad	Pr	Université de Guelma
✚ Rapporteur : Nouar Tahar	Pr	Université de Guelma
✚ Examinatrice : Mdm.Laila Benacer	MCA	Université de Guelma

JUIN 2022

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre gratitude à Allah le Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, la persévérance, la patience et la capacité d'entreprendre et de mener à bien ce travail de recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui a nous fait l'honneur de bien vouloir évaluer avec attention nos travail :

- A Monsieur le Professeur **NOUAR Tahar** de la faculté de SNV-STU Université 8 Mai 1945 notre directeur de mémoire pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses précieux conseils qui nous ont guidés durant cette recherche.

- A Monsieur le Professeur **GHEREIB Lassaad** de la Faculté de SNV-STU–Université 8 Mai 1945, trouve ici l'expression de nos vifs remerciements pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

- A Madame le Docteur **BENACER Laila** Maitre de conférences A de la faculté de SNV-STU Université 8 Mai 1945 pour avoir accepté d'examiner cette mémoire, soyez assurée de notre plus profond respect et de notre profonde gratitude.

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu tout puissant, qui a tracé le Chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie à :

A mes très chers parents **Houili Sebti** et **Ouari Souad**, source de vie, d'amour et d'affection.

A mes chers sœurs **Ibtissem Nedjwa Hind** et leurs enfants et mariés, source de joie et de bonheur.

A toute ma famille, toute particulièrement ma cousine **Houili Lina** source d'espoir et de motivation.

Chère meilleure amie avant d'être binôme **Aouissi Roumayssa**

A tous mes amis, tout particulièrement **Noura** et **Noussaiba** mes seuls repaires dans la vie.

A vous cher lecteur.

Houili Kenza

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu tout puissant, qui a tracé le Chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie à :

Mon trésor dans la vie, la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie mes très chers parents **ZIENEDINE AOUISSI** et **YAMINA SEKFALI**, pour tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon bien être. Rien au monde ne pourrait compenser les sacrifices qu'ils ont endurés durant mes années d'étude de l'école maternelle jusqu' à l'université. Que dieu vous garde et vous donne santé et longue vie.

A ma très chère grand-mère **AICHA** qu'elle m'a beaucoup encouragé, Que dieu vous protège.

A ma sœur **YASMINE** et mon frère **KHALIL**, merci d'être la source de mon sourire, j'espère que vous trouverez le bon chemin qui vous mènera vers une vie plus gaie et plus sûre, Que Dieu t'exauce tous tes vœux.

A toute ma famille surtout mes cousines : **RAYA, SARA, DOUSSA, LINA** et **MARWA**.

A mes meilleurs amis : **IKHLAS, RAHMA, DOUDOU, RANIA** et surtout mon binôme **KENZA**, merci d'avoir été le rayon de soleil dans les journées les plus ténébreuse.

A tous mes professeurs.

A tout ma promotion.

A tous ceux qui me sont chers.

Aouissi Roumayssa

Résumé

L'eau de source de la localité d'Ain Larbi est la ressource la plus importante. Ces sources naturelles sont captées pour répondre à la demande en eau potable et d'irrigation dans la zone d'étude. Dans le présent travail de recherche, un groupe de sources a été évalué, établissant ses caractéristiques à travers une série d'analyses physico-chimiques effectuées sur des échantillons d'eau et l'intégration des données obtenues dans des diagrammes hydrochimique.

La nature de sa composition chimique est liée à l'interaction eau-roche avec un faciès dominant Ca-Mg-HCO₃ et Cl-Ca résultant de la dissolution de minéraux tels que la calcite, l'aragonite et la dolomie. Selon sa qualité à des fins d'irrigation, il a été jugé apte à l'usage et ne présente aucun danger pour la plante ou la perméabilité du sol. L'application de l'IQE a montré que sa qualité est bonne comme eau potable.

Mots clés : Hydrochimie, Eau potable, Eau d'irrigation, Sources.

Abstract

The spring's water of the Ain Larbi locality is the most important resource. These naturel springs are captured to meet the demand for drinking and irrigation water in the study area. In the present research work, a group of springs was evaluated, establishing its characteristics through a series of physicochemical analyses performed on water samples and the integration of data obtained in hydrochemical diagrams.

The nature of its chemical composition is related to water-rock interaction with a dominant Ca-Mg-HCO₃ and Cl-Ca facie as a result of the dissolution of minerals such as calcite, aragonite and dolomite. According to its quality for irrigation purposes, it was considered suitable for use and does not cause any danger to the plant or the permeability of the soil. The application of WQI has shown its quality as drinking water.

Key words: Hydrochemistry, Drinking water, Irrigation water, springs.

المخلص

الطلب على مياه الشرب والري في منطقة الدراسة عين العربي في العمل البحثي الحالي، تم تقييم مجموعة من الينابيع، وتحديد خصائصها من خلال سلسلة من التحليلات الفيزيائية والكيميائية التي أجريت على عينات المياه وتكامل البيانات التي تم الحصول عليها في الرسوم البيانية الهيدروكيميائية.

ترتبط طبيعة تركيبته الكيميائية بتفاعل الماء والصخور مع $Ca-Mg-HCO_3$ و $Cl-Ca$ السائدة نتيجة لتفكك المعادن مثل الكاسيت والأراجونيت والدولوميت. وبحسب جودته لأغراض الري فقد كان يعتبر مناسباً للاستخدام ولا يسبب أي خطر على النبات أو نفاذية التربة. لقد أظهر تطبيق، (WQI) جودت المياه صالحة للشرب.

الكلمات المفتاحية: هيدروكيمياء، الماء الصالح للشرب، الماء الصالح للسقي. الينابيع.

Table des matières :

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE 1 GEOLOGIE

1.1. Introduction.....	4
1.2. Géologie.....	4
1.2.1. Les unités telliennes.....	4
1.2.2. Le numidien.....	4
1.2.3. Quaternaire ancien.....	5
1.2.4. Tectonique.....	5

CHAPITRE 2 HYDROCLIMATOLOGIE

2.1. Introduction.	7
2.2. Facteurs météorologiques étudiés.	7
2.2.1. Etude des précipitations.	7
2.2.1.1. Introduction.	7
2.2.1.2. Etude des précipitations mensuelles.	7
2.2.2. Température.	8
2.2.3. La neige.....	8
2.3. Evapotranspiration.....	9
2.3.1. Evapotranspiration Potentielle (ETP).....	9
2.3.2. Evapotranspiration réelle (ETR).....	9
2.4. Diagramme pluviométrique.....	10

2.5. Ruissellement.....	11
2.6. Hydrodynamique des sources.....	12
2.7. Conclusion.....	15

CHAPITRE 3 MATERIELS ET METHODES

3.1. Introduction.....	17
3.2. Echantillonnage.....	17
3.3. Matériel et méthodes de prélèvement.....	17
3.4. Transport des échantillons.....	17
3.5. Analyses physico-chimiques.....	18
3.5.1. Les paramètres physiques.....	18
3.5.2. Potentiel en hydrogène (pH)	18
3.5.3. La température (T°C)	18
3.5.4. La conductivité (CE)	19
3.6. Les paramètres chimiques.....	19
3.6.1. Dosage du calcium (Ca ²⁺)	19
3.6.2. Dosage de sodium et potassium (Na ⁺ et K ⁺).....	20
3.7. Les chlorures (Cl ⁻)	21
3.8. Détermination des sulfates (SO ²⁻⁴)	22
3.9. Dosage de nitrates (NO ₃ ⁻).....	25
3.10. Dosage des nitrates (méthode spectrométrique)	26
3.11. Conclusion.....	27

CHAPITRE 4 : HYDROCHIMIE

4.1. Introduction.....	29
4.2. Balance ionique.....	29
4.3. Facies hydrochimique.	29
4.3.1. Diagramme de Piper.	30
4.3.2. Diagramme de Chadah.	30
4.4. Chimisme de l'eau.	31
4.5. Modélisation hydrogéochimique.	34

4.5.1. Etat de saturation et pCO ₂	34
4.6. Étude statistique et analyse multi variée.....	35
4.6.1. Statistique descriptive.....	35
4.6.2. Matrice de corrélation.....	36
4.6.3. Analyse en composante principale.....	37
4.7. Usage de l'eau.....	39
4.7.1. Potabilité.....	39
4.7.2. Usage agricole.....	41
4.7.2.1. Pourcentage de sodium soluble (SSP).....	41
4.7.2.2. Taux d'absorption de sodium (SAR).....	42
4.7.2.3. Carbonate de sodium résiduel (RSC).....	43
4.7.2.4. Indice de perméabilité (IP).....	44
4.7.2.5. La conductivité électrique (CE).....	44
4.8. Conclusion.....	45
CONCLUSION GENERALE.....	47
REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE.....	50

Liste des figures

Figure 1 : Situation de la zone d'étude.....	1
Figure 2 : Diagramme pluviométrique.....	11
Figure 3 : Courbe de récession.....	13
Figure 4 : Diagramme de Piper	30
Figure 5 : Diagramme de Chaddah	31
Figure 6a : Diagramme de Gibbs	31
Figure 6b : Diagramme de Gibbs	32
Figure 7 : Graphe de HCO_3 en fonction de Ca+Mg (méq/L)	33
Figure 8 : Graphe de Cl en fonction de Na	33
Figure 9 : Graphe de (Ca+Mg) en fonction de Na.....	34
Figure 10 : ACP (F1 x F2)	38
Figure 11 : ACP (F1xF3)	39
Figure 12 : Diagramme de Wilcox.....	42
Figure 13 : Diagramme de Richards.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et topographiques	7
Tableau 2 : Précipitations mensuelles.....	8
Tableau 3 : Températures mensuelles C°	8
Tableau 4 : Bilan d'eau de Thornthwaite	10
Tableau 5 : Valeur de correction des lames d'eau ruisselée	12
Tableau 6 : Paramètres du bilan	12
Tableau 7 : Paramètres moyens de récession des sources sur une période de neuf mois.....	14
Tableau 8 : Analyse physico-chimique des sources de Ain Larbi (mg/l)	29
Tableau 9 : Indice de saturation de quelques minéraux et PCO ₂	35
Tableau 10 : Statistique élémentaire de la zone d'étude.....	36
Tableau 11 : Matrice de corrélation des différents paramètres, CE et pH	37
Tableau 12 : Valeurs propres et facteurs.....	38
Tableau 13 : Valeurs des poids et poids relative des paramètres	41
Tableau 14 : Indice de qualité IQE.....	41
Tableau 15 : Différents paramètres intervenant dans la qualité des eaux à des fins agricoles.....	44

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales.

ADE : L'agence de distribution d'eau.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

BI : La balance ionique.

CE : Conductivité Electrique.

Cv : coefficient de variation.

Déf : Déficit agricole.

EDTA : Acide éthylène Diamine Tétra Acétique.

ETP : Evapotranspiration Potentielle.

ETP_C : Evapotranspiration Potentielle corrigé.

ETR : Evapotranspiration Réelle.

EXC : Excédent.

Fc : facteur de correction.

I : Infiltration.

IS : Indice de saturation.

IQE : L'indice de la qualité de l'eau.

IP : L'indice de perméabilité.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

P : Précipitations.

PAI : Produit de l'activité ionique.

PCO₂ : La pression partielle de CO₂.

pH : Potentiel en Hydrogène.

Q : Débit.

QR : Débit de base.

QR0 : Débit de départ de vidange.

R : Ruissellement.

RFU : Reserve en eau Facilement Utilisable.

RSC : Carbonate de sodium résiduel.

S.A.R : Le Rapport d'Adsorption du Sodium.

SSP : Pourcentage de sodium soluble.

TDS : Teneur en Sel Dissous.

TH : Titre Hydrotimétrique.

Vt : Le volume de transit.

Wi : le poids relatif.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

1. Situation géographique :

La localité de Ain Larbi est située à une trentaine de kilomètres de Guelma et appartient à la haute Seybouse. Il est d'extension Nord-Sud d'une quarantaine de kilomètres de long et d'une vingtaine de kilomètres de large, pour une superficie de 514 km² (figure 1). Ce bassin est limité:

- Au Nord par les monts par la commune de Khezaras.
- Au Sud par la Mahouna par la commune de Sedrata.
- Au Sud-Ouest par Ain Makhoulf.
- A l'est par les monts de Bouhachana et Ain Sendel.
- A l'Ouest par le mont Débagh.

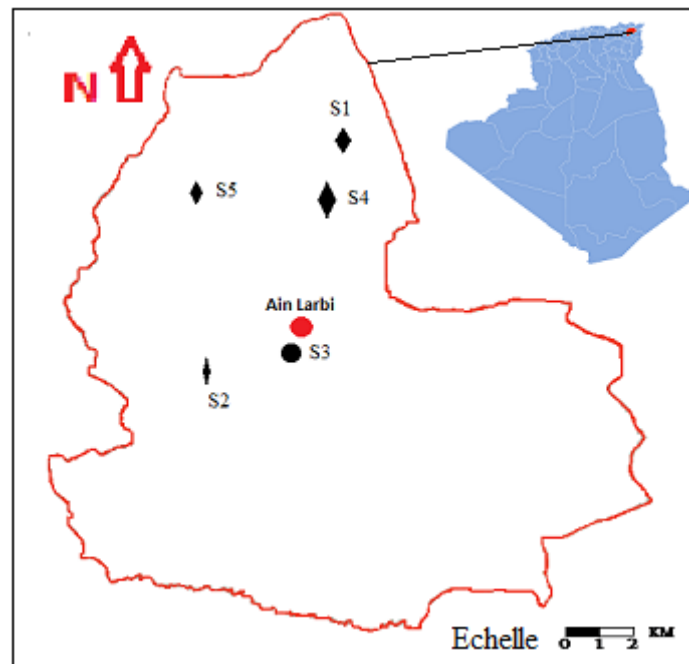


Figure 1 : Situation de la zone d'étude

2. Situation hydrique de la région :

L'eau est une ressource précieuse et la plus utilisée. L'eau est l'une des substances chimiques les plus abondantes sur terre, car elle couvre les deux tiers de la surface terrestre. De la quantité totale d'eau mondiale, seulement 2,4% sont distribués sur le continent, dont seule une petite partie peut être utilisée comme eau douce. L'eau douce disponible pour l'homme représente à

peine 0,3 à 0,5 % de l'eau totale disponible sur la terre et par conséquent, son utilisation judicieuse est impérative [Ganesh et al.1995].

Dans la région de Ain Larbi, Les eaux de sources sont devenues une ressource nécessaire au cours des dernières décennies en raison de l'augmentation de leur utilisation pour l'alimentation humaine et l'irrigation. Au cours des dernières décennies, la demande d'eau douce a considérablement augmenté en raison de la croissance rapide de la population et du rythme accéléré de la sécheresse.

Le travail consiste à discuter de l'adéquation des eaux souterraines à la consommation humaine et de la qualité de l'irrigation.

Notre mémoire sera subdivisé en plusieurs parties :

- Dans une partie « géologique », nous décrirons les différentes formations géologiques composant le bassin, et la tectonique cassante surtout au sud.

- Dans une deuxième, nous traiterons de l'hydrologie de la région en calculant les paramètres du bilan hydrologique et l'hydrodynamique pour le calcul des volumes d'eau écoulés pendant la période de suivi.

- la troisième partie concerne matériels et méthodes.

- Enfin dans la quatrième partie nous nous intéresserons à l'hydrochimie des eaux de la nappe et des sources et ce par l'exploitation d'une campagne d'analyse de cinq sources.

CHAPITRE 1
GEOLOGIE

1.1. Introduction :

La région de Ain Larbi fait partie de l'ensemble géologique du Tell d'Algérie Nord orientale. Cet ensemble qui s'étend de la région de Constantine à la frontière Algéro-Tunisienne a une longueur d'environ 200 kilomètres. Sa structure, trop complexe, est du essentiellement à des mouvements tectoniques tertiaires, surtout miocènes. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la région de Guelma. On peut citer Draste de La Chavanne (1910), J. M. Vila. (1980) et A. Chouabi (1987).

1.2. Géologie :

La région étudiée est caractérisée par des formations géologiques appartenant au domaine Tellien et aux formations du domaine du Flysch. La description lithologique est la suivante.

1.2.1. Les unités telliennes :

Elles appartiennent au domaine externe de la chaîne des Maghrébides dans le Nord-est Algérien. Cette unité correspond au domaine tellien externe qui est constitué par des formations paléogènes, où l'on distingue :

- **Paléocène :** Il est franchement marneux parfois feuilleté, épais d'une cinquantaine de mètres. On y trouve de rares niveaux de calcaires de couleur jaune, intercalés dans cette formation. Les niveaux les plus bas contiennent des biefs de calcite.
- **Eocène :** Il est constitué de calcaires lités à globigérines, à faciès "suessonien". A la base, on trouve des bancs de calcaires à silex, surmontés par des calcaires en bancs décimétriques, sans silex, riches en nodules phosphatés et ferrugineux. Ces calcaires sont eux- même surmontés par les marnes lutétiennes à boules jaunes.

1.2.2. Le numidien

Il forme principalement les reliefs de la région étudiée et réapparaît au nord-ouest. Il est caractérisé par un flysch constitué par les trois termes suivants :

- Epaisse série d'argile verte et rouge à tubatomatuculum d'âge Oligocène

- Alternance d'argile et de gros blocs de grès souvent hétérométrique d'âge Aquitanien. - Argiles, marnes et silexites correspondent au Burdigalien inférieur.

1.2.3. Quaternaire ancien :

Caractérisé par des éboulis mélangés parfois à des argiles numidiennes, des argiles et des marnes mélangées à des fragments de calcaires. Ces formations remplissent les dépressions et des collines de la région.

1.2.4 Tectoniques :

La région d'étude a subi une tectonique cassante de la phase fini-Lutétienne qui a donné naissance à un désordre du au mouvement de ladite phase en créant des plissements et un degré de fracturation élevé. En raison de son de sa structure, faillée et diaclase, les nappes de Ain Larbi constituent un immense réservoir aquifère qui trouve ses exutoires au contact des terrains imperméables des marnes paléocène. Il s'agit d'eaux provenant de la nappe inférieure aux calcaires et qui, traversant par des fissures ces calcaires plus ou moins inclinés se trouvant arrêtées par suite de la présence d'une faille et sont obligés à cause de l'imperméabilité des marnes sous-jacentes d'expurger à leur contact (Dareste De la CHAVANNE, 1910).

Le Numidien qui couvre toutes les nappes, sans être impliqué dans cette tectonique et le glissement par gravité des formations telliennes a permis à la nappe numidienne de glisser sur les nappes telliennes.

CHAPTRE 2
HYDROCLIMATOLOGIE

2.1. Introduction :

L'étude des données climatologique est nécessaire pour connaître les mécanismes de circulation des eaux superficielles et souterraines. Elle permet de mettre en évidence les termes du bilan qui sont les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement pour la région étudiée, nous avons pu disposer des données de la station de Ain Larbi située a (ANRH, 2020). Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géographiques et topographiques.

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et topographiques.

Station	Altitude (m)	Longitude	Latitude	Période d'observation
Ain Larbi	930	05° 64'E	40° 9'N	2020/2021

Source ANRH 2020

2.2. Facteurs météorologiques étudiés :

2.2.1. Etude des précipitations :

2.2.1.1. Introduction :

Dans notre étude, seules les données récentes ont été prises en considération du fait que la station ancienne été déplacée de son emplacement initial, ce qui rend difficile l'interprétation de leurs données.

2.2.1.2. Etude des précipitations mensuelles

Les précipitations mensuelles et leur variation, en relation avec les facteurs thermiques, conditionnent l'écoulement, le régime des cours d'eau ainsi que celui des aquifères Les hauteurs de pluie enregistrée sur la période d'une année, enregistrées à la station de Ain Larbi située à 930m d'altitude font ressortir des variations saisonnières avec un minimum en juillet de 0 mm et un maximum en janvier (63 mm).Le tableau 2 donne la distribution des précipitations mensuelle sur un cycle hydrologique.

Tableau 2 : Précipitations mensuelles

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne
P, mensuelle	15	45	58	62	63	32	32	25	10	6	00	9	357

2.2.2. Température :

La température est un facteur climatique qui régit les conditions du déficit d'écoulement. Les données de température en notre possession concernent la station de Ain Larbi. Nous constatons que le mois le plus froid de l'année correspond à janvier et le mois le plus chaud correspond au mois d'août. La différence entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est de 13.75 °C (Tableau 3).

Tableau 3 : Températures mensuelles °C

Mois	Températures mensuelles °C
Septembre	20
Octobre	16
Novembre	12.42
Décembre	9.01
janvier	7.25
Février	8.23
Mars	10
Avril	10.81
Mai	16
Juin	19.75
Juillet	21
Aout	23.20

2.2.3. La neige :

Dans la région de Ain Larbi, les chutes de neige varient d'une année à l'autre mais en général, elle accompagne les pluies d'hiver et les grêles couvrent les sommets dont l'altitude varie entre

800 et 1100 m. Le couvert neigeux peut atteindre facilement 20 cm mais il ne peut pas être calculé. La durée d'enneigement est de 3 jours maximum.

2.3. Evapotranspiration :

C'est la quantité d'eau rejetée sous forme de vapeur dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol que par transpiration du sol des végétaux. Deux types sont signalés.

2.3.1. Evapotranspiration Potentielle (ETP)

Elle regroupe deux phénomènes essentiels qui sont la valeur limite évaporable par les végétaux et le pouvoir évaporant de l'atmosphère. Plusieurs formules ont été utilisées mais la mieux adaptée est celle de (Thornthwaite, 1954).

La relation empirique de Thornthwaite est basée uniquement sur la température moyenne de l'air :

$$T = \frac{16(10T)^a}{I} F(\lambda)$$

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois en mm ;

T : Température de l'air ;

I : Indice annuel = $\sum_i^{12} (T/5)^{1.50}$;

A = $(1.6/100) I + 0.50$;

F(λ) : Coefficient d'ajustement mensuel qui est fonction de la latitude.

On admet pour qu'il est écoulement, il faut que le pouvoir évaporant soit satisfait et par ailleurs la RFU est également satisfaite avant l'écoulement. Ainsi, on établit le bilan d'eau mensuel à partir des pluies et du mois de l'ETP et de la RFU.

2.3.2 Evapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau évaporée par les plantes et qui correspond donc à l'évaporation potentielle diminuée de la RFU. Cette ETR est calculée à l'aide de la formule de TURC (1954) est indépendante de la RFU.

$$\text{ETR (mm)} = P / (0.9 + P^2/L^2)^{1/2}$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

$$L = 300 + 25T + 0.05 T^2;$$

T : température moyenne annuelle C°.

L'analyse du bilan hydrique permet d'observer l'ETR qui représente 96 % des précipitations, le déficit agricole commence à partir du mois de juin jusqu'au mois d'octobre avec un maximum au mois d'août (124.60mm). La reconstitution de la réserve utile commence en novembre et s'épuise au mois de mai. L'écoulement se produit après que la RFU soit satisfaite (RFU=100 mm), il dure 2 mois, de janvier jusqu'à fin Février avec un maximum au mois de février et mars (10,50 mm).

Tableau 4 : Bilan d'eau de Thornthwaite

Mois	T (C°)	ETP _C	Pr	RFU	ETR	Déf	Exc
S	20	95,5	15	0,0	15,0	80,5	0,0
O	16	64,9	45	0,0	45,0	19,9	0,0
N	12,42	39,7	58	18,3	39,7	0,0	0,0
D	9,01	23,4	62	56,9	23,4	0,0	0,0
J	7,25	18,3	63	100,0	18,3	0,0	1,6
F	8,23	21,5	32	100,0	21,5	0,0	10,5
M	10	34,6	32	97,4	34,6	0,0	0,0
A	10,81	41,5	25	80,9	41,5	0,0	0,0
M	11	46,8	10	44,1	46,8	0,0	0,0
J	19	104,9	6	0,0	50,1	54,8	0,0
J	21	123,5	0	0,0	0,0	123,5	0,0
A	23,2	133,6	9	0,0	9,0	124,6	0,0
Annuel	14,0	748,2	357,0		344,9	403,3	12,1

2.4. Diagramme pluviométrique :

La combinaison des paramètres température-précipitation permet de déterminer l'alternance des saisons dans une région et aussi de distinguer le climat d'une région à une autre. La courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations pendant les mois secs.

La saison sèche débute au mois de mai et se termine en fin septembre. Quant à la saison humide, elle commence à partir d’octobre et se termine en Avril. Ce dernier cycle est lié sans doute à la sécheresse qui a sévi la région. (Figure2)

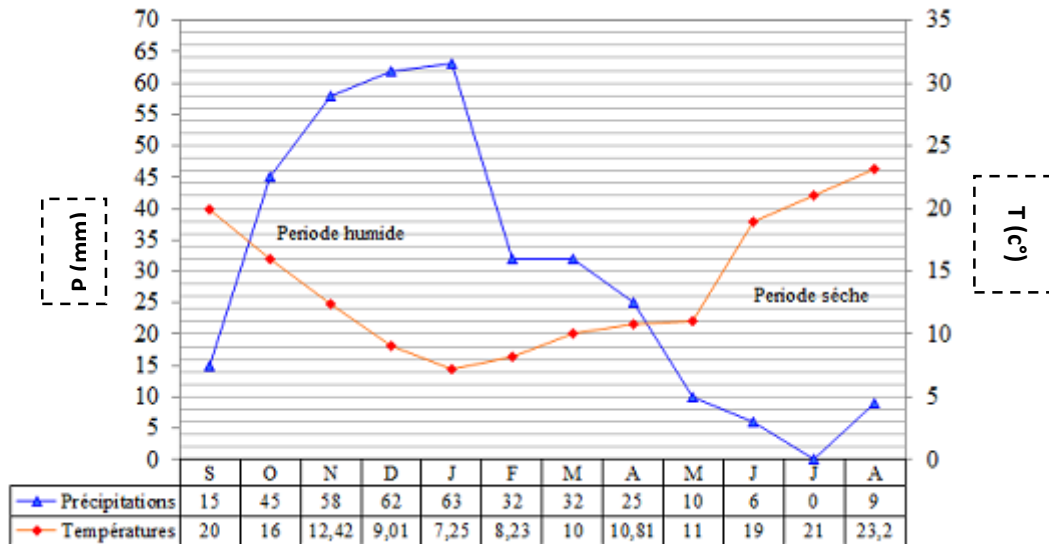


Figure 2 : Diagramme pluviométrique

2.5. Ruissellement :

Pour l’estimation de l’écoulement, l’application de la formule de (Tixeront-Berkalofest) habituellement utilisée en Algérie pour les précipitations inférieures à 600 mm et sur des très petits bassins versants. L’inconvénient est qu’elle ne tient pas compte de la nature du sol ou des formations traversées. Pour les petits bassins, Il faudrait donc faire des corrections en fonction de la nature du sol du bassin et de sa superficie (capacité de rétention, perméabilité, étanchéité...). Tous ces paramètres cités sont inconnus, de ce fait, nous avons jugé d’appliquer la formule de la (DGRE) Direction des ressources en eau Tunisienne la (DGRE). Cette méthode s’articule sur la lame d’eau écoulée et la pluviométrie moyenne (Majour, 1997). (Ghorbel, 1991) a tenté une corrélation en appliquant ces trois équations pour les différents bassins étudiés

G1-----R = 0.26P -80

G2-----R = 26P

G3-----R= 0.26P

Cet auteur a tenté de mettre en évidence une corrélation pour l'estimation du ruissèlement et ce par la correction de la lame d'eau écoulées (Tableau 5).

Tableau 5 : Valeur de correction des lames d'eau ruisselée

% quaternaire +alluvions	0	1-2	3-5	5-7	7-22	22-26	26-30	>30
C°	150	120	80	40	6	-20	-30	-80

Dans la localité de Ain Larbi, nous avons jugé d'appliquer la formule du groupe 33 étant donné que les sources émergent toutes des formations calcaires et grès numidiens et que le quaternaire est peu abondant. Nous avons jugé utile d'utiliser la formule G2.

$$R = 0.26P - C$$

Pour une lame d'eau précitée de 357 mm, un ruissèlement de 12.82 et une ETR de 344.90 mm Lui correspond une infiltration de 28.38 mm (Tableau 6).

Tableau 6 : paramètres du Bilan

P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
357	344.90	12.82	28.38

2.6. Hydrodynamique des sources :

Les sources de la zone d'étude proviennent des calcaires éocènes sont alimentés essentiellement par les précipitations. Il s'agit d'eaux provenant de la nappe inférieure aux calcaires et qui, traversant par des fissures ces calcaires plus ou moins inclinés se trouvant arrêtées par suite de la présence d'une faille et sont obligés à cause de l'imperméabilité des marnes sous-jacentes d'expurger à leur contact. L'existence, du désordre est dû aussi au mouvement tectonique qui, en créant des vides, facilite la pénétration de l'eau dans un matériel perméable. La rapidité de la réponse aux précipitations peut être liée à l'existence d'un système faillé et d'un degré élevé de fissuration favorisant un écoulement rapide (Dareste De la CHAVANNE, 1907 et 1910). Pour connaître le Plusieurs méthodes sont utilisées pour la décomposition des hydrogrammes de crue. Pour les formations calcaires fissurés et karstiques,

les formules de (A. MANGIN, 1975) s'avèrent la plus adaptées à ce type de régime. L'équation est donnée par la relation.

$$Q(t) = q_0 + QR_0 e^{-\alpha t}$$

N'importe quel hydrogramme d'une source est caractérisé par les trois caractéristiques suivantes : la montée de la crue, la pointe, la décrue et le tarissement (Figure 3).

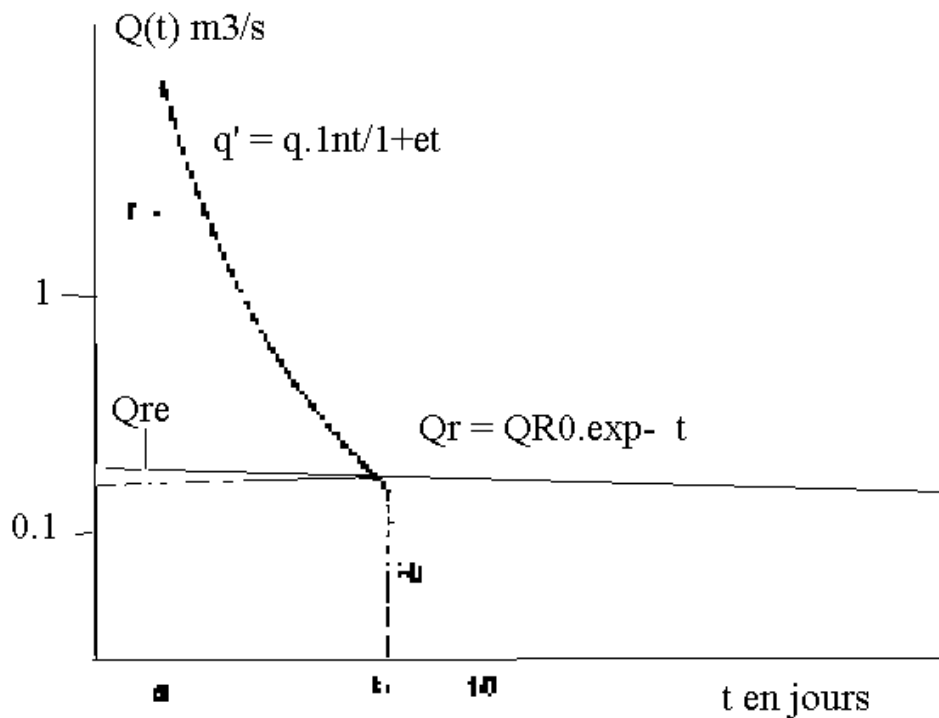


Figure 3 : Courbe de récession

L'équation ci-dessus correspond à la courbe de décrue et l'équation suivante définit la courbe de tarissement :

$$QR = QR_0. e^{-\alpha t}$$

La courbe de récession désigne donc toute la partie décroissante de l'hydrogramme. Cette méthode est appliquée aux sources du massif calcaire.

QR : Débit de base ;

QR_0 : Débit de départ de vidange.

α : coefficient de tarissement Le coefficient de tarissement de la source est égal à l'inverse du temps que met le débit pour décroître de 0.632 émet partie de sa valeur c'est à dire $\alpha = 1/ T$ ou T correspond au temps nécessaire pour qu'un débit de 1 m³ passe de 0.368 m³ / s (in Nouar, 2007). La détermination de α est donnée par la formule :

$$\alpha = [\text{Log } Q_{RA} - \text{Log } Q_{Rb}] / [0.4343 (t_2 - t_1)]$$

Le volume de transit V_t est la quantité d'eau moyenne écoulee pendant la période d'étude.

$$V_t = Q_{\text{moy}} \times 86400 \times 270\text{m}^3/\text{an}$$

La méthode hydrodynamique, par l'étude des courbes de récession, ne peut à elle seule donner avec précision le volume total du réservoir du fait du manque de l'étude géophysique, de la porosité du milieu et la limitation des sous bassins qui reste trop confuse surtout au niveau de la région sud-est du bassin.

Par ailleurs, l'étude structurale montre des fracturations abondantes des séries anticlinales avec des directions variables qui semblent favorisé l'écoulement et la karstification de la région.

L'analyse hydrodynamique a permis de mettre en évidence des coefficients de tarissement de 10⁻⁶, ce qui indique des systèmes peu karstifiés ou mal drainés (Tableau7).

Tableau 7: Paramètres moyens de récession des sources sur une période de neuf mois

source	$\alpha \cdot 10^{-6} (j^{-1})$	$Q_{\text{moyen}} \text{L/s}$	$V_t \text{m}^3$
S1	2.53	0.161	3755.808
S2	1.53	0.180	4199.04
S3	0.19	0.251	585.532
S4	0.32	0.132	307.929
S5	0.23	0.171	398.908

2.7. Conclusion :

La région est caractérisée par une répartition des pluies mensuelles irrégulière, ceci est dû à la sécheresse qu'a connue la région depuis plus de deux décades.

L'évapotranspiration réelle calculée par la méthode de Turc est estimée à l'échelle de la localité 344,9mm. Ce phénomène est limité surtout en hiver où la période hivernale coïncide avec la période des pluies. Elle atteint son paroxysme surtout au mois d'août. Malgré sa caractéristique semi-aride, la partie sud du bassin présente une infiltration proche d'approximativement de 28 mm où affleurent les calcaires éocènes qui présentent une bonne perméabilité de fissures. L'hydrodynamique a permis de mettre en évidence et ce par les courbes de récession des coefficients de tarissement de l'ordre de 10^{-6} .

CHAPTRE 3

MATERIELS ET METHODES

3.1. Introduction :

Dans le but de procéder à une analyse physico-chimique des eaux de notre zone étude (Ain Larbi), nous avons procédé à un prélèvement des échantillons de ces eaux dans le respect strict suivant les techniques d'échantillonnage.

Notre étude est fondée sur l'échantillonnage de cinq sources permettant à la fois une étude de chaque point et leur comparaison sur la base de prélèvements simultanés.

3.2. Echantillonnage :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. L'échantillon doit être homogène représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, il convient d'avoir des connaissances précises sur les conditions de prélèvement et de son importance pour la fiabilité des résultats.

3.3. Matériel et méthodes de prélèvement :

Le matériel de prélèvement doit faire l'objet d'une attention particulière, pour la physico-chimique, on utilise des bouteilles en plastiques d'une contenance d'un demi-litre.

Pour l'analyse physico-chimique, au moment de prélèvement, la bouteille sera rincée plusieurs fois par l'eau à analyser puis remplie jusqu'au bord et fermée. Les prélèvements doivent être scellés et munis d'une étiquette : la date, l'heure et le point de prélèvement.

3.4. Transport des échantillons :

Pour optimiser un meilleur résultat sur les analyses :

- Le délai entre le prélèvement et l'analyse au laboratoire doit être le plus court possible ;
- Les échantillons doivent être transportés dans un glacière à une température de 4°C pour les protéger contre le rayonnement solaire.

3.5. Analyse physico-chimique :

3.5.1 Les paramètres physico-chimiques :

▪ Mesures in situ :

Quatre paramètres physiques (PH, Température, conductivité électrique et TDS) ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un multi paramètre de terrain de marque HANNA H19828.

Il faut suivre les procédures suivantes après avoir plané directement la sonde de mesure dans un récipient d'eau échantillonnée.

Immerger la sonde dans l'échantillon à mesurer en évitant les chocs ;

-allumer l'instrument ;

-l'instrument affiche les différents paramètres selon la programmation effectuée

3.5.2. Potentiel en hydrogène (PH) :

Le PH mesure la concentration en ions H de l'eau. L'alcalinité mesure donc l'ensemble des substances susceptibles de réagir avec les ions hydrogènes. Le PH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un PH-mètre ou par colorimétrie.

3.5.3. La température (T°C) :

La température de l'eau est le paramètre de confort pour les usages. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment).

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique bactérien et l'évaporation de l'eau

-La température dépend de :

-La situation géographique ;

-La saison ;

-la profondeur (la température des profondeurs est généralement plus faible qu'en surface) ;

- la couleur de l'eau (une eau sobre absorbe plus fortement la chaleur) ;
- le volume de l'eau ;
- l'origine des eaux alimentant les lacs, les rivières (les eaux venant de la montagne sont plus froides que les eaux de ruissellement) ;
- les rejets industriels qui généralement élèvent la température de l'eau.

3.5.4. La conductivité (CE) :

La conductivité électrique d'une eau (γ) est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 à 2 cm² de surface et séparées l'une à l'autre de 1cm.

Elle est directement liée à la teneur en minéraux dissous ionisés. Elle augmente avec la température. Elle est l'inverse de la résistivité (σ).

En mesurant la conductivité, nous essayons d'avoir une estimation de la quantité de sels ionisables dissous.

3.6. Les paramètres chimiques :

➤ *Analyses au laboratoire*

On procède à une analyse complète de tous les éléments majeurs (Ca^{+2} ; Mg^{+2} ; Na^+ ; K^+ ; Cl^- ; SO_4^{2-} ; HCO_3^- ; PO_4^-) ainsi que le titre alcalimétrique complet TAC et le titre hydrotimétrique TH.

3.6.1. Dosage du calcium (Ca^{+2}) :

Le calcium s'introduit dans le système d'eau douce sous l'action de la motorisation des roches, particulièrement celle des roches calcium, et par entraînement à partir du sol dans les eaux d'infiltration, par lixiviation et par ruissellement. On a constaté que la lixiviation du calcium à partir du sol augmentait nettement avec l'acidité de l'eau.

a) Principe (méthode par complexométrie) :

Le dosage est fait avec le PH élève (entre 12 et 13), le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'intervient pas. Par ailleurs, l'indicateur choisi ne se combine qu'avec le calcium.

b) Réactifs :

-indicateur coloré : murexide

-solution d'E.D.T. A (N /50)

-solution d'hydroxyde de sodium à 2N.

c) Mode opératoire :

-introduire 50ml d'eau à analyse dans un erlenmeyer au col large.

-ajouter 2ml de solution d'E.D.T. A jusqu'à virage du rose au violet soit V le volume de solution d'E.D.T. A versé.

d) Expression des résultats :

Le facteur de correction est égal :

$$fc = \frac{\text{volume versé}}{\text{volume théorique (12.5ml)}} \quad (10)$$

$$[\text{Ca}^{+2}]\text{mg/l} = V (\text{E.D.T.A}) \times fc \times 8$$

3.6.2. Dosage de sodium et potassium (Na⁺et K⁺)**1) Principe**

La photométrie de flamme permet le dosage des cations alcalins Li ; Na et K.

La photométrie de flamme est constituée de trois éléments : le bruleur, le monochromateur et d'une cellule photoélectrique ; d'un afficheur.

-mode opératoire

-préparation des solutions étalons

• Solution mère

Préparer 100ml d'une solution mère renfermant 0.500g/l de sodium et 1.500g/l de potassium en prélevant les masses ci-dessous :

-NaCl pur pour les analyses : 0.127g

-KCl pur pour les analyses : 0.286g

-eau distillée.

2) Résultats

La lecture se fait directement sur l'écran.

3.7. Les chlorures (Cl⁻) :

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ce sont les océans qui contiennent de loin la plus grande quantité de chlorures dans l'environnement. Dans les eaux souterraines, leur concentration dépend des roches traversées.

a) Principe

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

b) Réactifs

-solution de chromate de potassium à 10%

-solution de nitrate d'argent N/10

c) Mode opératoire

-introduire 25ml d'eau à analyser dans un Erlenmeyer à col large ;

-ajouter 02 à 03 gouttes de solution de chromate de potassium à 10%

-verser au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3minutes ;

-soit V le nombre de millilitres de nitrate d'argent N /50 utilisées

Expression des résultats

$$\text{Teneur} = V(\text{ml}) \times 142$$

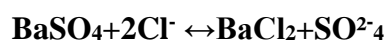
3.8. Détermination des sulfates (SO₄²⁻) :

Les sulfates peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfates est l'oxydation des minerais de sulfates, la présence des schistes ou des déchets industriels.

Le sulfate est un des éléments majeurs des composés dissouts dans l'eau de pluie.

a) Principe

L'objet de la présente est de décrire la détermination de sulfate par spectroscopie. Les ions sulfates sont précipités et dosés à l'état de sulfate de baryum suivant la réaction :

**b) Réactifs**

-Solution mère de sulfate à 1g/L à partir de Na₂SO₄

Peser 2.4 mg NaSO₄

1000ml d'eaux distillée

-Solution stabilisante

Acide chlorhydrique.....600ml

Ethanol.....200ml

Chlorure de sodium.....150ml

Eau distillée.....1000ml

-Solution de chlorure baryum

Chlorure de baryum.....150ml

Expression de résultat

Acide chlorhydrique5ml

Eau distillée.....1000ml

c) Gamme d'étalonnage

- Prendre 8 béchers de 25ml
- Laver très bien avec du savon et une lavette
- Rincer abondamment avec l'eau de robinet
- Rincer avec une solution d'acide chlorhydrique
- Rincer avec l'eau de robinet puis avec de l'eau distillée

d) Mode opératoire

- prendre 20ml d'eau à analyser puis compléter à 100ml d'eau distillée
- Ajouter 5 ml de la solution stabilisante
- Ajouter 2ml de chlorure de baryum
- Agiter énergiquement pendant 1 minute
- Passer au spectrophotomètre à $\lambda=420\text{nm}$

Expression des résultats

$$\text{Mg/l } SO_4^{2-} = \text{La valeur lue sur le spectraux la dilution}$$

TAC/TA :

Titre alcalimétrique simple et complet (TA et TAC)

Le titre TAC exprimera l'alcalinité totale de l'eau. Il a une importance fondamentale dans la connaissance de capacité d'entartrage de l'eau et dans le traitement des eaux des chaudières vapeur.

Les définitions de titres TA et TAC peuvent sembler étonnants mais découlent de la méthode de dosage utilisée qui est un dosage acido-basique.

Les titres alcalimétriques TA et TAC sont mesurés par ajout d'une solution acide titrée (liqueur alcalimétrique) en présence d'indicateurs colorés (ou d'un PH-mètre) dont le changement de couleur indique leur neutralisation.

a) Principe

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

b) Réactifs

- Acides chlorhydrique (HCl) concentré à 37%
- Solution d'acide chlorhydrique (HCl) à 0.01 N

c) Matériels

- PH-mètre ;
- Electrode ;
- burette manuelle ou burette automatique ;
- Agitateur magnétiques ;
- bêchers de 50 ml ;

d) Mode opératoire

Comme pour toute méthode instrumentale, la méthode d'essai est très étroitement liée aux matériels dont on dispose, se reporter à la notice de l'appareil. Amener 100 ml d'eau à analyser au PH=4.3 ; soit V2 le volume total d'acide employé.

Si le PH est supérieur à 8.3, verser lentement l'acide chlorhydrique pour obtenir cette valeur.

Noter le volume V1 au dosimat. Suivre les instructions de l'utilisation du PH-mètre.

e) Mesure et calcul du résultat

Le titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC), exprimés en mg/L sont donnés respectivement par les expressions :

$$-TA = (V1 \times N \times 1000) \times \text{masse molaire des carbonates} / V$$

$$-TAC = (V2 \times N \times 1000) \times \text{masse molaire des bicarbonates} / V$$

-la concentration des bicarbonates sera :

$$(HCO_3) \text{ mg/l} = V_2 \times 61 \text{ volume échantillon} \times N/1000$$

V₂= Volume de la solution d'acide chlorhydrique à 0.01 N versé de la burette.

N est la normalité de la solution d'acide chlorhydrique=0.01N

3.9. Dosage de nitrates (NO₃-) :

Composé minéral d'azote et d'oxygène, le nitrate représente le dernier stade de nitrification.

a) Principe (méthode salicylate de sodium) :

En présence de salicylate de sodium 0.5% (renouvellement toutes les 24 heures).

-Solution d'hydroxyde de sodium 0.5% ; 30g de NaOH dans 100 ml d'eau distillée.

-H₂SO₄ concentré ;

-Tartrate double sodium et de potassium

-Hydroxyde de sodium.....400g

-Tartrate double sodium et de potassium.....60mg

-eau distillée.....1000ml

Laisser refroidir avant de compéter à 1000ml.

Cette solution doit être conservée dans un flacon de polyéthylène.

-Solution mère d'azote d'origine nitrique à 1000mg/l ;

-Nitrate de potassium anhydre.....0.722g

-Eau distillée.....1000ml

-Chloroforme.....1ml

-Solution fille d'azote d'origine nitrique à 5mg/l

Appareillage : Etuve ; spectrophotomètre H.V visible

b) Mode opératoire :

Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser ;

Ajouter 02 à 03 gouttes de NaOH à 30% ;

Ajouter 1ml de salicylate de sodium ;

Evaporer à sec au bain marie ou à l'étuve 75-88°C.

(Ne pas surcharger ni surchauffer très longtemps) laisser refroidir ;

Reprendre les résidus avec 2 ml de H₂SO₄, laisser reposer 10mn

Ajouter 15 ml d'eau distillée ;

Ajouter 15 ml de tartrate double de sodium et de potassium puis passer au spectre au 415nm.

Le résultat est directement lu sur l'appareil en mg/l

3.10. Dosage des nitrates (méthode spectrométrique) :

Les nitrates NO₃ sont généralement absents (ou à peine mesurables). Leur présence est indicatrice d'une pollution due à des rejets d'eau non épurée ou d'un ralentissement du processus de nitrification. Ils sont toxiques à faibles doses (dose létale pour les poissons 3_5 mg/l)

a) Principe

Les ions nitrites réagissent en milieu acide (pH=1.90) avec le sulfamide en formant sel de diazonium (diazotation) qui forme avec le N-(1-naphtyle) - ethylénediamine-dichlorohydraté un colorant azoïque rouge. $\lambda_{\text{Max}}=543\text{nm}$

b) Réactifs

- Solution de nettoyage
- Solution d'acide chlorhydrique (à d=1.12g=25%)
- Solution du réactif

20g de sulfamide (C₆H₈N₂S) à dissoudre dans un mélange de 50ml d'acide phosphorique d=1.71g/ml=85% de masse et d'eau distillée. Dans cette solution, dissoudre 1g de N-(1-naphtyle) -ethylénediamine-dichlorohydraté(C₁₂H₁₆CL₂N₂).

Compléter avec l'eau distillée une fiole jaugée à un volume de 500ml, Cette solution est stable pendant un mois si elle est gardée à l'obscurité (bouteille en verre marron bien fermée) et au frigo.

➤ **Solution d'acide phosphorique**

Dans une fiole jaugée de 250ml dissoudre 25ml d'acide phosphorique ($d=1.71\text{mg/l}=85\%$ en masse) dans 150ml d'eau distillée. Après refroidissement à la température ambiante, on complète à l'eau distillée à 250ml.

➤ **Solution standard de 100mg/l**

Dissoudre 0.50g \neq 2mg de nitrite de sodium (NaNO_3), sécher pendant 2heures à 105°C dans 750ml d'eau distillée compléter à 1 litre.

3.11. Conclusion :

Le respect des principes d'échantillonnage ainsi que l'efficacité des techniques de mesure nous ont permis d'avoir un bon résultat des teneurs en éléments majeurs des eaux d'études, ce qui nous permet de faire une bonne analyse physico-chimique des eaux afin de déterminer leur usage respectif tout en mettant en évidence les corrections à apporter à ces eaux.

CHAPITRE 4
HYDROCHIMIE

4.1. Introduction :

Pour identifier les caractéristiques hydrogéochimiques et les processus de salinisation des eaux des sources émanant de l'aquifère carbonaté et numidien, des analyses géochimiques sont effectuées. Pour la présente étude 5 sources ont été sélectionnées (Figure 4). Pour la détermination des paramètres physiques, ainsi que pour l'analyse des ions majeurs, ont eu lieu en mars 2022 (Tableau 8).

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de l'agence de distribution d'eau (ADE) sise à Hammam Débagh où s'est déroulé notre stage et ayant traités aux éléments majeurs. Le tableau récapitule les résultats.

Tableau 8 : Analyse physico-chimique des sources de Ain Larbi (mg/l).

Source	TDS	Ph	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	BI (%)
S1	493	7,38	692	80	14	45	1	214	75	45	5	1
S2	490	7,52	611	100	10	10	2	262	55	25	10	4
S3	590	7,42	742	102	19	35	1,20	280	65	45	24	0
S4	568	7,67	764	98	17	42	1	256	70	56	15	2
S5	663	7,57	1002	110	12	89	3	192	152	77	20	5

CE = $\mu\text{S}/\text{cm}$; pH = unité de pH et les autres éléments sont exprimés en mg/l

4.2. Balance ionique :

La balance ionique ou charge ionique permet de déceler la fiabilité ou le rejet de l'analyse. Elle est donnée par la relation (Schoeller, 1962) suivante :

$$\text{BI (\%)} = [(\Sigma (\text{Cations}) - \Sigma (\text{anions}) / \Sigma (\text{cations} + \text{anions})) \times 100]$$

La balance ionique calculée varie entre 0 et 5%. Ces valeurs sont \leq à 5 % ce qui implique que les données sont fiables quant à leur utilisation pour l'étude.

4.3. Facies hydrochimique :

La classification des faciès hydrochimique en était réalisées par le diagramme de Piper et de Chadah.

4.3.1. Diagramme de Piper :

Pour déterminer les faciès hydrochimique de la région étudiée, le diagramme de Piper(1945) a été utilisé. Ce diagramme utilise les éléments majeurs pour représenter les différents faciès des eaux. Il permet également de voir l'évolution d'une eau, passant d'un faciès a un autre, grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses d'échantillons pris à des endroits différents. Le diagramme de Piper est très utile pour représenter toutes autres sortes de groupes d'analyses. Le diagramme de Piper est composé de deux triangles et un losange. Les deux triangles (un triangle portant les cations et un autre les anions) sont d'abord remplis puis ensuite le losange. Les valeurs utilisées sont exprimées en % et en méq/L.

Il en ressort de ce diagramme (Figure 4) deux types de faciès hydrochimique :

- le faciès bicarbonaté calcique correspondant à celui des eaux des sources issues des calcaires éocènes.
- le faciès chloruré calcique et magnésien correspondant aux eaux de la source issue des formations numidienne.

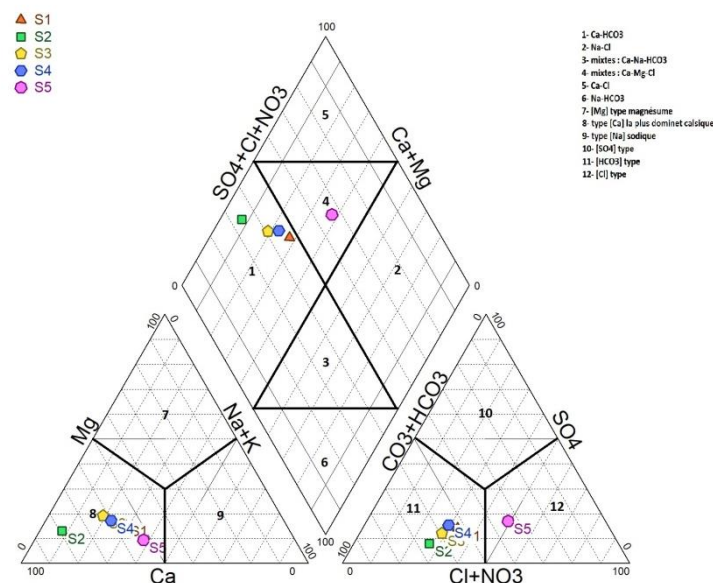


Figure 4 : Diagramme de Piper

4.3.2. Diagramme de Chadah :

Chadah a développé un diagramme hydrogéochimique pour analyser l'activité qui permet de mettre en relief l'évolution des cations et anions (Chadah, 1990). Il en ressort de ce diagramme 2 types d'eau (Figure 5) :

- Eau riche en bicarbonate calcium et magnésium (Ca-Mg-HCO3).

- Eau riche en Calcium, magnésium et chlorures (Ca-Mg-Cl).

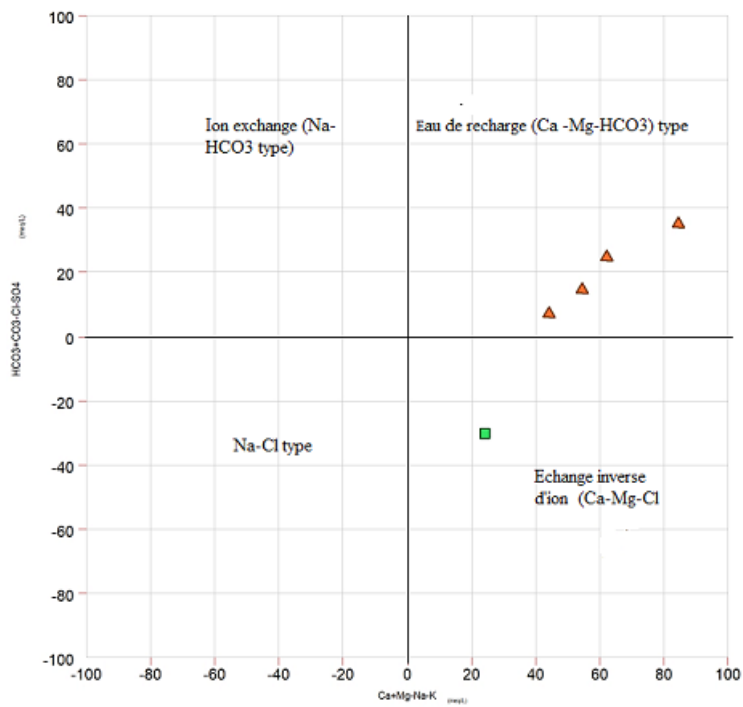
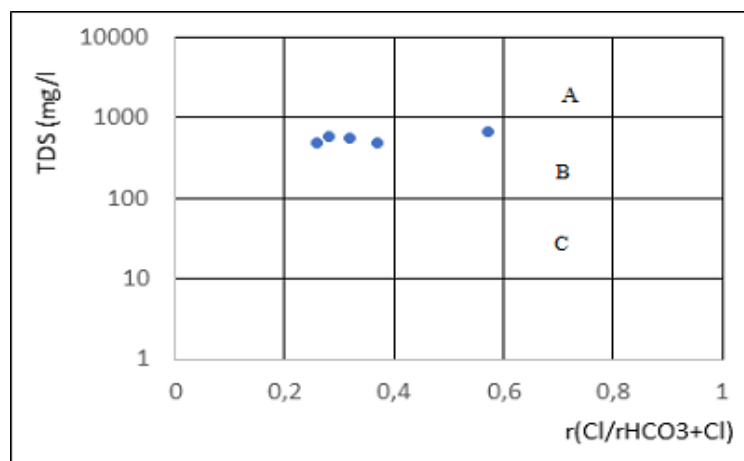


Figure 5: Diagramme de Chaddah.

4.4. Chimisme de l'eau :

Pour mettre en évidence les processus du mécanisme contrôlant le chimisme de l'eau de des sources de la région étudiée, le diagramme de Gibbs (1970) a été sollicité. Il montre trois domaines auxquels appartiennent les différentes catégories des eaux analysées (Figure 6.a). Le premier domaine est celui des eaux des forages des deux localités qui montrent une minéralisation influencée par les processus d'interaction eau – roche (Figure6.b).

a)



b)

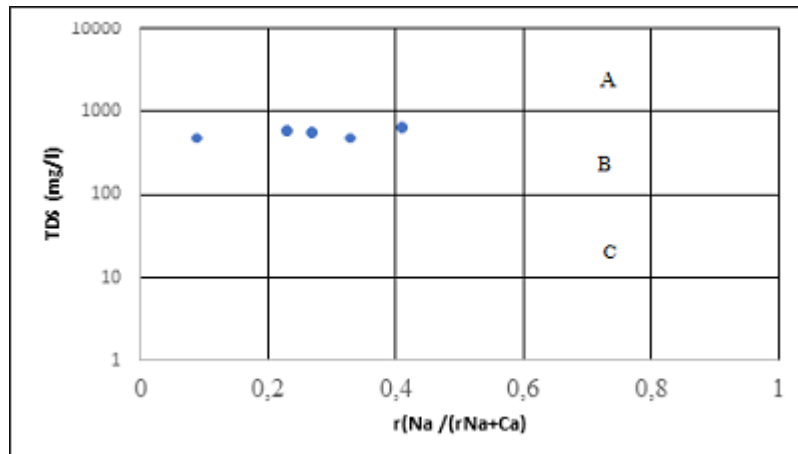


Figure 6.a et 6.b : Diagramme de Gibbs.

Pour élucider aussi, les principaux facteurs contrôlant la chimie de l'eau peuvent être expliqués à l'aide du graphique Ca^{2+} - Mg^{2+} en fonction de HCO_3^- (Figure 7). Nous constatons que cette projection permet de mettre en évidence les tendances suivantes :

- La première que le point situé au-dessus de la droite 1 : 1 indique que la dissolution des minéraux carbonatés prévaut dans un aquifère.
- La deuxième, si les échantillons ne tombent pas sur la ligne, il pourrait s'agir de l'altération des silicates (Zaidi et al. 2015).

Le graphique (Figure 8) Cl^- en fonction du Na^+ montre que les échantillons sont au-dessus de la ligne 1/1. Selon Meybeck (1987), cela résulte d'un échange d'ions inverse entre le sodium et le chlorure dans lequel il y a un enrichissement des eaux en chlorures.

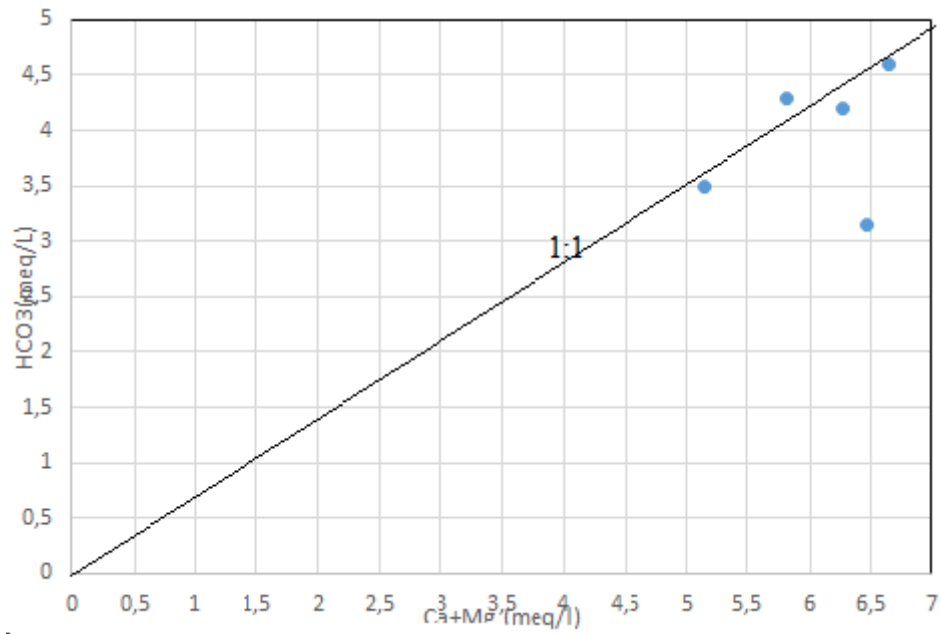


Figure 7 : Graphe de HCO_3^- en fonction de $\text{Ca} + \text{Mg}$ (méq/L).

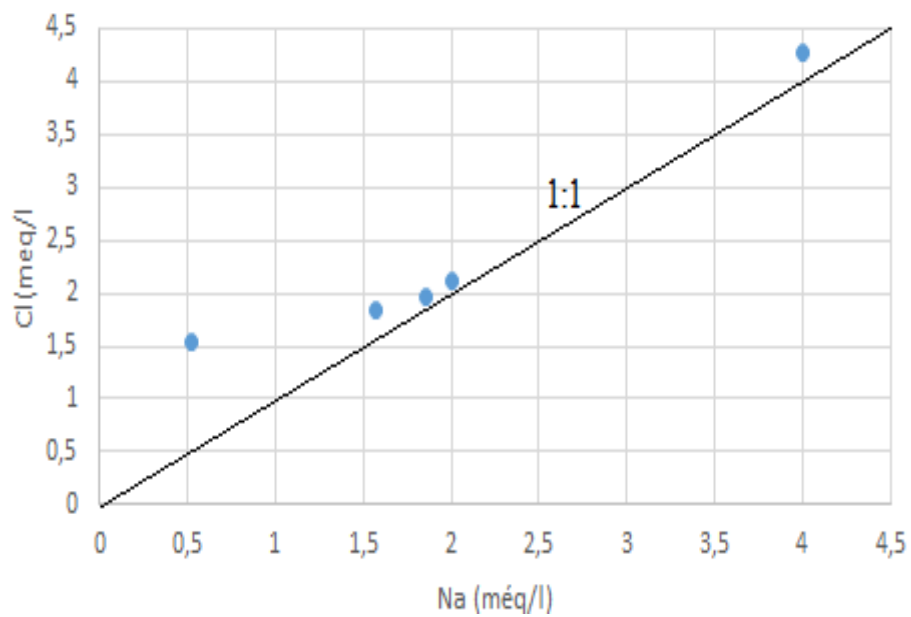


Figure 8 : Graphe de Cl^- en fonction de Na

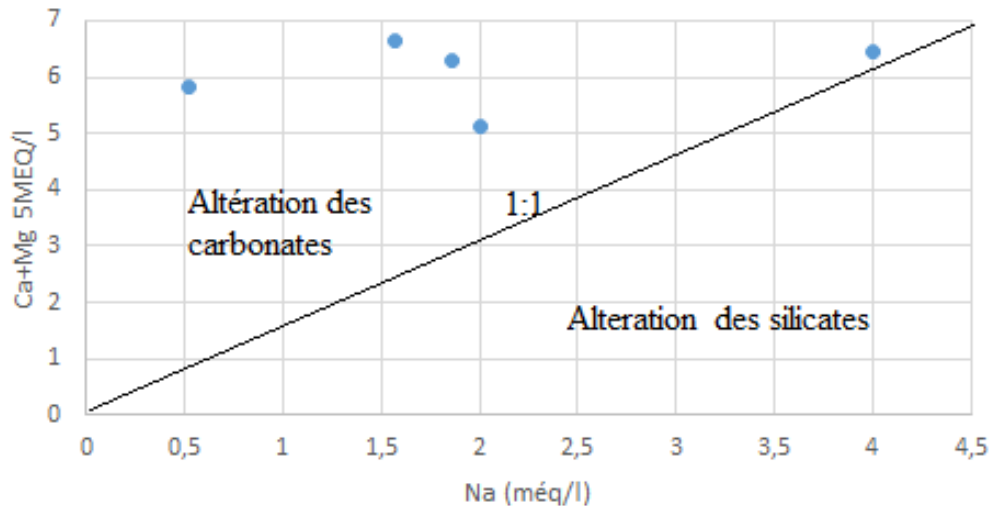


Figure 9 : Graphe de (Ca+Mg) en fonction de Na.

4.5. Modélisation hydrogéochimique :

Afin d'identifier et d'évaluer les processus géochimiques responsables de l'évolution chimique observée dans l'aquifère de la région d'étude, on a d'abord calculé, à partir des données analytiques relatives à l'échantillonnage du mois de mars 2022, l'état de saturation des minéraux qui réagissent la composition de l'eau de la localité de Ain Larbi, ont été estimés au moyen du programme PHREEQC (Parkhurst et al, 1980). Cet indice est donné par la relation suivante :

$$IS = \log PAI/K_T$$

IS : indice de saturation.

PAI : produit de l'activité ionique.

KT : constante d'équilibre la température de 25°C.

4.5.1. Etat de saturation et pCO₂ :

Les valeurs obtenues de l'indice de saturation pour la calcite, la dolomite, l'anhydrite et le gypse, ainsi que pour la pression partielle de CO₂, sont résumées dans le tableau 9.

À partir de ce tableau, on peut dire que les eaux des sources sont sursaturées en calcite (IS > 0,1), dépassant la zone d'équilibre qui pour Langmuir (1977) est comprise entre - 0,1 et + 0,1.

Pour la dolomite, si l'on admet un indice d'incertitude dans le calcul de ce minéral de $\pm 0,5$ (Plummer et al. 1990), on peut dire que 99% des points d'eau sont à l'état d'équilibre à l'exception de la source S1 (-0.64).

Pour l'anhydrite et gypse, leurs indices de saturation sont inférieurs à zéro pour tous les points considérés, indiquant une sous-saturation généralisée. Cet indice croît avec l'augmentation de la teneur en sulfates dissous se rapprochant ainsi de l'équilibre.

Les valeurs obtenues de la pression partielle de CO_2 varient entre $0.55 \times 10^{-2} \text{atm}$ et $1.14 \times 10^{-2} \text{atm}$. On peut noter que cette pression partielle est faible. Comparativement avec la valeur de la pression atmosphérique qui est de l'ordre de $10^{-3,5} \text{atm}$, on peut noter que les eaux des sources sont en contact avec le gaz carbonique du sol (Mudry, 1990).

Tableau 9 : Indice de saturation de quelques minéraux et pCO_2 .

Source	Calcite CaCO_3	Dolomite CaMgCO_3	Anhydrite CaSO_4	Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pCO}_2(10^{-2})$ Atm
S1	0.16	-0.64	-1.96	-1.74	0.98
S2	0.50	-0.21	-2.12	-1.90	0.85
S3	0.41	-0.10	-1.88	-1.66	1.14
S4	0.61	0.26	-1.80	-1.58	0.59
S5	0.42	-0.33	-1.63	-1.41	0.55
Min	0.16	-0.64	-2.12	-1.90	0.55
Max	0.61	0.26	-1.63	-1.41	1.14

4.6. Étude statistique et analyse multi-variée :

4.6.1. Statistique descriptive :

Le tableau 10 récapitule les différentes valeurs de la statistique élémentaire à savoir la moyenne, l'écart-type, minimum, maximum et Cv.

Nous constatons qu'il y'a une grande variabilité dans la composition des eaux. D'une manière générale, le coefficient de variation (Tableau) de la plupart des paramètres est important surtout pour les nitrates, Sulfates, Chlorures et potassium et à moindre degré les autres éléments chimiques (24.30 à 39 %), exception faite pour le pH, TDS, calcium et bicarbonates (CV <25%).

Selon les analyses physico-chimiques réalisées sur les différents échantillons d'eau des sources, il a été observé que le pH variait de 7.38 et 7.67 avec une moyenne 7.51, ce qui implique une présence d'un milieu légèrement alcalin. Les valeurs de la conductivité électrique ont été variées dans l'intervalle 611 à 1002 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que les sels totaux dissous (TDS) étaient présents à des concentrations allant de 490 à 663 mg/L, estimant une moyenne de 560 mg/L.

La concentration de Na^+ présentait une valeur minimale de 10 mg/L et une valeur maximale de 89 mg/L, avec une moyenne de 44.20 mg/L tandis que celle de Ca^{2+} variait de 80 à 110 mg/L, avec une moyenne de 98 mg/L. ces deux cations étant les plus abondants dans les échantillons. Le Mg^{2+} 10 et 19 mg/L avec une moyenne de 14.40 mg/L.

Concernant les anions, l'ion HCO_3^- était le plus abondant avec une concentration moyenne de 240.80 mg/L, suivi du Cl^- avec une concentration moyenne de 83.40 mg/L. les SO_4^{2-} présentent une moyenne de 49.60 mg/L et enfin NO_3^- étaient de 14.80 mg/L.

Tableau 10 : Statistique élémentaire de la zone d'étude.

Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Coef. Var
TDS	490	663	560.80	72.38	12.90
CE	611	1002	762.20	146.37	19.20
Ph	7.38	7.67	7.51	0.11	1.55
Ca^{2+}	80	110	98	11.04	11.27
Mg^{2+}	10	19	14.40	3.64	25.32
Na^+	10	89	44.20	28.57	64.65
K^+	1	3	1.64	0.86	52.73
HCO_3^-	192	280	240.80	36.45	15.14
Cl^-	55	152	83.40	39.05	46.82
SO_4^{2-}	25	77	49.60	18.96	38.24
NO_3^-	5	24	14.80	7.59	51.32

4.6.2. Matrice de corrélation :

Une matrice de corrélation est utilisée pour évaluer la dépendance entre plusieurs variables en même temps et deux à deux. Le résultat est une table contenant les coefficients de corrélation entre chaque variable et les autres. Il existe différentes méthodes de test de corrélation : le test de corrélation de Pearson, la corrélation de Kendall et de Spearman qui sont

des tests basés sur le rang. La matrice de corrélation de Pearson (Tableau 11) montre que Certains paramètres sont bien corrélés entre eux. Habituellement ce sont les éléments solubles, dont la concentration ne peut être affectée par des processus de précipitation, dissolution, ou échange ionique, qui présentent ces corrélations élevées.

Les coefficients les plus forts relient $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ et $\text{K}^+\text{-Cl}^-$, etc. La conductivité qui correspond à la minéralisation

Tableau 11 : Matrice de corrélation des différents paramètres (mg/l) CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ et pH en Unité pH)

	TDS	PH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
TDS	1	0,38	0.93	0.76	0.23	0.81	0.56	-0.32	0.79	0.87	0.82
PH	0.38	1	0.35	0.53	-0.08	0.20	0.26	-0.02	0.24	0.39	0.21
CE	0.93	0.35	1	0.58	0.01	0.96	0.64	-0.65	0.95	0.96	0.56
Ca^{2+}	0.76	0.53	0.58	1	-0.07	0.33	0.7	0.06	0.49	0.41	0.79
Mg^{2+}	0.23	-0.08	0.01	-0.07	1	-0.01	-0.66	0.48	-0.27	0.14	0.50
Na^+	0.81	0.20	0.96	0.33	-0.01	1	0.54	-0.80	0.95	0.97	0.35
K^+	0.56	0.26	0.64	0.70	-0.66	0.54	1	-0.54	0.78	0.45	0.28
HCO_3^-	-0.32	-0.02	-0.65	0.06	0.48	-0.80	-0.54	1	-0.82	-0.66	0.24
Cl^-	0.79	0.24	0.95	0.49	-0.27	0.95	0.78	-0.82	1	0.88	0.34
SO_4^{2-}	0.87	0.39	0.96	0.41	0.14	0.97	0.45	-0.66	0.88	1	0.46
NO_3^-	0.82	0.21	0.56	0.79	0.50	0.35	0.28	0.24	0.34	0.46	1

Globale est contrôlée surtout par Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- .

4.6.3. Analyse en composante principale :

Rattaché à la famille de la statistique multi variée, l'analyse en composantes principales (ACP) permet de transformer des variables corrélées en variables décorrélées baptisée "composantes principales". Plus précisément, cette méthode vise à réduire le nombre de variables appliquées à des éléments chimiques, pour simplifier les observations tout en conservant un maximum d'informations.

Seules une, deux ou trois variables dites "composantes principales" sont conservées. Cette méthode a été utilisée par plusieurs auteurs à travers le pays (Nouar, 2016 ; Majour ,1997).

Le Choix du nombre de facteurs à extraire grâce à l'ACP en se fiant aux valeurs propres (Tableau12)dont la valeur est supérieure ou égale à un.

Tableau 12 : Valeurs propres et facteurs.

Axe	Valeur propre correspondant	Inertie expliquées (%)	Valeur propre cumulée	Pourcentage cumulé (%)
1	6.32	57.50	6.32	57.50
2	2.34	21.30	8.66	78.81
3	1.51	13.76	10.18	92.57

Premièrement, l'ACP a été appliqué, avec les trois premiers axes principaux (PC) accumulant92.57% de la variance totale des données, étant une valeur suffisante pour la caractérisation géochimique des échantillons (tableau12). PC1 explique (57.51 %) de la variance totale. Il porte dans sa partie positive les bicarbonates et dans sa partie négative les autres éléments. Cet axe discrimine probablement la minéralisation de l'eau. L'axe F2 est porté par les bicarbonates, calcium, TDS, Nitrates, CE, Sulfates et Magnésium et s'oppose au sodium, chlorures et potassium. Les premiers sont liés à la dissolution des carbonates et les seconds, il faut les chercher en surface. Cet axe discrimine l'origine des éléments chimiques(Figure10).

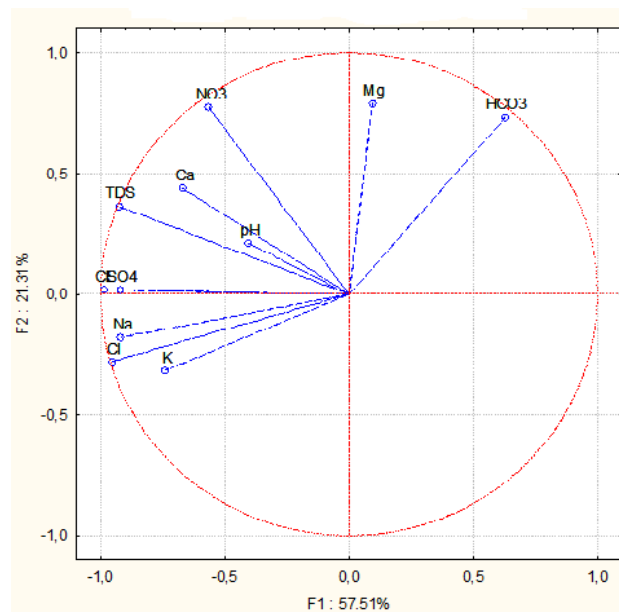


Figure 10 : ACP (F1 x F2).

L'axe F3 porte dans sa partie positive Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ , TDS, CE et Cl^- et s'oppose aux NO_3^- , HCO_3^- , Ca^{2+} et K^+ . Cet axe permet de rendre compte des eaux polluées par les nitrates et aux eaux non polluées (figure11).

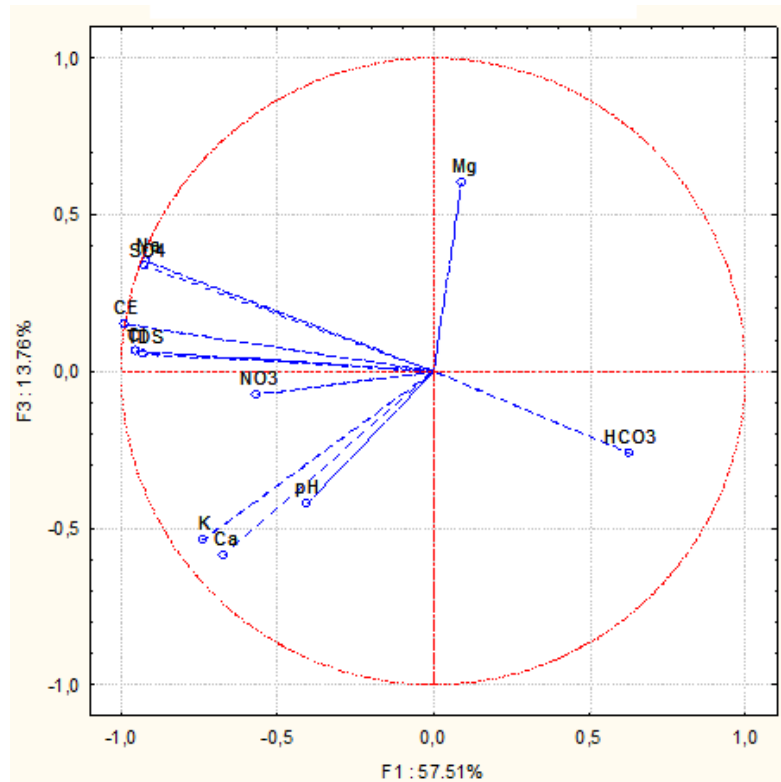


Figure 11 : ACP (FIxF3)

4.7. Usage de l'eau :

L'usage de l'eau pour la potabilité, l'utilisation domestique et pour des fins agricoles ; est régi par les conditions physico-chimiques de l'eau qui doit remplir certains critères spécifiques.

4.7.1. Potabilité :

L'indice de la qualité de l'eau (IQE) est un critère d'évaluation appliqué pour interpréter la qualité générale des eaux souterraines échantillonnées à un endroit particulier. Il quantifie différents paramètres de l'eau en une seule valeur pour faciliter l'interprétation de sa qualité (Tyagi et al. 2017). Il existe des quantités considérables de méthodes WQI utilisées dans d'autres pays après la WQI pionnière développée par Horton (1965) aux États-Unis. Dans cette

étude, l'IQE proposé par Brown et al. (1972) a été utilisé pour évaluer 18 paramètres d'adéquation de l'eau potable dans la région. Cette méthode est basée sur l'attribution de poids aux paramètres individuels des eaux souterraines (w_i) en fonction de l'importance relative des directives de l'OMS (2017) sur l'eau potable. Par exemple, le zinc n'est pas considéré comme important dans les directives de l'OMS sur l'eau potable, il se voit donc attribuer une valeur pondérale minimale de 1. Les concentrations). Les autres paramètres, tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , TDS, Na^+ , etc., reçoivent différentes valeurs de poids (1 à 5) en fonction de leur importance (tableau13).

Dans la première étape, Les poids individuels sont ensuite additionnés pour estimer le poids relatif (W_i) exprimé par l'équation suivante.

$$W_i = \Sigma w_i / \Sigma w_i$$

W_i : le poids relatif.

W_i : le poids de chaque paramètre.

Dans la seconde étape suivante, la concentration du paramètre individuel est divisée par la limite standard de l'OMS de ce paramètre et multipliée par 100 pour obtenir la note de qualité (q_i), exprimée par l'équation suivante :

$$Q_i = (C_i/S_i) \times 100$$

Où q_i est l'indice de qualité, C_i , est la concentration du paramètre analysé et S_i , est la valeur limite du standard de l'OMS de chaque paramètre.

L'indice de qualité de l'eau (IQE) de chaque échantillon est finalement déterminé à partir du sub-indice S_i dans les équations ci-dessous :

$$S_i = W_i \times q_i \text{ et } WQI = S_i$$

Une classification de l'IQE proposé par Sahu et Sikdar (2008) a été adaptée pour cette étude (tableau 14). La classification évalue « excellente eau » pour les valeurs de l'IQE comprises entre (0–50) ; "eau de bonne qualité" de (51–100) ; "eau médiocre" de (101–200) ; "eau très médiocre" (201–300) et "eau potable impropre" (>300). L'IQE estimé dans la zone d'étude varie de 34.75 et 52.36 ce qui suggère que l'eau de la localité de Ain Larbi est "excellente à bonne (tableau 14).

Tableau 13 : Valeurs des poids et poids relative des paramètres.

Paramètre	Norme (OMS 2017)	Poids (wi)	Poids relatif (Wi)
pH	7.50	4	0.133
CE	1500	3	0.100
TDS	1000	4	0.133
Na ⁺	200	2	0.066
K ⁺	30	2	0.066
Ca ²⁺	200	2	0.066
Mg ²⁺	150	2	0.066
Cl ⁻	250	3	0.100
SO ₄ ²⁻	250	3	0.100
NO ₃ ⁻	50	5	0.166
		Σwi= 30	

Tableau 14 : Indice de qualité IQE

Classification de l'Indice de qualité (%)	Classe	Observation
0-50	Eau excellente	S1, S2, S3 et S4
51-100	Eau bonne	S5
101- 200	Eau mauvaise	
201-300	Eau très mauvaise	
>300	Eau impropre	

4.7.2. Usage agricole :

Afin d'évaluer les eaux souterraines pour les pratiques d'irrigation, elles doivent être analysées à l'aide d'un certain nombre de critères. Les échantillons d'eau seront évalués par quatre méthodes différentes. Pourcentage de sodium soluble (SSP), taux d'adsorption de sodium (SAR) carbonate de sodium résiduel (RSC) ; Mg ratio et Indice de perméabilité (IP). Les valeurs des différents paramètres calculé sont consignées dans le tableau.

4.7.2.1 Pourcentage de sodium soluble (SSP) :

Les sols contenant une grande proportion de sodium avec du carbonate comme anion prédominant sont appelés sols alcalins ; ceux dont le chlorure ou le sulfate est l'anion prédominant sont des sols salins, ordinairement, l'un ou l'autre type de sol enrichi en sodium supportera peu ou pas de croissance des plantes (Todd, 1980). La teneur en sodium est généralement exprimée en termes de pourcentage de sodium défini par l'équation :

$$Na^+ (\%) = 100. [(Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}))]$$

Les valeurs relatives au pourcentage de sodium (tableau 4) montrent que tous les échantillons d'eau souterraine entrent dans la catégorie excellente à bonne. Les valeurs oscillent entre 8,18 et 38,09 % donc les eaux sont aptes à l'irrigation sans aucune restriction (Wilcox, 1948). La combinaison du taux de sodium et conductivité permet de construire le diagramme de Wilcox. Ce diagramme fait ressortir cinq classes, excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise. Selon cette classification, les eaux de la localité de Ain Larbi sont excellentes et bonne pour l'utilisation agricole.

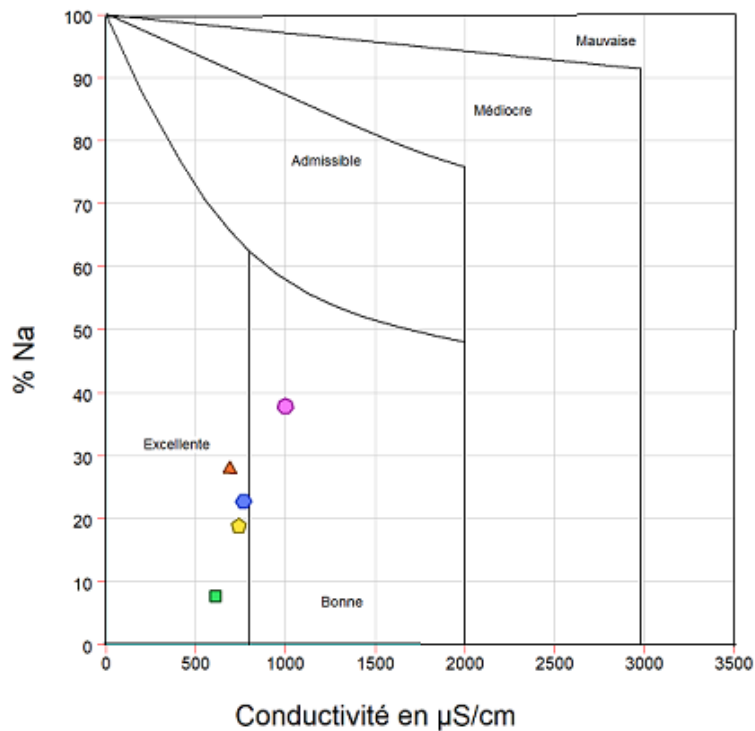


Figure 12 : Diagramme de Wilcox.

4.7.2.2. Taux d'absorption de sodium (SAR) :

Le sodium est l'un des actions les plus étudiés, en raison de ses effets toxiques sur les cultures et de ses effets bien connus sur la texture des sols. Une concentration élevée de sodium disperse les particules colloïdales du sol, ce qui rend le sol dur et résistant à la diffusion de l'eau. La pression osmotique dans le sol s'accumule alors et provoque des complications dans l'absorption

de l'eau par les racines des plantes (Richards, 1954). Le SAR est exprimé par la formule (US Salinity Laboratory, 1954), où les valeurs de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} sont en méq/l.

$$SAR = Na^+ / Ca^{2+} + Mg^{2+} / 2$$

La valeur SAR varie de 0,30 à 2.22méq/L avec une moyenne de 2,87méq/L. Toutes les eaux conviennent à l'irrigation car le SAR est inférieur à 10méq/L recommandé par (l'US Salinity Laboratory, 1954).

La combinaison du SAR et conductivité ont permis de mettre en évidence la classification des eaux. Selon ce diagramme, les eaux de la localité de Ain Larbi appartiennent à la classe C2S1 et C3S1 (Figure 13). Ces eaux conviennent à l'irrigation sans restriction pour le premier cas et avec restriction pour le deuxième cas (sol aéré et drainage).

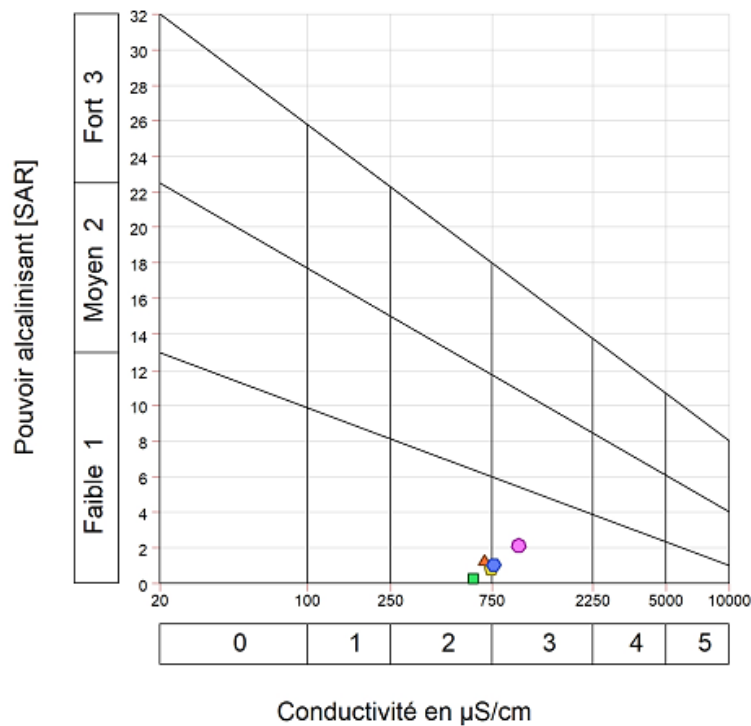


Figure 13 : Diagramme de Richards.

4.7.2.3. Carbonate de sodium résiduel (RSC) :

La forte concentration d'ions bicarbonate dans l'eau provoque la précipitation de Ca^{2+} et Mg^{2+} sous forme de carbonates et alors la proportion de sodium dans le sol augmente. Le RSC est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$RSC = (HCO-3 \times 0,0333) (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Les concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+} sont en méq/l et les valeurs d'alcalinité en mg/l.

L'eau d'irrigation ayant des valeurs RSC supérieures à 5 méq/l, a été considérée comme nocive pour la croissance des plantes, tandis que les eaux avec des valeurs RSC supérieures à 2,5 méq/l sont impropres à l'irrigation. Une valeur RSC comprise entre -0.10 et 2.90 méq/l est considérée comme la qualité marginale et une valeur < 1,25 méq/l comme la limite de sécurité pour l'irrigation (Richards 1954). Les valeurs RSC calculées dans les échantillons d'eau souterraine de l'aquifère de varient de -0.10 à 2.90 méq/l avec une moyenne de 1.82 méq/l (tableau 15). En ce qui concerne les valeurs RSC, tous les échantillons sont inadaptés à des fins agricoles sauf la source S5.

4.7.2.4 Indice de perméabilité (IP) :

L'indice de perméabilité (PI), selon les critères de Doneen (1962), permet de classer la qualité de l'eau pour l'irrigation en trois classes : excellente ($\text{IP} > 75$), bonne ($25 < \text{IP} < 75$) et insatisfaisante ($\text{IP} < 25$). Les valeurs IP sont comprises entre 39.41 à 53,43%. Ces valeurs classent nos eaux à la catégorie bonne et sont utilisées sans restriction au carbonate.

4.7.2.5. La conductivité électrique (CE) :

La minéralisation globale influe sur la plante. Cette minéralisation globale connue par la mesure de la conductivité électrique (CE) en $\mu\text{s}/\text{cm}$, les conductivités des eaux de nos 5 sources, sont résumées dans le tableau 15, en ressort de ce tableau que la conductivité électrique de toutes les sources appartient à l'intervalle de 611 à 1002 $\mu\text{s}/\text{cm}$ qui suggère que l'eau de la localité de Ain Larbi est bon pour l'irrigation.

Tableau 15 : Différents paramètres intervenant dans la qualité des eaux à des fins agricoles.

Source	Na%	SAR	RSC	IP %	CE $\mu\text{s}/$
S1	27.93	1.25	1.96	53.40	692
S2	8.18	0.30	2.90	39.41	611
S3	19.03	0.84	2.64	44.37	742
S4	22.76	1.05	2.21	47.30	762
S5	38.09	2.22	-0.10	53.43	1002
Min	8.18	0.30	-0.10	39.41	611
Max	38.09	2.22	2.90	53.43	1002

4.8. Conclusion :

D'après l'étude hydrochimique des eaux des sources de notre localité de recherche nous pouvons conclure que :

Selon les diagrammes de piper et Chadah en ressort que l'eau des ressources étudiées riche en Ca_Mg_HCO₃ et Ca_Mg_Cl.

Les eaux sont distinguées à l'alimentation humaine et l'usage agricole comparées aux normes de l'OMS.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail qui permis de faire la mise au point sur les principales connaissances géologiques, hydrologiques et hydrochimiques sur la région d'étude et d'en tirer certaines conclusions :

Du point de vue géologique, la localité de Ain Larbi est caractérisée par des formations calcaires éocènes fortement tectonisées et des formations numidiennes.

L'étude hydrologique a permis de mettre en évidence que la région présente un déficit en pluviométrie ($P= 357$ mm/an) avec une évapotranspiration réelle calculée de(344.90mm) et une infiltration de (28 mm/an).

Le bilan établi montre un excédent qui s'étend de (12,10mm/an) et un déficit (403,3mm) pour le reste de l'année.

Le jaugeage des sources pendant 9 mois, a permis de connaitre le volume de transit pour chaque source. Les débits mesurés sont faibles ceci est la conséquence de la sécheresse qui a sévi la région pendant les trois dernières décades. Le calcul des coefficients de tarissement est de l'ordre de 10^{-6} à $10^{-7} j^{-1}$.

Du point de vue hydrochimique, les eaux des sources étudiées, présente deux types de facies ; l'un bicarbonatécalco-magnésien et l'autre chloruré calcique. Ces deux facies tire leurs origines soit par la dissolution des calcaires, soit par l'altération des formations géologiques.

Les méthodes statistiques ; entre autres la corrélation a permis de définir les affinités entre les éléments deux à deux et l'ACP a dégagé la vision globale des comportements quelle procure, permet la généralisation des acquis des études par campagne. Cette dernière a révélé que les bicarbonatés ont une origine liée soit à l'aquifère (temps de séjour lent) ou à l'altération des silicates.

Les valeurs obtenues de l'indice de saturation pour la calcite, l'aragonite, la dolomite et le gypse ainsi que la pression partielle de CO_2 , montrent que les eaux des puits, forages et sources de l'aquifère de Guelma sont quasi sous-saturées en calcite, aragonite et dolomite ce qui leur donnent un enrichissement en calcium et magnésium. En revanche les points d'eau situés en bordure sud, donc situés dans la zone de transit des eaux en provenance de la zone d'alimentation, présentent des indices positifs, et sont donc sursaturés en ces minéraux.

La destination de l'eau pour l'usage agricole et alimentation humaine ont été mise en évidence par l'application des différentes méthodes et ont permis de mettre en évidence que l'eau des sources étudiées est de bonne qualité quant à son utilisation.

***REFERENCES ET
BIBLIOGRAPHIE***

- ANRH (2020/2021).** Relevé pluviométrique et température à la station d'Ain Larbi.
- Chadha D.K. (1999).** A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeol. J.*, 7 : 431-439.
- Chouabbi A (1987).** Etude géologique de la région de Hammam N'bailes (se de Guelma, constantinois, Algérie).
- Dareste de la Chavanne (1910).** Etude spécial des terrains tertiaires.360p.
- Doneen L.D. (1962).** The influence of crop and soil on percolating water. Proc 1961 Biennial conference on Groundwater Recharge, p. 156-163.
- Ganesh T, Kale Y.S (1995).** Quality of lenetic waters of Dharwad district in north Karnataka. *Journal of Environmental Health*, 37(1), 1995, 52-56.
- Gibbs R.J (1970).** Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962) : 1088-1090.
- Ghorbel A (1991).** Guide pratique des calculs hydrologique.52 p.
- Majour H (1996).** Utilisation de l'analyse statistique pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du réservoir cristallin de l'Edough (Nord-Est Algérien). Mémoire de magister, 116 p.
- Meybeck M (1987).** Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*.
- Mudry J (1990).** Les courbes flux-débit et le fonctionnement des aquifères karstiques. *Journal hydrology*, 120(1990)283-294.
- Nouar T (5007).** Impact de la pollution sur les ressources en eau superficielles et souterraines de la région de Guelma.
- Parkhurst DL, Appelo CA (2013).** Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (No. 6-A43). U.S. Geological Survey.
- Piper A (1944).** A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. *Trans. Am. Geophys Union* 25: pp (914-928)
- Sahu P, Sikdar P K (2008).** A hadrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Environmental Geology*.
- Schoeller H (1965).** Geochemistry of groundwater. In *groundwater studies—an international guide for research and practice*. UNESCO, Chapter 15, Paris, pp 1-18

Thornthwaite, C.W (1948). An approach towards a rational classification of climate. Geographical review 38,55-596.

Turc L (1954). Le bilan d'eau des sols : relation entre précipitation, l'évapotranspiration et l'écoulement. Ann. Argon, 5, pp (491-496).

USSL. (1954). Classification of irrigation waters. US Department of Agriculture, Circulaire 969. Washington.

Vila J.M (1988). Carte géologique au 1/50.000 de Guelma et notice explicative rédigée par Vila J. M. Pub. Serv. Carte géol. Algérie, Alger.

WHO (World Health Organization) (2017). Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum 978-92-4-154995-0 (2017)

Wilcox L.V. (1948). The quality of water for irrigation use. US Dept. of Agriculture, Tech. Bull., 962, ashington, D.C., p. 1-40.

Zaidi F K, Nazzal Y, Jafri M K, Naeem M, Ahmed I (2015). Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from north western Saudi Arabia. Environmental Monitoring and Assessment