

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA
TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la terre et de l'univers

Filière : Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

Investigation hydrochimique des eaux des sources de la région de Ben Smih- Guelma

Présenté par :

- *AYAD Wail*

Membres de jury :

Président :	Mr. GHRIEB Lassâad	(M.C.A)	Université Guelma
Examinatrice :	BENACER Leila	(M.C.B)	Université Guelma
Promoteur :	Mr. TAHAR Nouar	(Pr)	Université Guelma

Octobre 2020

Dédicace

*A mes parents, je les remercie avec affection pour leurs sacrifices, leurs
Encouragement,*

A mes frères et sœurs pour le soutien moral qu'ils m'ont toujours apporté;

A toute ma famille

A tous ceux que j'aime et m'aiment

Je dédie Ce Modeste Travail

Wail

Avant propos

Je n'aurai pas voulu me priver, comme c'est agréable tradition d'exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont accompagnées jusqu'au terme de ce travail ceux qui m'ont permis de le réaliser trouvent ici, le témoignage de ma sincères considérations.

J'adresse tout d'abord mes vifs remerciements à monsieur Nouar Tahar qui a proposé ce sujet, a su dirigé pas à pas ce mémoire. Sa critique constructive, les conseils qu'il m'a prodigués, ont permis la concrétisation de Mémoire.

Je tiens particulièrement à exprimer ma profonde gratitude aux membres de jury :

Monsieur Gherieb Lassaad qui a bien voulu présidé qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Madame Benacer Leila qui a bien voulu examiner mon travail qu'elle trouve mes remerciements les plus sincères.

Je remercie enfin tous les enseignants des Sciences de la Terre qui m'ont inculqué le savoir durant tout le cycle du master.

Résumé

La région de ben Smih recèle des ressources hydriques relativement importantes. Ces dernières années, un essor démographique et économique, particulièrement agricole, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du mémoire de fin d'étude. Il a pour objectif de déterminer la physico-chimie et la qualité des eaux des sources à travers quelques échantillons.

La synthèse géologique et hydrogéologique a servi essentiellement à la description lithologique. L'analyse des données climatiques (température et précipitations) durant ces 20 dernières années de la région d'étude a permis de déterminer la quantité des précipitations qui permettent d'alimenter la nappe, la succession des saisons (saison humide et saison sèche) ainsi que la période d'alimentation des nappes. L'analyse chimique des échantillons d'eau prélevés au courant de mois de février a été réalisée au LGCH de l'université de Guelma. L'interprétation des données chimiques, essentiellement les éléments majeurs (les cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et les anions: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^-) et le calcul de certains paramètres ont permis de déterminer la destination de ces eaux pour l'AEP et pour l'irrigation. Les résultats obtenus ont permis de dégager deux types de facies bicarbonaté calcique et chloruré calcique. Le calcul des indices de saturations ont permis de mettre en évidence que les eaux des sources sont majoritairement sous saturés en gypse, anhydrite et dolomite et calcite.

Les analyses physico-chimiques ont montré que les eaux sont aptes à l'alimentation humaine et à l'usage agricole.

Mots Clés : *hydrogéochimie ; qualité de l'eau ; Ben Smih, Algérie*

Abstract

The region of Ben Smih has relatively large water resources. In recent years, there has been a demographic and economic boom, particularly in agriculture, which has led, on the one hand, to an increase in water requirements.

This work is part of the end of study dissertation. Its objective is to determine the physico-chemistry and the quality of springs water through a few samples.

The geological synthesis was used mainly for the lithological description. The analysis of climatic data (temperature and precipitation) during the last 20 years of the study region has made it possible to determine the amount of precipitation that feeds the water table, the succession of seasons (wet season and dry season) as well as than the feeding period of the groundwater. Chemical analysis of the water samples were taken during February 2020. The interpretation of the chemical data, essentially the major elements (cations: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and anions: HCO^- , SO_4^{2-} , Cl^- and NO_3^-) and the calculation of parameters made it possible to determine the destination of these waters for drinking water supply and for irrigation.

The results obtained made it possible to identify two types of calcium bicarbonate and calcium chloride facies. The calculation of the saturation indices made it possible to demonstrate that the spring waters are mainly undersaturated with gypsum, anhydrite and dolomite and calcite.

Physico-chemical analyzes have shown that the water is suitable for human consumption and agricultural use.

Key words : *Hydrogeochemistry, Water quality, Ben Smih, Algeria*

الملخص

تتميز منطقة بن سميح بموارد مائية كبيرة نسبيا وقد شهدت هذه المنطقة في السنوات الأخيرة، نموا ديموغرافيا واقتصاديا كبيرين، خاصة في مجال الزراعة. مما نتج عنه ارتفاع الاحتياجات المائية. يهدف هذا العمل إلى الكشف عن الخصائص الفيزيو-كيميائية و جودة مياه الينابيع من خلال عينات قليلة، تم الوصف الصخري عن طريق استخدام التوليف الجيولوجي ، كما أتاح تحليل البيانات المناخية (درجة الحرارة و هطول الأمطار) خلال 20 سنة الماضية في منطقة الدراسة تحديد كميات الأمطار التي تغذي مستوى المياه الجوفية تتابع الفصول (الموسم الرطب و الموسم الجفاف) بالإضافة إلى التحليل الكيميائي لعينات للمياه المأخوذة في فترة شهر فيفري 2020 ، بشكل أساسي العناصر الرئيسية (الكاتيونات Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} : و الأيونات HCO^{-} , Cl^{-} , SO_2 NO)، و حساب المعلمات محددة جعل من الممكن حساب تحديد جودة المياه و استعمالها للشرب و الري. من خلال النتائج المتحصل عليها تمكنا من تحديد نوعين من سحنات: ببيكربونات الكالسيوم وكوريد الكالسيوم، كما تمكنا أيضا من خلال حساب مؤشرا التشبع من إثبات أن مياه الينابيع مشبعة بشكل أساسي بالجبس و الانهيدريت و الدولوميت و الكالسييت. مما سبق نستنتج أن المياه صالحة للاستهلاك البشري والاستخدام في المجال الزراعي والري.

الكلمات المفتاحية : هيدروجيوكيمياء , جودة المياه ، بن سميح ، الجزائر.

Liste Des Figures

<i>N°</i>	<i>Intitulé de la Figure</i>	<i>Page</i>
<i>Figure.1</i>	Situation géographique du bassin de Ben Smih.	01
<i>Figure.2</i>	Diagramme pluviothermique.	04
<i>Figure.3</i>	Représentation graphique du bilan de Thornthwaite.	07
<i>Figure.4</i>	Situation géographique des points de prélèvement.	17
<i>Figure.5</i>	Diagramme de Piper.	18
<i>Figure.6</i>	Diagramme de Chadah.	19
<i>Figure.7</i>	Diagramme de Gibbs.	19
<i>Figure.8</i>	Diagramme de Wilcox.	26
<i>Figure.9</i>	Diagramme de Richards.	27

Liste Des Tableaux

<i>N°</i>	<i>Intitulé du tableau</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau. 1</i>	Caractéristiques géographiques et topographiques de la station de Guelma.	03
<i>Tableau. 2</i>	Précipitations moyennes mensuelles de la station de Guelma (1972/2019).	03
<i>Tableau. 3</i>	Température moyenne mensuelle de la station de Guelma (1969/2018).	04
<i>Tableau. 4</i>	Bilan d'eau de Thornthwaite	06
<i>Tableau. 5</i>	Terme du bilan hydrologique.	08
<i>Tableau. 6</i>	Calcul d'indice d'aridité de la station.	08
<i>Tableau. 7</i>	Analyse physico-chimique en (mg/l), CE en $\mu\text{S/cm}$.	18
<i>Tableau. 8</i>	Indices de saturation de quelques minéraux et pCO_2 .	20
<i>Tableau. 9</i>	Matrice de corrélation de Pearson.	21
<i>Tableau. 10</i>	Analyse en composante principale.	22
<i>Tableau. 11</i>	Valeurs la dureté (TH) des sources.	23
<i>Tableau. 12</i>	Classification d'après Sawyer et McCarty, 1964.	24
<i>Tableau. 13</i>	Classification de l'eau basée sur le pourcentage en Sodium.	25
<i>Tableau. 14</i>	Comparaison des valeurs de la conductivité électriques avec la classification de Wilcox (1953).	26
<i>Tableau. 15</i>	Les résultats de $\text{Na}\%$, SAR, RSC, KR et Mg^{2+} des échantillons.	29

Tables des matières

Résumé

Liste Des Figures Liste Des Tableaux Table Des Matières

Introduction Générale

Chapitre I : Cadre générale

1.1. Présentation de la zone d'étude	1
1.2. Géologie	1
1.2.1. Stratigraphie.....	1
1.3. Cadre Hydro climatique	2
1.3.a. Facteur climatique	3
1.3.b. Les précipitations	3
1.3.c. La température.....	3
1.3.d. Diagramme pluvio-thermique	4
1.3.e. Bilan hydrogéologique	4
1.3.f. Bilan de Thorthwaite.....	5
1.3.g. Estimation de ruissellement	7
1.3.h. Estimation de l'infiltration	7
1.3. i. Indice d'aridité	8
1.4. Conclusion.....	8

Chapitre II : Matériels et méthodes

2.1. Echantillonnage	9
2.2. Analyses physico-chimiques... ..	9
2.2.2. Les paramètres physiques	9
2.2.3. Analyses au laboratoire	10
2.2.3.1. Dosage du calcium.....	10
2.2.3.2. Dosage de sodium et potassium.....	11
2.2.3.3. Les chlorures.....	12
2.2.3.4. Détermination des sulfates.....	12
2.2.3.5. Dosage de nitrates.....	15
2.2.3.6. Dosage des nitrates (méthode spectrométrique).....	16
2.4. Conclusion.....	16

Chapitre 3. Résultats et discussion

3.1. Introduction.....	17
3.2. résultats et discussion.....	18
3.2.1. faciès chimique.....	18
3.2.1.a. diagramme de Piper	18
3.2.1.b. diagramme de Chadah	19
3.2.2. mécanisme contrôlant le chimisme des eaux souterraines	19
3.2.2.a. diagramme de Gibbs	19
3.2.2.b. indice de saturation.....	20
3.2.2.c . pression partielle du CO ₂	20
3.3. Corrélation entre paramètres	21
3.3.1. matrice de corrélation	21
3.3.2. analyse composantes principales (ACP).....	21
3.3.2.a. étude de la contribution des observations aux trois premiers facteurs.....	22
3.4. aptitude de l'eau à la consommation humaine et domestique	23
3.4.1. paramètres physico-chimique.....	23
3.4.1.a. PH , CE , et TDS	23
3.4.1.b. la dureté ou titre hydrotimétrique	23
3.4.1.c. variation des cations et anions.....	24
3.5. aptitude des eaux pour l'irrigation.....	25
3.5.1. pourcentage en sodium	25
3.5.2. conductivité électrique	26
3.5.3. sodium adsorption ratio (SAR).....	26
3.5.4. carbonate de sodium résiduel (RSC)	28
3.5.5. indice de Kelly.....	28
3.5.6. magnésium ratio	28
3.5.7. indice de perméabilité	29
3.6. conclusion générale.....	30
LA bibliographie	

Introduction générale

La région de Ben Smih, située au Nord-Est de l'Algérie renferme dans son sous-sol un potentiel hydrique d'une grande importance. Cette région est depuis des décennies une zone agricole (céréales, tomates, pomme de terre, agrumes,...) qui nécessite d'énormes quantités d'eau vu l'augmentation des surfaces cultivées. Cette intensification des activités agricoles associée à l'augmentation de la population qui est passée de 200 000 habitants en 2000 à **20.000** (O.N.S 2017), ainsi que l'installation de quelques unités pastorales et industrielles ont considérablement influencé les eaux de sources en entraînant un déséquilibre entre le débit d'exploitation et le débit d'alimentation de ces dernières. La faible pluviométrie ainsi que les conditions d'alimentation des aquifères de la région ne permettent pas une recharge plus rapide afin de rétablir l'équilibre. Ceci a pour conséquence l'affaissement des nappes par endroit et la diminution du débit des sources. En plus de ce problème d'ordre quantitatif se pose le problème de la qualité de ces eaux, à savoir leur aptitude à la potabilité et à l'irrigation des certaines cultures pratiquées dans la région.

Dans le souci d'évaluer la qualité des sources au point de vue physico-chimique, d'établir les meilleures conditions de leur exploitation afin de répondre aux besoins en eau aussi bien pour l'AEP que pour l'irrigation dans les prochaines décennies,

Ce travail s'inscrit dans le cadre de ce projet et a pour but l'utilisation des données sur le terrain lors du stage et des analyses effectuées au laboratoire afin d'établir la physico-chimie des eaux de ces sources tant pour la consommation humaine que pour l'irrigation.

Pour atteindre ces objectifs, on présente cette étude qui est structurée en trois chapitres :

Le premier chapitre : délimite la zone d'étude du point de vue géographique et identifier les différents caractéristiques de la stratigraphie et la climatologie de la zone.

Le deuxième chapitre : nous ont respecter 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.

Le troisième chapitre : Nous présentons des résultats obtenus dans ce travail qui a permis de faire le point sur les principales connaissances hydrologiques et hydrochimiques des eaux des sources de la région de Ben Smih.

Chapitre1. Cadre général

1.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située à 16 kilomètres au Sud-Est de la ville de Guelma (Figure.1). Elle est limitée:

- Au nord par les communes de Belkheir et Boumahra
- Au sud par la commune de Bouhachana
- A l'est par la Commune de Hammam N'Bails,
- A l'ouest par la commune d'Ain Larbi.

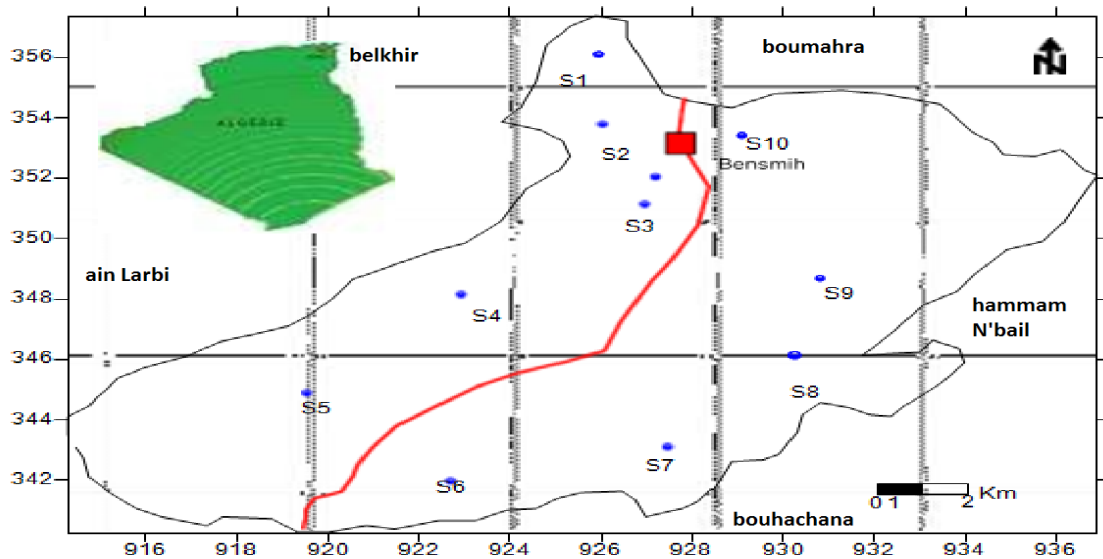


Figure. 1:Situation géographique du bassin de Ben Smih.

1.2. Géologie

La stratigraphie a été décrite à partir de la carte de La Mahouna :

1.2.1. Stratigraphie :

La série stratigraphie de la zone étudiée se compose comme suit :

Miocène

La base constituée par des couches gorses le sommet est caractérisé par des marnes argileuses grises parfois s'intercalent des petites couches très minées de grés quartzeux.

-Maestrichtien supérieur et base du paléocène calcaire marnes argileuses. Les plus importantes formations sont les calcaires gris à patine jaune de 60-100m d'épaisseur.

Le sommet est couronné par des interactions de calcaire marneux et de grès stratifiés à patine blanche.

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 beufs de calcite.

Eocène

Il est constitué de calcaires lités à globigérines, à faciès "suessosien". 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. La série est constituée de calcaire et yeux à strates épaisseur formant les fiances des anticlinaux. A l'intérieur des anticlinaux, une bande de passage progressif de marnes grisâtres et de marnes Argileuse. La série ne dépasse pas les 60m.

Les formations numidiennes

Il forme principalement les reliefs de la région étudiée et réapparaît en lambeaux aux environs de Bensmih. 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.

Le quaternaire

Caractérisé par des éboulis de pente, des alluvions récentes et avec l'existence de la croute calcaire.

1.3. Cadre Hydroclimatique

L'étude des caractéristiques hydroclimatologiques, joue un rôle primordial dans la connaissance des comportements des cours d'eaux, les variations des réserves, la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles. Pour cela, l'élaboration du bilan hydrique est indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement et les influences d'un système hydraulique.

Station de Mesure

La période d'observation s'est faite à travers la station de Guelma, allant de 1996/1997 à 2018/2019 (Tableau.1).

Tableau. 1: Caractéristiques géographiques et topographiques de la station de Guelma.

Altitude	Longitude	Latitude	Période d'observation
590	7°35'E	36°15'N	1972/2019

1.3.a .Facteurs Climatiques

Les précipitations sont le facteur le plus important dans l'établissement du bilan hydrique, parce qu'elles reflètent la circulation des eaux de surface et souterraines. Toute étude climatologique doit donc prendre en compte une analyse détaillée des précipitations afin de bien caractériser les régimes des cours d'eaux et des nappes.

1.3. b. Les Précipitations

La pluviométrie dans cette région se caractérise par une forte intensité des précipitations au printemps avec un maximum de 74 mm au mois de mars et d'une diminution des amplitudes pluviométriques en été avec un minimum de 5 mm au mois de Juillet (Tableau. 2).

Tableau. 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de Guelma (1972/2019).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	31	40	68	74	69	66	62	55	50	13	5	11

1.3. c. La Température

Le second facteur le plus important dans l'étude climatique est la température qui agit sur le phénomène d'évapotranspiration influençant ainsi le ruissellement et l'infiltration dans un bassin versant. On dispose des données des températures moyennes mensuelles de la station de Guelma durant la période (1972/2019). Les données sont condensées dans le tableau .3. D'après le tableau.3, nous constatons que les plus faibles valeurs sont rencontrées aux mois de Janvier et février de 8.40 et 10.24°C respectivement tandis que les plus fortes caractérisent les mois de Juillet et Août avec 26.65 et 27.456 °C respectivement. L'écart thermique entre le mois le plus chaud et le mois le plus sec est de 19.16°C.

Tableau .3: Température moyenne mensuelle de la station de Guelma (1969/2018).

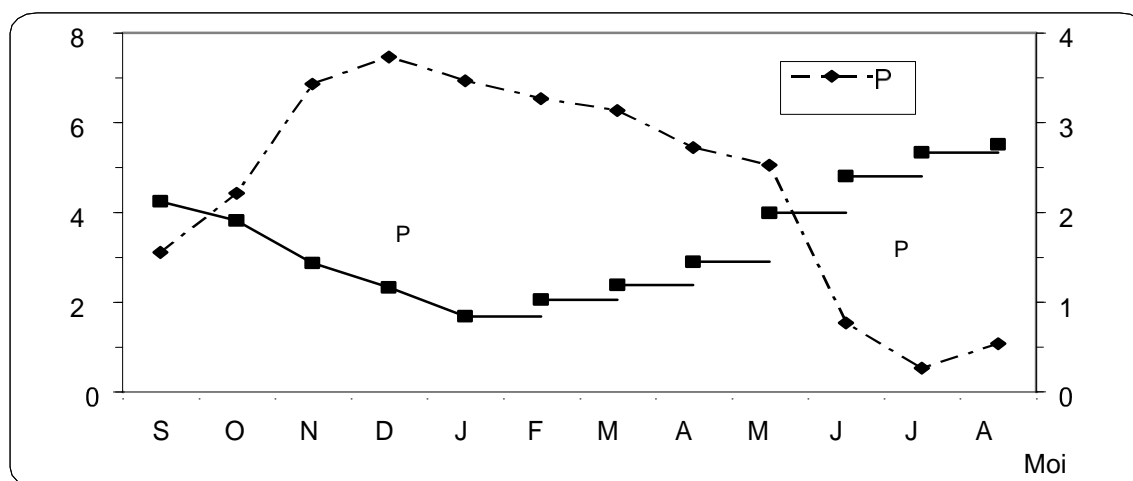
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne
T (°C)	21.20	19.06	14.36	11.61	8.40	10.24	11.88	14.50	19.91	24	26.65	27.56	17.50

1.3. d. Diagramme pluvio-thermique

Les paramètres température- précipitation sont des facteurs très intéressants, dans la mesure où leur combinaison permet de déterminer les mois véritablement secs. Ceci est basé sur le comportement de la végétation aux mois ayant un total de précipitation égal ou inférieur au double de la température mensuelle, Les paramètres température- précipitation sont des facteurs très intéressants, dans la mesure où leur combinaison permet de déterminer les mois véritablement secs. Ceci est basé sur le comportement de la végétation aux mois ayant un total de précipitation égal ou inférieur au double de la température mensuelle :

$$P \leq 2T$$

La courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations pendant les mois secs. A la station du bassin, la saison sèche débute au mois de mai et se termine en début d'octobre. Quant à la saison humide, elle commence à partir d'octobre et se termine en mai (Figure. 2).

**Figure .2:** Diagramme pluviothermique.

1.3.e . Bilan hydrologique

L'étude du bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des quantités d'eau reçues par un bassin versant entre ses différents composants (écoulement, infiltration et évaporation). Il est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Où tous les termes sont en mm.

1.3.f. Bilan de Thornthwaite

Les données ont permis de dresser le bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite (1948), cette méthode est utilisée pour les climats subhumide et semi-aride. Vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule est appliquée. Elle fait ressortir les quatre paramètres qui sont l'évapotranspiration réelle et potentielle, l'excédent et le déficit agricole (Tableau 3). L'évapotranspiration potentielle est calculée par la formule suivante :

$$ETP = 1.6 (10t/T)^a \cdot F(\lambda)$$

$$I = (t/5)^{1.5}, I = \sum_1^{12} i \text{ et } a = 1.6/100 \cdot I + 0.5$$

Où :

t: température moyenne annuelle i : indice thermique mensuel

I: indice thermique annuel

F(λ): Facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jour, de mois et la température.

Pour le calcul de l'ETR, deux cas sont considérés :

- Si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP, l'ETR est égale à l'ETP ;
- Si les précipitations du mois sont inférieures à l'ETP, l'ETR sera égale à l'ETP aussi longtemps que les réserves en eau du sol demeurent.

Tous ces paramètres sont directement liés à la RFU, en d'autres termes dépendent de sa valeur qui est très difficile à estimer. Dans notre cas la RFU est prise égale à 100 mm (SOGREAH, 1999).

Tableau .4 : Bilan d'eau de Thornthwaite.

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETR	Def	Exc
S	21.2	8.9	1.03	91,1	31	-60.1	-0.7	0.0	0.0	31.0	60.1	0.0
O	19.06	7.6	0.97	70.6	40	-30.6	-0.4	0.0	0.0	40.0	30.6	0.0
N	14.36	4.9	0.86	37.2	68	30.8	0.8	30.8	30.8	37.2	0.0	0.0
D	11.61	3.6	0.81	23.7	74	50.3	2.1	50.3	81.1	23.7	0.0	0.0
J	8.4	2.2	0.87	14.0	69	55.0	3.9	18.9	100.0	14.0	0.0	36.1
F	10.24	3.0	0.85	19.7	66	46.3	2.3	0.0	100.0	19.7	0.0	46.3
M	11.88	3.7	1.03	31.4	62	30.6	1.0	0.0	100.0	31.4	0.0	30.6
A	14.5	5.0	1.10	48.4	55	6.6	0.1	0.0	100.0	48.4	0.0	6.6
M	19.91	8.1	1.21	95.4	50	-45.4	-0.5	-45.4	54.6	95.4	0.0	0.0
J	24	10.7	1.22	135.6	13	-122.6	-0.9	-54.6	0.0	67.6	67.9	0.0
J	26.65	12.6	1.24	167.0	5	-162.0	-1.0	0.0	0.0	5.0	162.0	0.0
A	27.56	13.3	1.16	166.2	11	-155.2	-0.9	0.0	0.0	11.0	155.2	0.0
Annuel	17.4	83.6		900.4	544.0	-356.4				424.6	475.9	119.4

-TP: Température mensuelle en °C -P : Précipitation mensuelle (mm)

-i: Indice thermique –RFU : Reserve Facilement Utilisable (mm)

-CL : Coefficient de latitude –ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

-ETPC : Evapotranspiration potentielle corrigée (mm) – Def : Déficit agricole (mm) -Exc : Excédent (mm).

L'analyse du bilan hydrique (Tableau. 4) permet d'observer l'ETR qui représente 77% des précipitations, le déficit agricole commence à partir du mois de juin jusqu'au mois de octobre avec un maximum au mois de Juillet (162 mm). 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 7 mois, de novembre jusqu'à fin mais avec un maximum au mois de février et mars (100 mm).

Il en ressort de la figure 3 que l'évapotranspiration maximum se produit aux de mois de juillet (167 mm) et août (166.20mm), ce qui entraine un déficit agricole (475,9 mm) et nécessite une irrigation pour les zones des cultures. Par contre, pendant les mois d'e novembre à mai, on observe une recharge de la nappe.

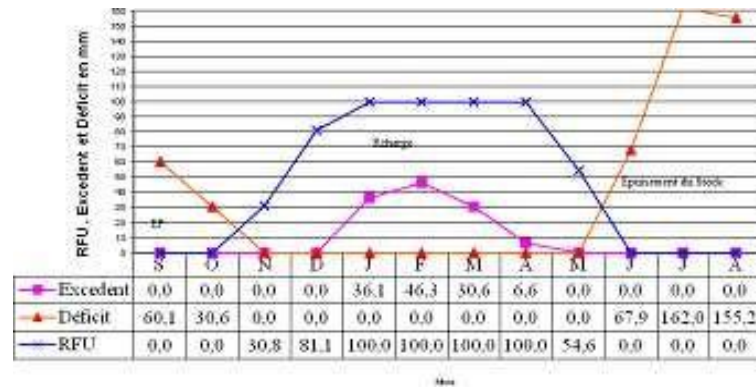


Figure .3: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite.

1.3.g. Estimation de Ruissellement

Pour l'estimation de l'écoulement, l'application de la formule de Tixeront-Berkalof est 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. Il faudrait donc faire des corrections en fonction de la nature du sol du bassin et de sa superficie (capacité de rétention, perméabilité, étanchéité...).

La formule est la suivante :

$$R = P^3 / 3(ETP)^2$$

Cette relation est appliquée pour des précipitations $P < 600$ mm/an :

R : Ruissellement (mm), P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/an).

Le ruissèlement calculé à l'aide de la formule Tixeront-Berkalof est estimé à 99.37 mm/an.

1.3.h. Estimation de l'infiltration

La disponibilité des différents facteurs régissant l'équation du bilan hydrologique nous permet de déterminer l'infiltration efficace (I) qui s'écrit comme suit :

$$I = P - ETR - R$$

Le bilan hydrologique est donné par la formule suivante :

$$P = I + ETR + R$$

D'où l'infiltration sera égale

$$I = P - ETR - R$$

Le tableau 5 récapitule les paramètres du bilan avec une lame d'eau infiltrée est de 99.30mm/an.

Tableau. 5 : Terme du bilan hydrologique.

paramètres	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Station de Guelma	544	424.60	99.33	20.03

1.3. i. Indice d'aridité

Définit par MARTONNE(1923) selon la formule et la classification suivantes :

$$I = P / (T + 10) = 544 / 17.44 + 10 = 19.82$$

La formule climatique de De MARTONNE et appelée indice d'aridité ; il est fonction de la température et de la précipitation :

P : précipitation mm

T : température moyenne annuel °C

Si $A < 5$ LE climat est hyperaride

Si $5 < A < 7.5$ le climat est désertique

Si $7.5 < A < 10$ le climat est steppique

Si $10 < A < 20$ le climat est semi-aride

Si $20 < A < 30$ le climat est tempéré

Si $A > 30$ le climat est abondant (climat humide)

L'indice d'aridité calculé à la station de Guelma est estimé à 19.88 ce qui traduit que la zone d'étude est situé sous un climat semi-aride (Tableau. 6).

Tableau.6 : Calcul d'indice d'aridité de la station.

La station	P (mm)	T° c	Indice d'aridité	observation
Guelma	544	17.44	19.82	Climat semi-aride

1.4. Conclusion

La région d'étude est soumise à un climat méditerranéen continental avec des hivers froids et des étés chauds. La température moyenne est de l'ordre de 17.44°C et une hauteur de précipitation de 544mm en moyenne. L'indice de DE Martonne calculé, Classe la région dans l'étage de semi-aridité.

Chapitre 2- Matériels et méthodes

2.1. 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 caractéristique physico-chimique de l'eau, il convient d'avoir des connaissances précises sur les conditions de prélèvement et de son importance pour la fiabilité des résultats.

2.2. Analyses physico-chimiques

2.2.2. Les paramètres physiques

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

Potentiel en hydrogène (pH)

Le pH (potentiel en hydrogène) 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.

La température ($T^{\circ}C$)

La température de l'eau est le paramètre de confort pour les usagers. 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 sombre absorbe plus fortement la chaleur) ;
- le volume de l'eau (plus le volume est élevé moins importantes sont la fluctuation de température) ;

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.

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 1 cm. 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.

2.2.3. 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^{3-}) ainsi que le titre alcalimétrique complet TAC et le titre hydrotimétrique TH.

2.2.3.1. 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 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.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 Fc est égal :

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

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

2.2.3.2. Dosage de sodium et potassium (Na^+ et K^+)**a) Principe**

La photométrie de flamme permet le dosage des cations alcalins Li^+ ; Na^+ et K^+ . Le photométrie de flamme est constitué de trois éléments : le bruleur, le monochromateur et d'une cellule photoélectrique ; d'un afficheur.

b) Mode opératoire

- préparation des solutions étalons
- Solution mère

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

NaCl pur pour les analyses : 0.127g

KCl pure les analyses : 0.286g

Eau distillée.

c) Résultats

La lecture se fait directement sur l'écran.

2.2.3.3. *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 3 minutes ;
- soit V le nombre de millilitres de nitrate d'argent N/50 utilisées

d) Expression des résultats

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

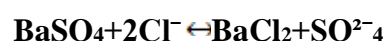
2.2.3.4. *Détermination des sulfates (SO₄²⁻)*

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 Na_2SO_4

Peser 2.4 g NaSO_4

1000ml d'eau distillée

-solution stabilisante

Acide chlorhydrique 600 ml

Ethanol 200 ml

Chlorure de sodium 150 ml

Eau distillée 1000 ml

-solution de chlorure baryum

Chlorure de baryum 150ml

Acide chlorhydrique 5ml

Eau distillée 1000ml

c) Gamme d'étalonnage

-Prendre 8 béchers de 25 ml.

-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 20 ml d'eau à analyser puis compléter à 100 ml d'eau distillée ;

-ajouter 5 ml de la solution stabilisante.

-ajouter 2ml de chlorure de baryum.

-agiter énergiquement pendant 1minute.

-passer au spectrophotomètre à $\lambda=420\text{nm}$.

e) Expression des résultats

Mg/l SO_4^{2-} = La valeur lue sur le spectro \times 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 alcalimétrique 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.
- Béchers 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 :

$$(\text{HCO}_3) \text{ mg/l} = V_2 \times 61 \text{ volume échantillon} \times N / 1000$$

V_2 = 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.

2.2.3.5. Dosage de nitrates

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.....60g

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 anhydre0.722g

-Eau distillée1000ml

-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 1 ml 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

spectraux au 415nm. Le résultat est directement lu sur l'appareil en mg/l .

2.2.3.6. Dosage des nitrates (méthode spectrométrique) :

Les nitrates NO_3^- 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 ($\text{pH} = 1.90$) avec la sulfamide en formant sel de diazonium (diazotation) qui forme avec le N-(1-naphtyl)-éthylénediamine-dichlorohydraté un colorant azoïque rouge. $\lambda_{\text{Max}} = 543\text{nm}$

b) Réactifs

- Solution de nettoyage
- Solution d'acide chlorhydrique (à $d = 1.12\text{g} = 25\%$)
- Solution du réactif

20g de sulfamide ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$) à dissoudre dans un mélange de 50ml d'acide phosphorique $d = 1.71\text{g/ml} = 85\%$ de masse et d'eau distillée. Dans cette solution, dissoudre 1g de N-(1-naphtyl)-éthylénediamine-dichlorohydraté ($\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{Cl}_2\text{N}_2$).

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 le remettre au réfrigérateur.

-Solution d'acide phosphorique

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

-Solution standard de 100 mg/l

Dissoudre 0.50g $\approx 2\text{mg}$ de nitrite de sodium (NaNO_2), sécher pendant 2 heures à 105°C dans 750ml d'eau distillée compléter à 1 litre.

2.4. 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 3. Résultats et discussion

3.1 .Introduction

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour. Il est principalement régi par les équilibres calco- carboniques (Ca^{2+} , HCO_3^-) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^-) et des éléments d'origine biologique (NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+). L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux identifier les faciès chimiques des eaux de la nappe, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Cette étude permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico- chimiques et d'estimer leur origine minérale. Par définition, l'eau est un liquide naturel qui se forme par condensation en altitude, puis elle acquiert son chimisme au cours de son trajet, par dissolution des gaz et absorption des composés solubles et insolubles présents dans l'air. Au sol, elle traverse les formations géologiques perméables, ce qui augmente sa minéralisation par lessivages des roches. La figure 4 illustre la position des points d'eau échantillonnés.

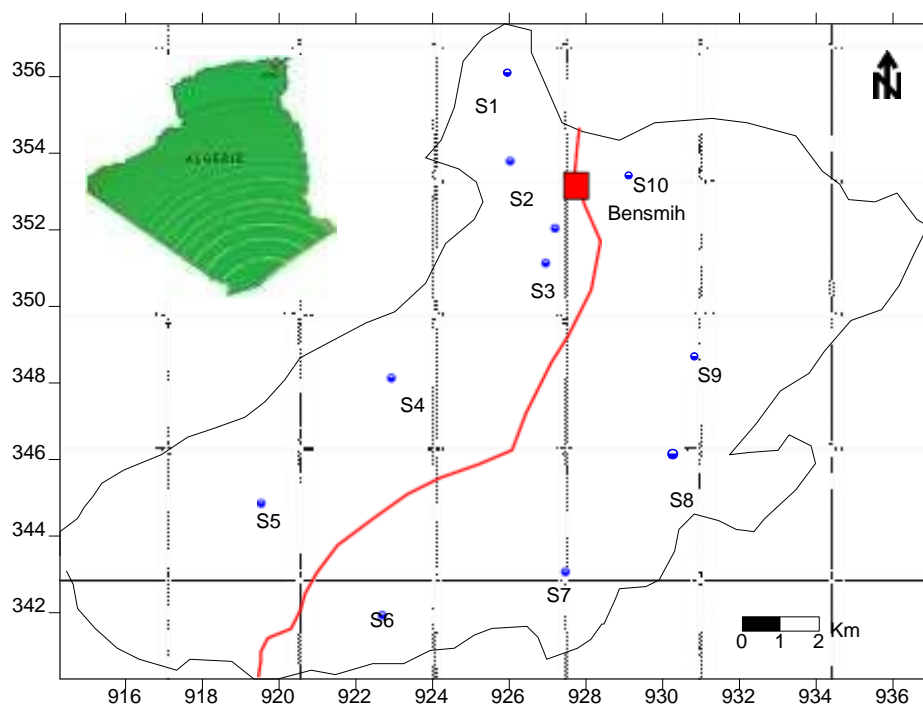


Figure. 4: Situation géographique des points de prélèvement.

3..2.Résultats et Discussions

Les paramètres de la statistique descriptive de la campagne d'analyse physico-chimique réalisée aux mois de Février 2019 sont résumés dans le tableau 7. Les balances des charges ioniques sont inférieures ou égales 5 %.

Tableau .7 : Analyse physico-chimique en (mg/l), CE en $\mu\text{S/cm}$.

Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
TDS	497	812	635.20	110.628
pH	7.20	7.62	7.48	0.13169
EC	693	1316	974.90	214.68
Ca	72	142	100.90	18.60
Mg	10	26	17	6.12
Na	36	100	70.40	19.91
K	1	3	1.87	0.71
HCO ₃	102	298	185.50	65.65
Cl	52	287	165.10	81.54
SO ₄	36	102	68.20	21.83
PO ₄	0.10	0.56	0.19	0.15
NO ₃	10	52	26.20	12.57

3.2.1 .Facies chimique

3.2.1.a. Diagramme de Piper

Pour mieux apprécier les principaux grands traits hydrochimiques et les rapports mutuels, les résultats analytiques ont été représentés sur le diagramme de Piper (1944) en relation avec les anions et cations. Il en ressort de ce diagramme (Figure .5) trois types de facies:

- Facies Bicarbonaté calcique dû à la présence des calcaires dans cet endroit.
- Facies chloruré calcique en provenance des sources du quaternaire

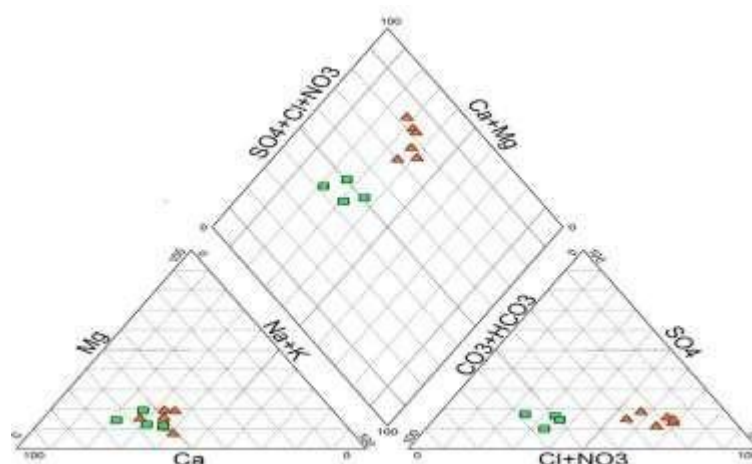


Figure.5: Diagramme de Piper.

3.2.1.b Diagramme de Chadah

Les anions et cations exprimés en milliéquivalent ont été représentés graphiquement sur le diagramme proposé par Chadah (1999). Le diagramme fait ressortir 2 familles de faciès Bicarbonate calco-magnésien et chloruré sulfaté calco-magnésien (Figure.6).

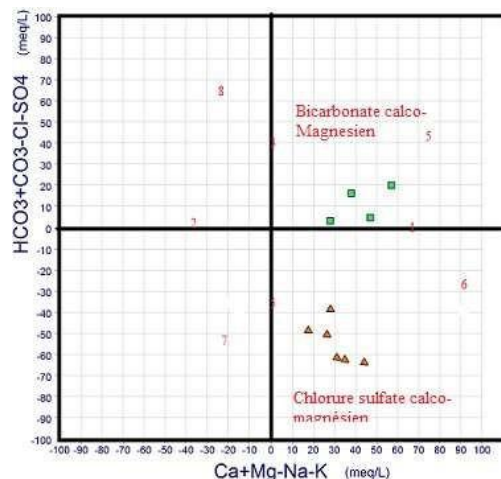


Figure. 6 : Diagramme de Chadah.

3.2.2. Mécanismes contrôlant le chimisme des eaux souterraines

3.2.2. a. Diagramme de Gibbs

Pour obtenir un aperçu des processus hydrogéochimiques, Gibbs (1970) a proposé une méthode de diagramme de dispersion illustrant trois mécanismes naturels importants contrôlant le chimisme des ions majeurs dans les eaux souterraines, y compris l'interaction eau-roche, l'évaporation et la précipitation atmosphérique. Pour ce faire, Les concentrations de TDS ont été reportées en fonction des rapports de $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ pour les cations et $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ pour les anions (Figure .7). Il a été constaté que la majorité des échantillons prélevés dans la nappe sont dominés par la dissolution des roches ce qui traduit le rôle de ce phénomène sur le chimisme des eaux des sources.

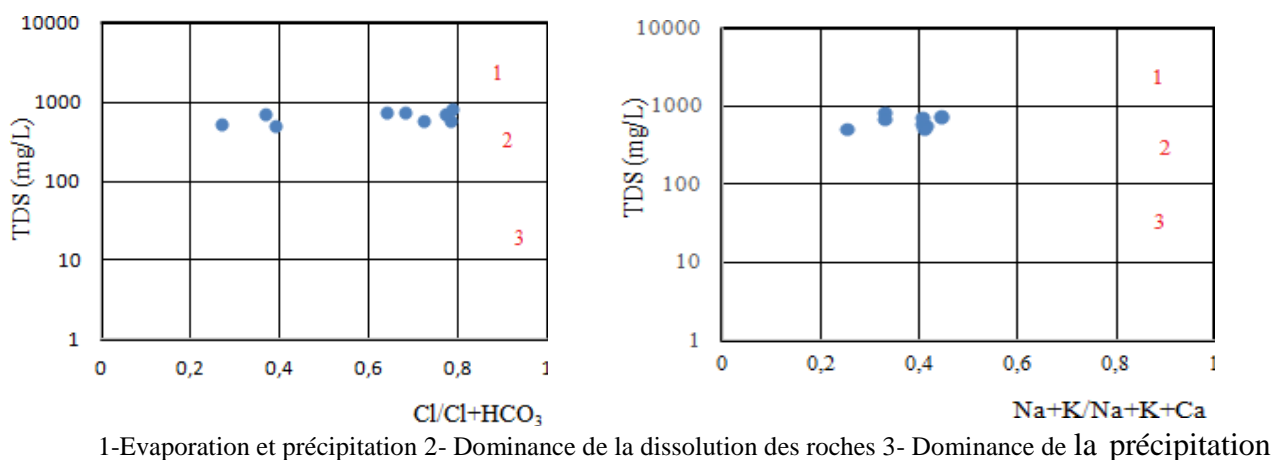


Figure.7 : Diagramme de Gibbs.

3.2.2.b. Indice de saturation

L'indice de saturation est important pour déterminer le degré d'équilibre entre l'eau et les minéraux et pour reconnaître la dissolution et précipitation des minéraux dans les aquifères. L'indice de saturation est défini par l'équation suivante :

$$IS = \text{Log PAI} / K_{sp}$$

Où PAI est le produit d'activité ionique et K_{sp} est la constante du produit de solubilité.

Le minéral est saturé ou sursaturé par rapport à la solution lorsque l'indice de saturation est positif et a tendance à ne pas se précipiter dans les eaux souterraines. La valeur négative d'IS suggère que l'eau est sous-saturée par rapport au minéral indiquant la dissolution de ce dernier. Le minéral est en équilibre avec les eaux souterraines, si la valeur IS est nulle donc n'a pas tendance à précipiter ou à se dissoudre. L'évaluation de l'IS pourrait être utile pour comprendre les processus géochimiques survenant dans la région et serait en mesure de déterminer l'origine des ions dissous dans les eaux souterraines (Kumar et al., 2009). On observe que 20% des échantillons sont respectivement sous saturés en calcite et 80% sont sursaturés en ce minéral. Les valeurs des indices de saturation pour la dolomite, gypse et anhydrite sont négatives donc tous les échantillons sont sous-saturés en ces éléments, ce qui traduit l'enrichissement des eaux en sulfates et calcium (Tableau. 8). Des facteurs tels que l'altération incongrue des minéraux carbonatés et des minéraux silicatés, l'effet des ions communs et l'évaporation, la température et l'exsolution du dioxyde de carbone et le retour des eaux d'irrigation peuvent avoir contribué à la saturation ou à la sursaturation (Aghazadeh et Mogaddam, 2010; Abu Jabal et al., 2015).

3.2.2. c. Pression partielle du CO_2

Les valeurs la pCO_2 calculées varient entre 0.323 à $1.198 \cdot 10^{-2}$ atmosphères. Ces valeurs sont supérieures à la pression atmosphérique ($10^{-3.50}$ atmosphère), ce qui suggère que les eaux de la nappe sont en contact avec le CO_2 du sol (Tableau.8).

Tableau. 8 : Indices de saturation de quelques minéraux et pCO_2 .

Nom	Calcite	Dolomite	Gypse	Anhydrite	$pCO_2 \cdot 10^{-2}$ atm
S1	-0.24	-1.65	-1.68	-1.91	0.784
S2	0.23	-0.81	-1.31	-1.53	0.587
S3	-0.04	-0.92	-1.64	-1.86	0.323
S4	0.24	-0.45	-1.38	-1.60	0.336
S5	0.37	-0.27	-1.26	-1.49	0.342
S6	0.52	0.11	-1.45	-1.68	0.798
S7	0.31	-0.50	-1.57	-1.81	0.868
S8	0.22	-0.70	-1.76	-1.99	0.83
S9	0.30	-0.26	-1.46	-1.69	0.588
S10	0.17	-0.79	-1.80	-2.04	1.198

3.3 Corrélation entre paramètres et analyse en composantes principales (ACP)

3.3.1. Matrice de corrélation

Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 11. L'observation du tableau montre des corrélations hautement significatives, avec un coefficient supérieur à 0.7. Pour les couples TDS- CE ($r= 0.938$) ; TDS- Ca^{2+} ($r= 0.872$) ; TDS- Na^+ ($r= 0.703$) ; TDS- Cl^- ($r= 0.760$) ; TDS- SO_4^{2-} ($r= 0.908$) et TDS- NO_3^- ($r=0.706$). Le calcium est hautement corrélé à CE, Na^+ , Chlorures et sulfates. Cependant, il existe des corrélations inverses hautement significatives entre les chlorures et les bicarbonates (Tableau.9).

Tableau .9 : Matrice de corrélation de Pearson.

	TDS	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	PO ₄	NO ₃
TDS	1	0.522	0.938	0.872	0.604	0.703	0.474	-0.218	0.760	0.903	0.397	0.706
pH	0.522	1	0.420	0.314	0.577	0.096	0.638	0.051	0.298	0.627	0.352	0.367
EC	0.938	0.420	1	0.836	0.598	0.815	0.527	0.538	0.937	0.827	0.469	0.685
Ca	0.872	0.314	0.836	1	0.466	0.482	0.312	-0.280	0.705	0.732	0.558	0.796
Mg	0.604	0.577	0.598	0.466	1	0.253	0.523	-0.130	0.534	0.429	0.265	0.173
Na	0.703	0.096	0.815	0.482	0.253	1	0.244	-0.556	0.797	0.641	0.227	0.368
K	0.474	0.638	0.527	0.312	0.523	0.244	1	-0.345	0.560	0.437	-0.041	0.424
HCO ₃	-0.218	0.051	-0.538	-0.280	-0.130	-0.556	-0.345	1	-0.789	-0.183	-0.418	-0.321
Cl	0.760	0.298	0.937	0.705	0.534	0.797	0.560	-0.789	1	0.644	0.486	0.599
SO ₄	0.903	0.627	0.827	0.732	0.429	0.641	0.437	-0.183	0.644	1	0.377	0.652
PO ₄	0.397	0.352	0.469	0.558	0.265	0.227	-0.041	-0.418	0.486	0.377	1	0.543
NO ₃	0.706	0.367	0.685	0.796	0.173	0.368	0.424	-0.321	0.599	0.652	0.543	1

3.3.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Elle permet de comparer les résultats des différentes eaux de sources, de synthétiser, de représenter graphiquement les données en se basant sur les corrélations entre les différents paramètres et de réduire un système complexe en un petit nombre de dimensions.

C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer des axes factoriels indépendants dans l'hyperespace des « n » paramètres mesurés. Ces axes sont orthogonaux dans cet hyperespace, ce qui induit une indépendance entre ceux-ci.

Comme dans les analyses des eaux, il existe des mesures de nature diverse telles que le pH mesuré en unité pH, c'est-à-dire logarithmique, où les concentrations (mg/l), il est préférable d'effectuer les calculs à partir de la matrice de corrélation qui élimine ces inconvénients (Nouar T, 1997).

3.3.2. a. Etude de la contribution des observations aux trois premiers facteurs :

Un ACP a été pratiqué sur le tableau général des analyses réalisées sur l'ensemble des points de mesure (forages). Les 03 premiers facteurs fournissent une inertie de 80,61% (56,78%, 13,73 et 10,10%) qui semble assez bonne compte tenu de l'inertie moyenne (Tableau. 10).

La répartition des variables dans le plan I-II permet d'attribuer une signification au premier facteur (Figure 10). Il regroupe dans sa partie droite l'ensemble des éléments chimiques TDS, CE, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{4-} , PO_4^{4-} et NO_3^{-3} constituant la minéralisation des eaux₃ et s'oppose à l'élément de la pollution (HCO_3^{-3}) dans sa partie gauche. Il convient cependant de noter que NO_3^{-3} contribue aussi significativement au pôle de la minéralisation que les autres paramètres. Les bicarbonates et pH sont portés par l'axe F2, cet axe traduit le phénomène de dissolution des bicarbonates. Selon l'axe F3, il regroupe dans sa partie positive les ortho phosphates et s'oppose au Potassium. Cet axe discrimine peut-être l'origine différente de ces deux éléments.

Tableau .10 : Analyse en composante principale.

	Composante		
	F1 (56,788)	F2(13,73 4)	F3 (10,107)
TDS	0.936	0.136	0.125
pH	0.554	0.708	-0.010
EC	0.981	-0.109	-0.063
Ca	0.851	-0.036	0.363
Mg	0.612	0.442	-0.260
Na	0.720	-0.419	-0.214
K	0.591	0.397	-0.551
HCO3	-0.511	0.644	0.389
Cl	0.912	-0.304	-0.253
SO4	0.858	0.194	0.167
PO4	0.549	-0.202	0.507
NO3	0.757	-0.045	0.380

3.4. Aptitude de l'eau à la consommation humaine et domestique

Les paramètres physico-chimiques et chimiques sont confrontés aux normes de l'OMS.

3.4.1. Paramètres physico-chimiques

3.4.1.a. PH, CE et TDS

Le pH indique le degré d'acidité ou d'alcalinité de l'eau. Dans cette étude, le pH varie entre 7.20 et 7.62 avec une moyenne de 7.48. Ces valeurs sont en dessous de la limite permise

De 8.5 (OMS 2011).

La minéralisation de l'eau varie avec la conductivité électrique. La valeur moyenne de la conductivité électrique était de 974.90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un maximum (1305 $\mu\text{S}/\text{cm}$) qui reste inférieur à la limite permise de 1420 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs totales des sels dissous (TDS) des eaux Oscillent entre 497 et 812 avec une moyenne de 635.20 mg/l. Ces valeurs étaient inférieures à la limite maximale permise par la norme, soit 1500 mg/l.

3.4.1. b. La dureté ou Titre hydrotimétrique

La dureté est définie comme l'inhibition de l'action du savon dans l'eau en raison de la précipitation de Magnésium et sels de Calcium. Elle peut être temporaire ou permanente. Une eau dure provoque l'obstruction des canalisations par le dépôt de tarte (sels) et peut nuire à la santé humaine en provoquant des maladies telles que l'insuffisance rénale. Elle est calculée par la formule suivante (Sawyer et McCarthy, 1967) :

$$TH_{CaCO_3} \text{ (mg/l)} = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) * 50$$

Avec (Ca^{2+}) et (Mg^{2+}) en méq/l

Le TH ou dureté est situé entre 221.66 et 450.83 mg/l avec une moyenne de 323,08 g/l (tableau 11), en comparaison avec le tableau 12, les eaux sont dures à très dures.

Tableau .11 : Valeurs la dureté (TH) des sources.

Nom	TH_{CaCO_3} (mg/l)
S1	295
S 2	316.66
S 3	302.50
S 4	367.50
S 5	450.83
S 6	346.66
S 7	291.66
S 8	221.66
S 9	363.33
S 10	275
Moyenne	323.08

Tableau. 12 : Classification d'après Sawyer et McCarty, 1964.

TH	< 75 mg/l	Eau douce	Observation
	75-150 mg/l	Eau moyennement Dure	-
	150-300mg /l	Eau dure	Toutes les Eaux
	>300	Eau très dure	Sont dures

3.4.1.c. Variations des Cations et anions

La concentration en calcium varie entre 72 et 142 mg/l avec une moyenne de 100.90 mg/l, la majorité des sources forages présentent des teneurs en calcium inférieures à la limite souhaitable par le standard de l'OMS pour l'eau potable soit (150 mg/l). La concentration moyenne en magnésium varie entre 10 et 26 mg/l avec une moyenne de 17 mg/l. Il est évident que les eaux des sources étudiées ont une concentration de magnésium dans la limite maximale permise de 100 mg/l. La concentration du sodium oscille entre 36 et 100 mg/l avec une moyenne de 70.40 mg/l, tous les échantillons présentent des valeurs de sodium inférieures la limite permise de 200 mg/l. La concentration moyenne en potassium est de 1 à 3mg/l avec une moyenne de 1.87 mg/l. La majorité des échantillons présentent des valeurs inférieures à la limite permise de 10 mg/l (OMS, 2011).

Les teneurs en bicarbonates varient entre 102 et 298 mg/l avec une moyenne de 185.50 mg/l. Bien qu'il n'y a pas de limites exactes admissibles pour le bicarbonate dans les directives de l'OMS (2011). La présence de HCO_3^- dans l'eau potable ne devrait pas dépasser 500 mg/l afin d'être sans danger pour la consommation humaine. Les concentrations en chlorures dans les eaux des sources, oscille entre 52 à 287 mg/l avec une valeur moyenne de 165.10 mg/l. La limite souhaitable des chlorures pour l'eau potable est spécifiée comme étant de 250 mg/l et tous les échantillons sont en dessous de cette limite. La concentration des sulfates (SO_4^{2-}) varie de 36 à 102 mg/l avec une valeur moyenne de 68.20 mg/l, La majorité des échantillons sont en dessous de dans la limite maximale autorisée de 250 mg/l par le Gouvernement Algérien et peuvent être utilisés pour la consommation. La concentration en nitrates (NO_3^-) des sources varie de 10 à 52 mg/l avec une moyenne de 26.20 mg/l. Les PO_4^{3-} varient entre 0.10 et avec une moyenne de 0.19. Ces teneurs sont inférieures à la norme tolérée de 16 mg/L.

3.5. Aptitude des eaux pour l'irrigation

3.5.1. Pourcentage en Sodium (Na%)

Le pourcentage en Sodium (Na%) est un paramètre important pour classer les échantillons d'une eau souterraine à des fins d'irrigation. Il est calculé par la formule proposée par Doneen (1962).

$$\text{Na}^+ (\%) = 100 (\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$$

Où Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ sont exprimés en meq/l

La présence du sodium avec les carbonates forme un sol alcalin ; tandis que le sodium avec les chlorures forme un sol salin ; les deux cas ne tolèrent pas la croissance des plantes (Pandian et Shankar, 2007). La classification de la qualité de l'eau d'irrigation basée sur les valeurs du pourcentage de sodium proposées par Wilcox (1955) suggère que les eaux souterraines de la zone d'étude sont excellentes, bonnes et utilisables pour la catégorie permise (Tableau.13). Les valeurs de Na^+ (%) oscille entre 21.62 et 41.18 % avec une moyenne de 31.51 %.

Tableau. 13 : Classification de l'eau basée sur le pourcentage en Sodium.

% Na	Classe	Echantillons
20	Excellente	
20 - 40	Bonne	S1, S3, S4, S5, S6, S7, S8 et S
40 - 60	Utilisable	S2
60 - 80	Médiocre	-
> 80	Mauvaise	-

3.5.2. Conductivité électrique (CE)

Elle mesure la capacité de la substance ou de la solution à conduire le courant électrique. La CE des eaux souterraines augmente avec la température et varie avec la quantité de TDS. La conductivité dans les échantillons d'eau souterraine de la zone varie de 714 à 1305 $\mu\text{S} / \text{cm}$ à 25 $^{\circ}\text{C}$ indiquant une bonne catégorie d'eau d'irrigation (Tableau. 14).

La combinaison du taux de sodium et conductivité électrique a permis d'élaborer le diagramme de Wilcox (1955). Il ressort de ce diagramme que les eaux sont classées dans la catégorie excellente à bonne (Figure.8).

Tableau.14 : Comparaison des valeurs de la conductivité électriques avec la classification de Wilcox (1953).

ID	Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	Observation
Catégorie 1	750 <CE> 2250	Toutes les sources
Catégorie 2	2250<CE< 5000	-

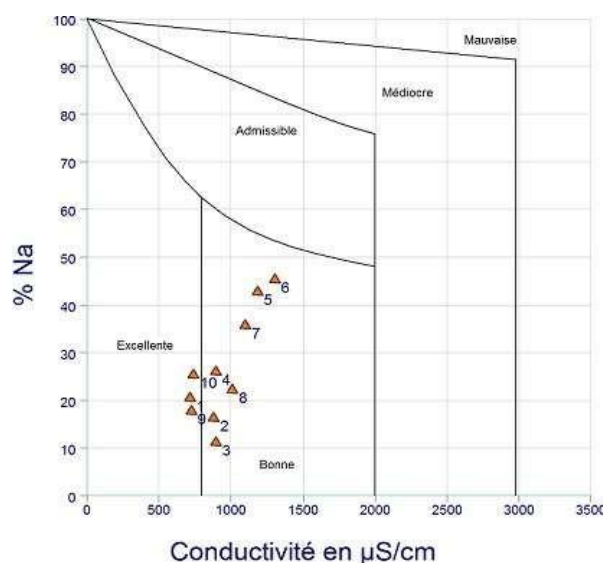


Figure.8 : Diagramme de Wilcox.

3.5.3. Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Le degré auquel l'eau d'irrigation a tendance à entrer dans la réaction d'échange de cations dans le sol peut être indiqué par le rapport au degré d'adsorption de sodium (Richards, 1954). Puisque le sodium remplace le calcium adsorbé et le magnésium dans le sol, il est donc exprimé comme suit :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/2)]^{1/2}}$$

Avec Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} en meq/l

L'excès de sodium dans les eaux souterraines s'adsorbe sur les particules du sol, modifiant ainsi les propriétés du sol et réduisant également la perméabilité du sol (Ayers et Bronson, 1975).

Selon la classification de (Richard, 1954), l'eau avec un SAR ≤ 10 est considérée comme excellente, bonne entre 10 et 18 ; médiocre entre 18 et 26 et considéré comme impropre à l'irrigation dans sa forme naturelle quand il est supérieur à 26. Comme le montre le tableau 15, Tous les échantillons d'eau souterraine ont un SAR ≤ 10 ; donc excellente pour l'irrigation. Le diagramme de Richards (1954) combine la conductivité et la valeur du SAR. Cette combinaison, a permis d'élaborer le diagramme suivant (figure 14). Les différentes classes du diagramme indiquent la mesure dans laquelle les eaux peuvent affecter le sol en termes de risque de salinité. Ces classes sont : Faible salinité (C1), moyenne (C2), haute (C3) et très forte salinité (C4) et danger de sodium similaire : Faible (S1), moyen (S2), élevé (S3) et très élevé (S4). L'observation de la figure 9 montre que les eaux de la région se répartissent au niveau de la classe C2S1 et C3S1 désignent des eaux bonnes à admissibles. La première catégorie d'eau est utilisée sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart du sol. Quant à la deuxième Classe (C3S1), l'eau peut être utilisée seulement pour l'irrigation de cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité, avec une salinité qui doit être contrôlée (Richards, 1954).

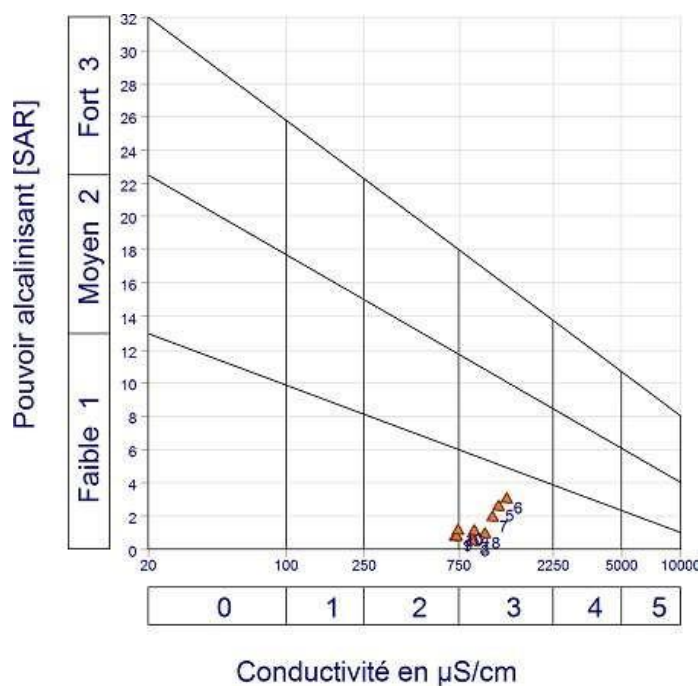


Figure.9: Diagramme de Richards.

3.5.4. Carbonate de sodium résiduel (RSC)

La forte concentration d'ions bicarbonate dans l'eau provoque la précipitation du calcium et du magnésium sous forme de carbonates, ce qui permet l'augmentation de la concentration de sodium dans le sol. La RSC est calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\text{RSC} = (\text{HCO}_3^- * 0.0333) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Les concentrations de l'alcalinité sont exprimées mg / l

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ sont en méq / l.

Les valeurs de RSC < 1,25 mg/l sont considérées comme sans danger pour l'irrigation, tandis que celles comprises entre 1,25 mg/l à 2,5 mg/l conviennent marginalement à l'irrigation. Si les valeurs de RSC sont > 2,5 mg/l, l'eau souterraine ne convient pas pour l'irrigation (Eaton ,1950 ; Richards, 1954). Les valeurs RSC des échantillons d'eau de la zone d'étude vont de 0.34 à 1.13 mg/l avec une moyenne de 0.62 (Tableau 15) donc marginalement adaptées à l'irrigation.

3.5.5. *Indice de Kelly*

Le ratio de Kelley (KR) (Kelley ,1963) est décrit comme suit :

$$\text{KR} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Toutes les valeurs sont en meq/l

Si KR est inférieur à 1, cela signifie que les eaux sont aptes à l'irrigation et si KR >3, les eaux sont inaptes à l'irrigation. L'indice de Kelly calculé des eaux souterraines de la zone d'étude varie entre 0.28 et 0.70 meq/l avec une moyenne de 0.47 meq/l (Tableau 15) indiquant que ces eaux sont appropriées à l'irrigation.

3.5.6. *Magnésium Ratio*

En général, le calcium et le magnésium sont à l'état d'équilibre dans l'eau, le taux élevé de magnésium dans l'eau influe sur sa qualité, d'où le danger alcalin (Paliwal ,1972), Il est calculé par l'équation suivante:

$$\text{Mg ratio} = 100 \times [(\text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}))]$$

Toutes les valeurs sont exprimées en méq /l.

Les valeurs du magnésium ratio oscillent entre 13.16% et 29.82%, avec une valeur moyenne de 20.82%. 100% des échantillons sont en dessous de la limite autorisée de 50% indiquant l'effet favorable sur le rendement des cultures et la diminution de l'alcalinité du sol (Tableau 15). Dans notre zone d'étude, toutes les eaux sont utilisées pour des fins agricoles concernant le magnésium ratio.

3.5.7. Indice de Perméabilité

La perméabilité du sol est réduite par l'utilisation des eaux riches en sels de l'eau (Singh et Singh 2008). Pi est utilisé pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation et peut être calculé à partir de l'équation de Doneen (1962) comme suit:

$$IP = [(Na^+ + (HCO_3)^{1/2} / Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)] \times 100:$$

Selon cette classification, l'eau d'irrigation à haute perméabilité (75%) est classée en classe I, tandis que la classe II a une perméabilité comprise entre 75 et 50% (Nagaraju et al. 2006). Les eaux de classe I et de classe II sont classées comme bonnes à des fins d'irrigation. La troisième catégorie (classe III) ne convient pas avec 25% de perméabilité maximale (Dhirendra et al. 2009). Sur la base de la classification PI, la majorité des échantillons d'eau de la zone d'étude appartiennent aux classes I et II Figure.7c), et sont de bonne qualité pour l'irrigation.

Tableau. 15 : Les résultats de Na%, SAR, RSC, KR et Mg²⁺ des échantillons.

ID	Na ⁺ (%)	SAR	KR	RSC	Mg ²⁺ (%)	IP %
S1	36.80	2.83	0.29	0.39	16.95	51.82
S2	41.18	3.52	0.58	0.58	13.16	56.64
S7	32.83	2.40	0.70	0.34	28.93	47.18
S4	34.36	2.84	0.49	0.51	23.81	47.20
S5	28.09	2.35	0.52	0.66	21.26	39.95
S6	26.67	1.92	0.39	1.13	26.44	50.05
S7	21.62	1.33	0.36	0.78	18.57	48.55
S8	36.26	2.40	0.28	0.51	18.80	62.93
S9	36.00	3.03	0.57	0.79	29.82	51.95
S10	31.16	2.12	0.56	0.75	18.18	56.50
Minimum	21.62	1.33	0.45	0.34	13.16	39.95
Maximum	41.18	3.52	0.28	1.13	29.82	62.93
Moyenne	31.51	2.47	0.70	0.62	20.82	50.25

3.6. Conclusion

L'étude hydro chimique a décelé de déterminer la qualité physico-chimique des eaux pour leurs destinations appropriées. Nous pouvons conclure que ces eaux sont bonnes à la consommation humaine, comparées aux normes de l'OMS. Pour l'utilisation agricole, ces eaux peuvent être utilisées sans restriction.

CONCLUSIONS GENERALES

Au terme de ce travail qui a permis de faire le point sur les principales connaissances hydrologiques et hydrochimiques des eaux des sources de la région de Ben Smih. Nous présentons une synthèse des résultats obtenus

La région d'étude est située au Nord-est de l'Algérie orientale et appartient à la chaîne des maghrébines. D'un point de vue géologique, la région de Ben Smih appartient au domaine tellien et est caractérisée par des formations miocènes, paléocène, éocènes et du plio-quadernaire.

Les données climatiques, observées à la station de Guelma, montrent des précipitations moins abondantes dont le total annuel atteint 544 mm. L'évapotranspiration réelle calculée est de 424,6mm. Le bilan d'eau établi pour la même station, montre que l'alimentation des nappes se produit uniquement à partir de Novembre à Mai tandis que le déficit d'écoulement du mois de Juin à Octobre. Le bilan établi montre un excédent de 119,4 mm qui s'étend de Janvier à Avril et le déficit pour le reste de l'année.

Les données hydro chimiques projetés sur les diagrammes de piper et de Chadah ont donné deux types de faciès : Faciès bicarbonatés calcique et chloruré calcique. Ces deux types de faciès sont dus à la géologie de la région.

La projection des rapports chimiques $Cl^-/Cl^- + HCO_3^-$ et $Na^+ + K^+ / Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$ sur le diagramme de Gibbs, ont montré que la minéralisation est acquise par la dissolution des roches.

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 de sources de la région et en cette période de prélèvement sont sous-saturées en dolomite, gypse et anhydrite. En revanche, pour la calcite 80% des échantillons sont sursaturés. Les valeurs obtenues de la pression partielle en CO_2 sont en général faibles dans la majorité des points d'eau étudiés et sont de l'ordre de 10^{-2} atmosphères supérieures à la pression atmosphérique ($10^{-3,50}$).

Du point de vue statistique, la corrélation a montré que la conductivité électrique est contrôlée par tous les éléments à l'exception du pH. L'analyse en composante principale a permis de mettre en évidence 3 axes qui ont donné le maximum d'information et a permis de dégager les facteurs responsables des variations chimiques.

Les analyses physico-chimiques ont montré que ces eaux sont très dures et doivent être adoucies. La classification selon Wilcox et Richard (SAR, Mg ratio IP, RSC... etc.) permet de voir que ces eaux sont aptes à l'irrigation.

BIBLIOGRAPHIE

- Aghazadeh, Abu, J., Mohd, S., Ismail, A., Mohd Rémy, R., Hussam, E., 2015. *Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): hydrochemistry and water quality*. *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 2203–2215.
- Aghazadeh, N., Mogaddam, A., 2010. *Assessment of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural uses in the Oshnavieh area, Northwest of Iran*. *Journal of Environmental Protection*, 1: 30-40.
- Ayers, R., Bronson, S., 1975. *Guidelines for interpretation of water quality for agriculture*. University of California, Davis.
- Doneen, L.D., 1962. *The Influence of Crop and Soil on Percolating Water, Biennial Conférence on Groundwater Recharge, Proceedings 1961, Davis*.
- Doneen, LD., 1964. *Notes on water quality in agriculture*. Department of Water Sciences and Engineering, University of California, Davis.
- Eaton, F. M., 1950. *Significance of carbonates in irrigation waters*. *Soils Science*, 69: 23-34.
- Gibbs, R.J., 1970. *Mechanism controlling world river water chemistry*. *Science*, 170 :1088- 1090.
- Jain, P., Sharma, J.D., Sohu, D., Sharma P., 2005. *Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2:373-379.
- Kelly, W.P., 1963. *Use of saline irrigation water*. *Soil Science*, 95:355–391.
- Kumar, M., Singh U.K., Kumari, K., Ramanathan., 2009. *Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: conventional graphical and multivariate statistical approach*. *Environmental Geology*, 57:873–884.
- Nouar, T., Toumi, A., Gueroui, Y., Harida, B., 2016. *Hydrochemistry of water springs of the travertine aquifer of Guelma in north-east of Algeria*. *International Journal of Advanced Research (IJAR)*, 4: 1058-1063.
- Paliwal, K.V., 1972. *Irrigation with saline water*. Water Technology Centre, Indian Agriculture Research Institute, New Delhi.
- Pandian, K., Sankar, K., 2007. *Hydrochemistry and groundwater quality in the Vaippar river basin, Tamil Nadu*. *Journal of the Geological Society of India*, 69: 970-982.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A., 1999. *User's guide to PHREEQC (Version 2): a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Report 99-4259, U.S. Geological Survey: Earth Science Information Center, Open-File Reports Section, 288 p.
- Piper, A.M., 1944. *A graphical procedure in the chemical interpretation of groundwater analysis*. *Eos, Transactions - American Geophysical Union*, 25: 914-923.

Richards, L.A., 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. US Department of Agriculture, Washington, DC.

Sawyer, C.N., McCarthy, P.L., 1967. *Chemistry for sanitary engineers*. McGraw-Hill, New York, 2nd edition.

Simler, R., 2003. *Hydrochemistry Multilanguage Softwar Free Distribution Laboratory of Hydrogeology*. University of Avignon, France software, Avignon.

SOGREAH (Société française d'ingénierie). 1999. *Etude intégrée de la wilaya de Guelma. Rapport final, DHW- 11158-AL, Direction d'hydraulique Guelma (DHW/ Guelma)*, 182p.

Taha, H.D., 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, université de FRANCHE-COMTE*.

Thorntwaite, C. W., 1948. *An approach towards a rational classification of climate*. *Geographical review*, 38 : 55-596.

World Health Organization -WHO. 2011. *Guidelines for drinking water quality*, World Health Organization, Geneva, 4th edition.

Wilcox, L.V., 1955. *Classification and use of irrigation water*. US Department of Agriculture, Circular 969, Washington, DC.