

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



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

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Domaine : Science de la Terre et d'Univers
Filière : Géologie
Spécialité : Hydrogéologie

Présentée par

Gaoua Rahma
Bouziane Saad

Intitulée

***Hydrogéologie et Hydrochimie de la Nappe Alluviale du
Bassin de Guelma au Nord-Est***

Soutenue le : 03/07/2021

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr Ghreib Lassaad	M.C. A	Univ. de 8 mai 1945 Guelma	Président
Mr Nouar Tahar	Pr.	Univ. de 8 mai 1945 Guelma	Encadreur
Mr Bennacer Laila	M.C.B	Univ. de 8 mai 1945 Guelma	Examinateur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

A Monsieur le Professeur NOUAR Tahar

Recevez nos plus sincères remerciements pour nous avoir encadrés, pour l'intérêt que vous avez toujours porté à ce travail et pour les moyens mis à notre disposition durant la période d'encadrement. Soyez assuré de toutes nos considérations et de notre profond respect.

A Monsieur le Docteur GHERIEB Lassaad

Maitre de conférences A à de la Faculté de SNV & STU–Université 8
Mai 1945

Recevez nos plus sincères remerciements pour avoir accepté de présider ce travail. Nous tenons à vous exprimer mon admiration pour votre enthousiasme et votre dynamisme sans faille

A Madame le Docteur BENACER Laila

Maitre de conférences B à de la Faculté de SNV & STU –Université 8
Mai 1945

Nous vous remercions pour la précieuse relecture que vous avez faite de ce mémoire et pour vos commentaires constructifs. Soyez assurée de Notre plus profond respect et de notre profonde gratitude.

A Nos familles

Pour nous avoir fait confiance, pour nous avoir permis de réaliser ce mémoire dans les meilleures conditions possibles et pour votre soutien qui a été essentiel tout au long de nos études et tout particulièrement au cours de ce travail. Merci pour votre patience et votre amour. Nous vous en sommes infiniment reconnaissants.

Merci à vous tous

Résumé

Le bassin de Guelma possède des ressources hydriques relativement importantes. Ces dernières années, un essor économique, particulièrement agricole, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité de ces eaux.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du mémoire de fin d'étude dont l'objectif est l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe alluviale de Guelma. Il a pour objectif de déterminer la qualité physico-chimique de des eaux de la nappe alluvionnaire de Guelma pendant la période des Hautes Eaux à travers quelques échantillons pris généralement dans les puits et forages encore en exploitation dans la région.

Pour atteindre les objectifs préconisés, il s'est avéré nécessaire de faire un recueil bibliographique de toutes les études antérieures disponibles réalisées sur l'aquifère du bassin de Guelma. La synthèse géologique et hydrogéologique a servi essentiellement à la description lithologique, ainsi qu'à la détermination des horizons de la nappe alluviale à partir des coupes hydrogéologiques. 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 de la nappe. L'analyse chimique des échantillons d'eau prélevés au courant de mois de février et mars 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.

Mots Clés : *Hydrogéologie, Hydrochimie, Nappe Alluvionnaire ; qualité de l'eau ; Guelma, Algérie*

Abstract

The Guelma basin has relatively large water resources. In recent years, an economic boom, particularly in agriculture, has taken place, which has led, on the one hand, to an increase in water requirements and, on the other hand, to the degradation of the quality of these waters.

This work is part of the final thesis, the objective of which is the hydrogeological and hydrochemical study of the alluvial water table of Guelma. Its objective is to determine the physico-chemistry and the water quality of the alluvial aquifer of Guelma during the High-Water period through a few samples generally taken from wells and boreholes still in operation in the region.

To achieve the recommended objectives, it has proved necessary to make a bibliographical compilation of all the previous studies available carried out on the aquifer of the Guelma basin. The geological and hydrogeological synthesis was used primarily for the lithological description, as well as for the determination of the horizons of the alluvial water table from hydrogeological sections. 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 tablecloth. The chemical analysis of the water samples taken during the month of March was carried out at the ANRH Constantine. The interpretation of the chemical data, mainly the major elements (cations: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} and anions: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- and NO_3^-) and the calculation of certain parameters made it possible to determine the destination of these waters for drinking water supply and irrigation.

Keywords: *Hydrogeology, Hydrochemistry, Alluvial aquifer; water quality; Guelma, Algeria*

ملخص

يتمتع حوض قالمة بموارد مائية كبيرة نسبياً. في السنوات الأخيرة، حدث انتعاش اقتصادي، وخاصة في الزراعة، مما أدى من ناحية، إلى زيادة في الاحتياجات المائية، ومن ناحية أخرى، إلى تدهور جودة هذه المياه.

هذا العمل هو جزء من الأطروحة النهائية، والهدف منها هو دراسة هيد وجيولوجية وهيدروكيميائية للمياه الجوفية لحوض لقالمة. هدفها هو تحديد الكيمياء الفيزيائية ونوعية المياه الجوفية افي قالمة خلال فترة ارتفاع المياه من خلال بضع عينات مأخوذة بشكل عام من الآبار والآبار التي لا تزال تعمل في المنطقة.

لتحقيق الأهداف الموصي بها، ثبت أنه من الضروري عمل تجميع بيليوغرافي لجميع الدراسات السابقة المتاحة التي أجريت على طبقة المياه الجوفية لحوض قالمة. تم استخدام التركيب الجيولوجي والهيد وجيولوجي في المقام الأول للوصف الصخري، وكذلك لتحديد آفاق منسوب المياه الغرينية من الأقسام الهيد وجيولوجية. أتاح تحليل البيانات المناخية (درجة الحرارة وهطول الأمطار) خلال العشرين عامًا الماضية من منطقة الدراسة تحديد كمية الأمطار التي تغذي منسوب المياه الجوفية، وتتابع الفصول (الموسم الرطب وموسم الجفاف) بالإضافة إلى فترة تغذية مفرش بقسنطينة. تفسير البيانات ANRH المائدة. تم إجراء التحليل الكيميائي لعينات المياه المأخوذة خلال شهر مارس في SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، والأيونات K^+ ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} ؛ الكاتيونات) الكيميائية، وخاصة العناصر الرئيسية Cl^- و NO_3^- .

وحساب معلمات معينة جعلت من الممكن تحديد وجهة هذه المياه لإمداد مياه الشرب والري

الكلمات المفتاحية: الهيدروجيولوجيا، الكيمياء المائية، طبقات المياه الجوفية؛ جودة المياه؛

قالمة، الجزائر

Table des matières

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DE FIGURES ET TABLEAUX

LISTE DES ABRIVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : CADRE GEOLOGIQUE	
1.1. Introduction	3
1.2. Facies tertiaire	3
1.3. Miocène superieur.....	3
1.4. Pliocène	4
1.5. Formations quaternaires	4
1.6. Conclusion	6
CHAPITRE 2 : HYDROCLIMATOLOGIE	
2.1. Introduction.....	7
2.2. Station de Mesure.....	7
2.3. Factures Climatiques	7
2.3.1. Les Précipitations	7
2.3.2. La Température	8
2.4. Diagramme pluviothermique.....	8
2.5. Bilan hydrologique.....	9
2.5.1. Bilan de Thornthwaite	9
2.6. Estimation de Ruissellement	13
2.7. Estimation de l'infiltration	13
2.8. Calcul d'indice d'aridité	14
2.9. Le coefficient pluviométrique relatif	14
2.10. Précipitations saisonnières.....	16
2.11. Conclusion.....	16
CHAPITRE3: HYDROGEOLOGIE	
3.1. Géométrie des horizons	17
3.2. Etude des parametres hydrodynamiques.....	17
3.2.1. Les épaisseurs mouillées	17
3.2.2. Les transmissivités	17
3.2.3. Les perméabilités.....	18
3.3. Piézométrie.....	18
3.3.1. Interprétation de la carte piézométrie	18
3.3.2. Les conditions aux limites	19
3.3.2.1. Limites externes	20
3.3.2.2. Sous limites internes	20
3.4. Conclusion	20
CHAPITRE 4 : MATERIELS ET METHODES	
4.1. Introduction.....	21
4.2. Echantillonnage.....	21

4.3. Matériel et méthodes de prélèvement	21
4.4. Transport des échantillons	21
4.5. Analyses physico-chimiques	22
4.5.1. Les paramètres physiques	22
4.5.2. Potentiel en hydrogène (pH)	22
4.5.3. La température (T°C)	22
4.5.4. La conductivité (CE)	23
4.6. Les paramètres chimiques	23
4.6.1. Dosage du calcium (Ca ²⁺)	23
4.6.2. Dosage de sodium et potassium (Na ⁺ et K ⁺)	24
4.7. Les chlorures (Cl ⁻)	25
4.8. Détermination des sulfates (SO ²⁻ ₄)	25
4.9. Dosage de nitrates (NO ³⁻)	28
4.10. Dosage des nitrates (méthode spectrométrique)	30
4.11. Conclusion.....	31
CHAPITRE 5 : HYDROCHIMIE	
5.1. Introduction	32
5.2. Hydrochimie des eaux souterraines	32
5.3. Facies hydrochimique	33
5.3.1. Diagramme de Chaddah	33
5.3.2. Diagramme de Piper	34
5.4. Mécanisme contrôlant le chimisme de l'eau	35
5.5. Indice de saturation	37
5.6. Destination de l'eau	39
5.6.1. Alimentation en eau potable et domestique	39
5.6.2. La dureté	39
5.6.3. Classification selon l'O.M. S	39
5.7. Aptitude à l'irrigation	40
5.7.1. Classification de Wilcox	40
5.7.2. Diagramme de Richards	41
5.8. Etude statistique multivariée	44
5.8.1. Matrice de corrélation	44
5.8.2. Analyse en composante principale (ACP)	44
5.8.2.1. Contribution des variables au premier facteur	45
5.8.2.2. Contribution des variables au deuxième facteur	45
5.8.2.3. Contribution des variables au Troisième facteur	45
5.9. Indice de contamination	47
5.10. Conclusion	48
CONCLUSION GENERALE	49

Liste de figures

Figure 1: Situation géographique du bassin de Guelma.....	2
Figure 2.a: Diagramme pluviothermique de Guelma.....	8
Figure 2.b: Diagramme pluviothermique de Héliopolis.....	9
Figure 3.a: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la station de Guelma	12
Figure 3.b: Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la station d'Héliopolis.....	12
Figure 4.a: Coefficient pluviométrique relatif à la station de Guelma	15
Figure 4.b: Coefficient pluviométrique relatif à la station de Héliopolis	16
Figure 5: Coupe hydrogéologique de la nappe de Guelma	17
Figure 6: Carte piézométrique de la nappe alluviale de Guelma.....	19
Figure 7: Situation géographique des points de prélèvement.....	32
Figure 8: Répartition des anions et cations (%)	33
Figure 9: Diagramme de Chadah.....	34
Figure 10: Diagramme de Piper.....	35
Figure 11: Diagramme de Van Wirdum (1980)	36
Figure 12: Diagramme de Gibbs (1970)	37
Figure 13: Diagramme de Wilcox	41
Figure 14: Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Richards.....	42
Figure 15: ACP des points de prélèvement selon F1xF2.....	46
Figure 16: ACP des ponts de prélèvement F1xF3	46

Liste de tableaux

Tableau 1: Caractéristiques géographiques et topographiques de la station de Guelma et Héliopolis	7
Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Guelma et Héliopolis	7
Tableau 3: Température moyenne mensuelle de la station de Guelma et Héliopolis	8
Tableau 4.a: Bilan d'eau de Thornthwaite de la station de Guelma.....	10
Tableau 4.b: Bilan d'eau de Thornthwaite de la station de Héliopolis.....	11
Tableau 5: Terme du bilan hydrologique.....	13
Tableau 6: Indice d'aridité de la station.....	14
Tableau 7: Coefficient pluviométrique relatif.....	15
Tableau 8: Précipitation saisonnière.....	16
Tableau 9 : Valeurs des transmissivités , épaisseur mouillée et perméabilités de la nappe alluviale	18
Tableau 10: Statistique descriptive.....	33
Tableau 11: Indice de saturation et PCO ₂	38
Tableau 12: Classification de la dureté de l'eau selon	39
Tableau 13: Comparaison des éléments physico-chimique avec les Normes de L'O.M.S (2017)	40
Tableau 14: Valeurs du SAR et CE.....	43
Tableau 15: Matrice de corrélation.....	44
Tableau 16: Inertie des 3 composantes principales.....	45
Tableau 17: Intervalle de classe.....	47
Tableau 18: Indices de contamination des points de prélèvement.....	48

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP: Analyse en Composantes Principales.

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques.

CE : Conductivité Electrique.

CP : coefficient pluviométrique relatif .

Déf: Déficit agricole

EDTA : Acide éthylène Diamine Tetra Acétique.

ETP : Evapotranspiration Potentielle.

ETR : Evapotranspiration Réelle.

EXC : Excédent.

I : Infiltration.

IC : Indice de contamination.

IS: Indice de saturation.

I_t: Indice thermique annuel.

i_t : indice thermique mensuel .

IAP : Produit d'Activité Ionique.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

P : Précipitations.

pH : Potentiel en Hydrogène.

R : Ruissellement.

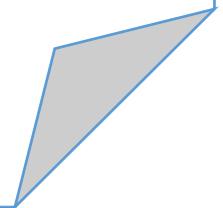
RFU : Reserve en eau Facilement Utilisable.

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

TDS : Teneur en Sel Dissous.

TH: Titre Hydrotimétrique.

Introduction Générale



Introduction générale

Dans la région de Guelma, la principale source d'approvisionnement est l'eau souterraine. La grande perméabilité du sous-sol due aux formations alluvionnaires, associée à une grande vulnérabilité, fait que les rejets représentent un potentiel de contamination important.

En raison du phénomène susmentionné, l'objectif du projet est l'évaluation de la contamination de l'aquifère du Guelma.

Pour parvenir à une gestion efficace de l'approvisionnement en eau souterraine, une évaluation hydrogéologique et hydrochimique est nécessaire ; Cette évaluation permet également d'identifier les points polluants qui affectent l'aquifère à la fois directement et indirectement.

Notre mémoire sera subdivisé en plusieurs parties :

- Dans une partie « géologique », nous décrirons les différentes formations géologiques composant le bassin.
- Dans une deuxième, nous traiterons de l'hydrologie de la région en calculant les paramètres du bilan hydrologique.
- La troisième partie sera axée sur l'acquisition des informations hydrogéologiques (hydrodynamique et écoulement souterrain).
- Enfin dans la quatrième partie nous nous intéresserons à l'hydrochimie des eaux de la nappe et des sources. Un suivi étalé sur une période d'observation des cycles hydrologiques nous permettra d'en connaître le fonctionnement hydrochimique et l'influence des facteurs hydroclimatiques, géomorphologiques ainsi que l'intervention de l'activité humaine.

Description de la zone d'étude

Le bassin de Guelma appartient à la moyenne Seybouse dans sa partie Nord, et à la haute Seybouse dans sa partie Sud. Il est d'extension Nord-Sud d'une vingtaine de kilomètres de long et d'une deux à cinq kilomètres de large, pour une superficie de 50 km² (Figure 1).

Ce bassin est limité : Au Nord par les monts de Houara et Béni Ahmed qui culminent à 1100m d'altitude.

- Au Sud par la Mahouna, dont l'altitude est 1413m.
- Au Sud-Ouest par les monts de Sellaoua.
- A l'est par les monts de Nador N'bails.
- A l'Ouest par de vaste plaine et collines.

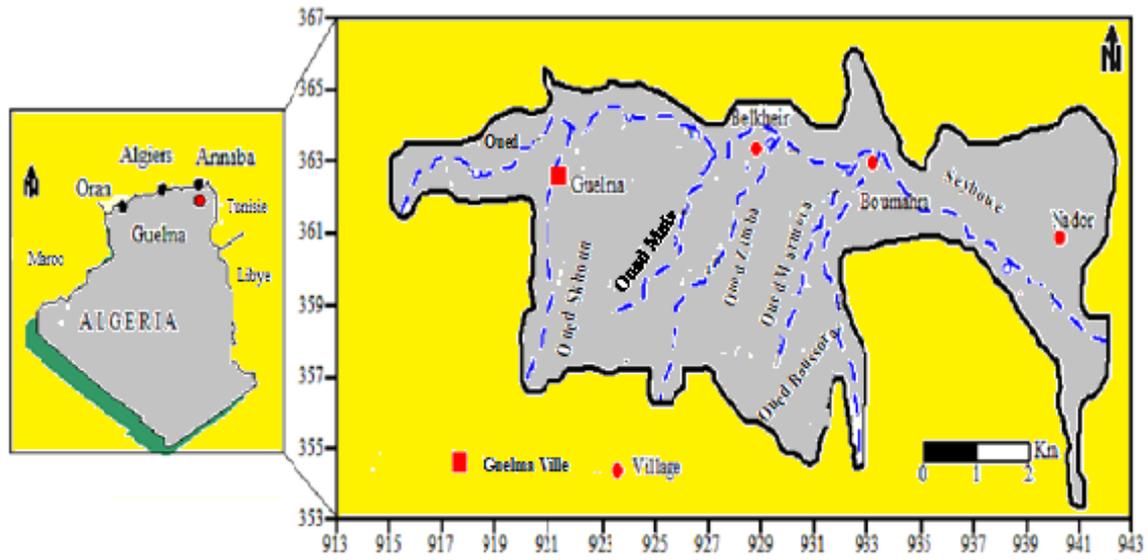
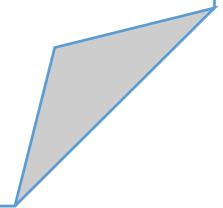


Figure 1: Situation géographique du bassin de Guelma

Chapitre 1 : Cadre géologique



1.1. Introduction

Le contexte géologique de la plaine alluviale de Guelma est basé sur le levé géologique que nous avons réalisé sur le terrain en se basant sur la carte géologique de la région à l'échelle 1/50 000. L'étude géologique du bassin de la Seybouse Guelma permet de distinguer des formations géologiques d'âges allant du Miocène moyen à supérieur jusqu'à l'actuel (Vila,1980).

1.2. Facies tertiaire

La zone de la plaine de Guelma est une zone de passage entre l'ultra-tellien au Nord et le tellien au Sud avec comme substratum le mole néritique ; il s'agit d'un synclinal formé à la suite du creusement de l'Oued Seybouse des formations sédimentaires d'autre fois.

- **Le Miocène moyen:**

Il est caractérisé par les faciès suivant :

- **Les molasses**

Ce sont des formations sédimentaires détritiques, largement épaisses déposées au Sud du village Boumahra au lieu-dit Djebel Bou el Groun ; elles sont composées par parties de couches turbiditiques, et de couches terrigènes.

- **Couches rouges à conglomérats**

Au Nord du village de Boumahra, sur la rive gauche de l'Oued Seybouse le long de la route qui mène à Djeballah Khémissi apparaît un faciès rouge limoneux avec des conglomérats ; il s'agit de formations sédimentaires détritiques déposées en affleurements orogéniques.

1.3. Miocène supérieur

Ce faciès constitue le substratum est la plus ancienne formation du synclinal de la plaine alluviale de Guelma. On le rencontre à l'entrée du village d'Héliopolis, à l'entrée du village de Belkheir, au Sud de Guelma ville et sur la route reliant le village d'Héliopolis et Djeballah Khémissi ; il s'agit de l'argile grise (ou marne) à gypse.

Sur la rive gauche de l'Oued Seybouse; les argiles grises à gypse affleurent en bancs intercalés par des filons de gypses d'un cm d'épaisseur et de quelques mètres de long.

Comme on le trouve le long des bordures de l'axe de l'Oued au Nord-Ouest de Boumahra Ahmed et sur la route RN 20 entre Belkeir et Guelma avec des conglomérats à ciments carbonatés.

1.4. Pliocène

Le creusement des vallées caractérise la phase finale de cet étage, qui est marquée par le dépôt de formations alluvionnaires donnant naissance aux terrasses anciennes (niveau 40 -à 100m environ).

Le facies est caractérisé essentiellement par de gros galets sur les bordures du bassin ; en allant vers l'axe de l'Oued les limons augmentent.

Notant aussi l'existence parfois des poudingues consolidés a ciment de roches carbonatées ; ces formations sont bien nettes au voisinage de la RN 20 entre le village de Belkheir et Guelma. Parallèlement à cela, des dépôt travertinaux de ruissèlement se développent sur les ravinements et qui se rattachent latéralement aux formations précédentes.

1.5. Formations quaternaires

Malgré son importance et son étendue dans cette région, le quaternaire reste la formation géologique la moins connue du point de vue datation.

Ce dernier constitue le facies le plus important de la plaine alluviale de Guelma avec la formation des différentes terrasses.

➤ **Calcaires et travertins**

Ce facies épais de quelques mètres, s'étend sur une grande surface de la région, il est le résultat d'un dépôt d'eau à petite cascade ; soit aux émergences de certaines sources. C'est une roche sédimentaire à aspect concrétionné. Son aspect caverneux est dû probablement en partie à la disparition par fermentation de débris végétaux encrustés de carbonates d'origine biochimique. Les travertins de Guelma et d'Héliopolis sont grossièrement lités de couleur jaunâtre à grisâtre.

➤ **Les tufs et argiles rouge a concrétions carbonatées**

C'est un facies qui recouvre une bonne partie de la région de Guelma. Il est en contact direct avec les formations travertineuses de la région, son épaisseur dépasse parfois les

12 m de profondeur, il est probablement le produit des débris de roches travertineuses mélangées avec les argiles rouges.

➤ **Les formations alluvionnaires**

L'effondrement de la vallée de Guelma est en relation avec la formation des diapirs triasiques au niveau de la région de Nador. L'écoulement de l'Oued vers la région de Bouchegouf, et enfin la naissance des terrasses, suite à une érosion intense sur les monts de la Mahouna, Debagh, et Houara.

Ces terrasses formées essentiellement de formations alluvionnaires déposées par l'Oued suivant son écoulement au cours des différentes phases de son histoire. Nous pouvons distinguer les faciès suivants:

Ces différents étages qui constituent la plaine alluviale de Guelma n'ont pas été datés convenablement jusqu'à ce jour Vila (1980).

A partir de cette définition, nous pouvons distinguer :

• **Matériaux du lit actuel de L'Oued**

De part et d'autre de l'axe de l'Oued, on trouve des matériaux déposés sur quelques mètres de large; ce sont des gros galets, blocs, graviers et limons qui ont subi un transport à l'aide du courant de l'eau pendant les fortes crues et qui se sont déposés sur les bordures voisines de l'axe du cours d'eau.

• **La basse terrasse**

Elle s'élève 3 m et 8 m et est formée de limon, silt et gravier roulés, parfois se sont des galets du fond de la vallée. Elle est la principale basse terrasse actuelle de l'Oued Seybouse, elle s'élargit au Nord-Ouest de Guelma et à l'Est de Boumahra.

• **La moyenne terrasse**

C'est la partie de la plaine qui s'élève à plus de 15 m environ par rapport à l'axe de l'Oued et ses affluents, cette terrasse est généralement absente ou mal représentée. On pense qu'elle a été formée plus loin, par exemple vers la région de Bouchegouf.

• **La haute terrasse**

La composition géologique de cette terrasse relève des formations alluvionnaires anciennes, il s'agit de galets, graviers, sable et limon argileux. Cette dernière domine l'Oued entre 30 m et 50 m d'altitude environ. Elle renferme et plus grande réserve d'eau de cette plaine, suite à son épaisseur importante.

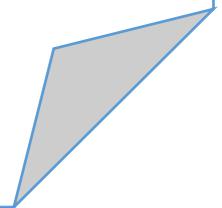
• **Les formations anciennes**

Ce sont les limites amont du bassin (haute terrasse), qui ont une relation directe avec les travertins et grés fissurés de la région de la Mahouna. Elle a une composition de limons avec cailloux roulés, des conglomérats intercalés dans des bancs marno-calcaires un peu travertineux où de cônes de déjections torrentiels.

1.6. Conclusion

Le fond du bassin occupé par une plaine alluviale d'âge allant du mio-pliocène jusqu'à l'actuel, il correspond à un synclinal comblé par des formations quaternaires, qui sont en réalité une série de petite plateaux alluvionnaire emboîtés les uns dans les autres formés essentiellement de gros galets, graviers à éléments grossiers, des conglomérats marno-calcaires, des argiles limono-graveleuses, des grés numidiens et des calcaires lacustres.

Chapitre 2 : Hydroclimatologie



2.1. Introduction

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.

2.2. Station de Mesure

La période d'observation s'est faite à travers la station de Guelma, allant de 1969 à 2018 .

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

Station	Altitude	Longitude	Latitude	Période d'observation
Guelma	227	7°28'E	36°28'N	1969/2018
Héliopolis	260	7°26'E	36°30'N	1969/2018

2.3. 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.

2.3.1. Les Précipitations

La pluviométrie dans cette région se caractérise par une forte intensité des précipitations au printemps avec un maximum de 74 mm et 83 mm au mois de Décembre à la station de Guelma et Héliopolis, et d'une diminution des amplitudes pluviométriques en été avec un minimum de 5 mm et 4,72 mm au mois de Juillet (Tableau 2).

Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles de la station de Guelma et Héliopolis

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Guelma	32	44	69	74	69	65	63	54	50	15	5	10
Héliopolis	33	51	65	83	80	74	71.51	54.81	41	18	4.72	9

2.3.2. 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 et Héliopolis durant la période (1969/2018). 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 8.4 et 10.2 °C respectivement tandis que les plus fortes caractérisent les mois de Juillet et Août avec 26.65 et 27.56 °C respectivement. L'écart thermique entre le mois le plus chaud et le mois le plus sec est de 19.06°C.

Tableau 3: Température moyenne mensuelle de la station de Guelma et Héliopolis

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T (°C)	21.2	19.06	14.36	11.61	8.4	10.2	12	14	19.91	26.65	26.65	27.56

2.4. Diagramme pluviothermique

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 Juin et se termine en Septembre. Quant à la saison humide, elle commence à partir d'Octobre et se termine en Mai (Figure 2.a,b).

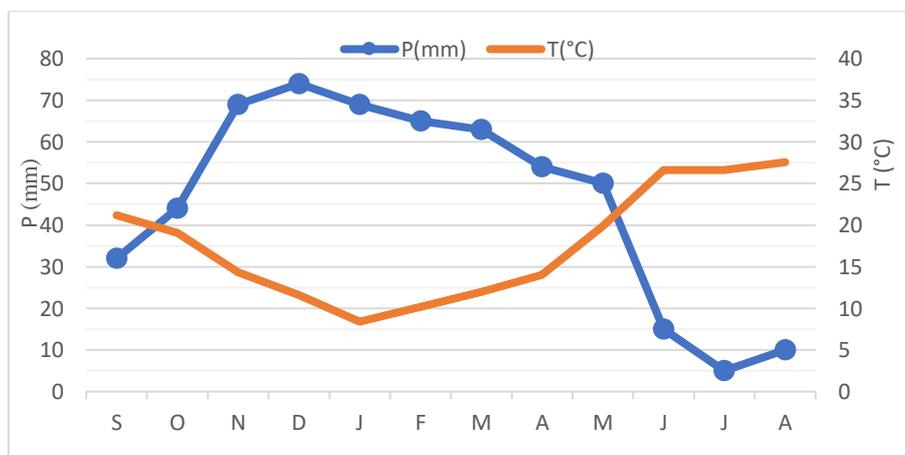


Figure 2.a: Diagramme pluviothermique de Guelma

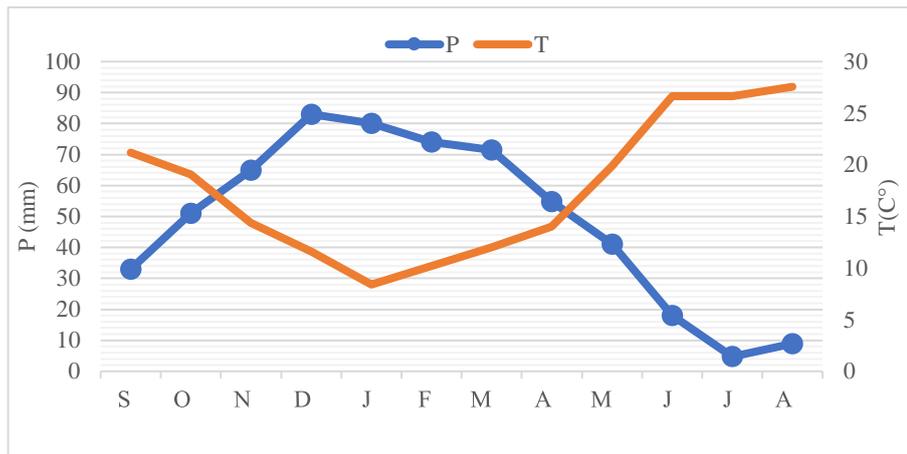


Figure 2.b: Diagramme pluviothermique de Héliopolis

2.5. 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

2.5.1. 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 4). L'évapotranspiration potentielle est calculée par la formule suivante :

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

Où :

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

t: température moyenne annuelle

i_t : indice thermique mensuel

I_t : indice thermique annuel

$F(\lambda)$: 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, 1990).

Tableau 4.a: Bilan d'eau de Thornthwaite de la station de Guelma

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETR	Def	Exc
S	21.2	8.9	1.03	90.1	32	-58.1	-0.6	0.0	0.0	32.0	58.1	0.0
O	19.06	7.6	0.97	69.6	44	-25.6	-0.4	0.0	0.0	44.0	25.6	0.0
N	14.36	4.9	0.86	36.4	69	32.6	0.9	32.6	32.6	36.4	0.0	0.0
D	11.61	3.6	0.81	23.1	74	50.9	2.2	50.9	83.6	23.1	0.0	0.0
J	8.4	2.2	0.87	13.6	69	55.4	4.1	16.4	100.0	13.6	0.0	39.0
F	10.2	2.9	0.85	19.0	65	46.0	2.4	0.0	100.0	19.0	0.0	46.0
M	12	3.8	1.03	31.2	63	31.8	1.0	0.0	100.0	31.2	0.0	31.8
A	14	4.8	1.10	44.4	54	9.6	0.2	0.0	100.0	44.4	0.0	9.6
M	19.91	8.1	1.21	94.1	50	-44.1	-0.5	-44.1	55.9	94.1	0.0	0.0
J	26.65	12.6	1.22	163.4	15	-148.4	-0.9	-55.9	0.0	70.9	92.5	0.0
J	26.65	12.6	1.24	166.1	5	-161.1	-1.0	0.0	0.0	5.0	161.1	0.0
A	27.56	13.3	1.16	165.4	10	-155.4	-0.9	0.0	0.0	10.0	155.4	0.0
Annuel	17.6	85.2		916.2	550.0	-366.2				423.6	492.6	126.4

Tableau 4.b: Bilan d'eau de Thornthwaite de la station de Héliopolis

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RFU	ETR	Def	Exc
S	21.2	8.9	1.03	90.1	33	-57.1	-0.6	0.0	0.0	33.0	57.1	0.0
O	19.06	7.6	0.97	69.6	51	-18.6	-0.3	0.0	0.0	51.0	18.6	0.0
N	14.36	4.9	0.86	36.4	65	28.6	0.8	28.6	28.6	36.4	0.0	0.0
D	11.61	3.6	0.81	23.1	83	59.9	2.6	59.9	88.6	23.1	0.0	0.0
J	8.4	2.2	0.87	13.6	80	66.4	4.9	11.4	100.0	13.6	0.0	55.0
F	10.2	2.9	0.85	19.0	74	55.0	2.9	0.0	100.0	19.0	0.0	55.0
M	12	3.8	1.03	31.2	71.51	40.3	1.3	0.0	100.0	31.2	0.0	40.3
A	14	4.8	1.10	44.4	54.81	10.4	0.2	0.0	100.0	44.4	0.0	10.4
M	19.91	8.1	1.21	94.1	41	-53.1	-0.6	-53.1	46.9	94.1	0.0	0.0
J	26.65	12.6	1.22	163.4	18	-145.4	-0.9	-46.9	0.0	64.9	98.5	0.0
J	26.65	12.6	1.24	166.1	4.72	-161.3	-1.0	0.0	0.0	4.7	161.3	0.0
A	27.56	13.3	1.16	165.4	9	-156.4	-0.9	0.0	0.0	9.0	156.4	0.0
Annuel	17.6	85.2		916.2	585.0	-331.1				424.3	491.9	160.7

- T_P : Température mensuelle en °C

- P : Précipitation mensuelle (mm)

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

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

- ETPc : Evapotranspiration potentielle corrigée (mm)

- Déf: Déficit agricole (mm)

- Exc : Excédent (mm)

L'analyse du bilan hydrique permet d'observer que l'ETR qui représente 77% des précipitations, le déficit agricole commence à partir du mois de juin jusqu'au mois d'octobre avec un maximum au mois de Juillet (161.10mm a Guelma et 161,3mm a Héliopolis). 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) (figure 3.a,b).

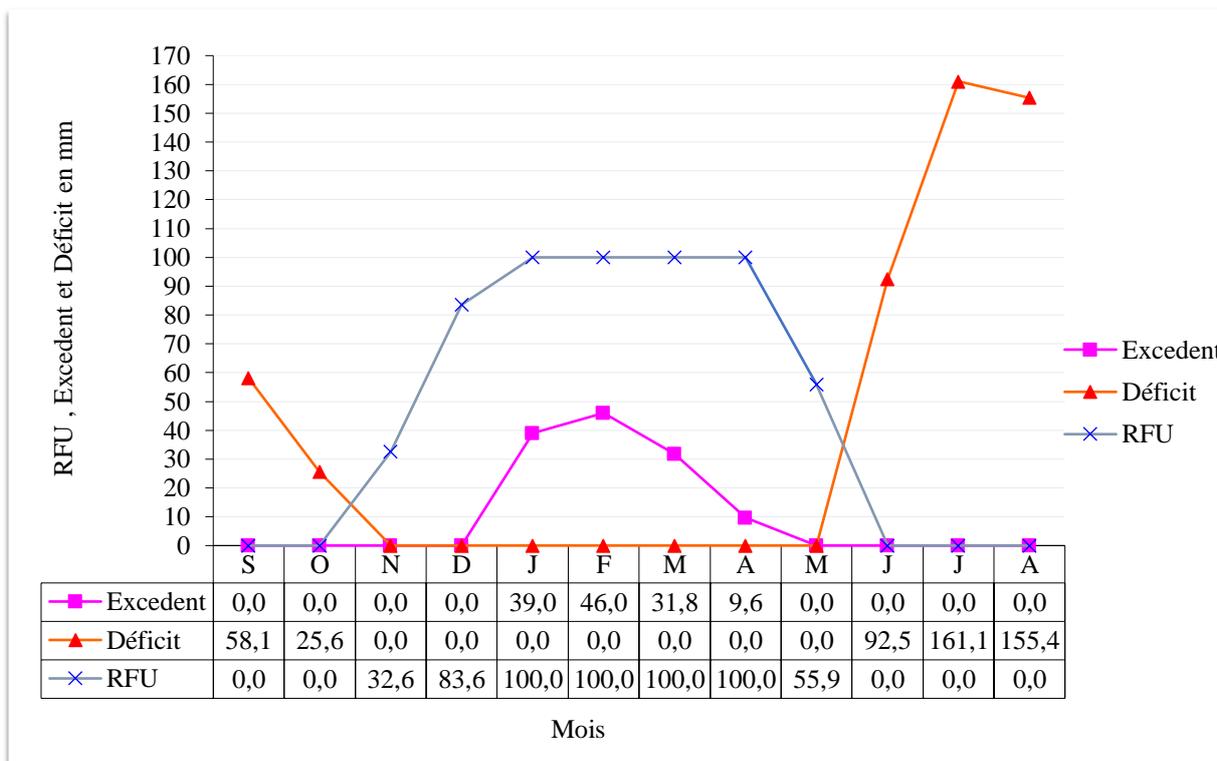


Figure 3.a : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la station de Guelma

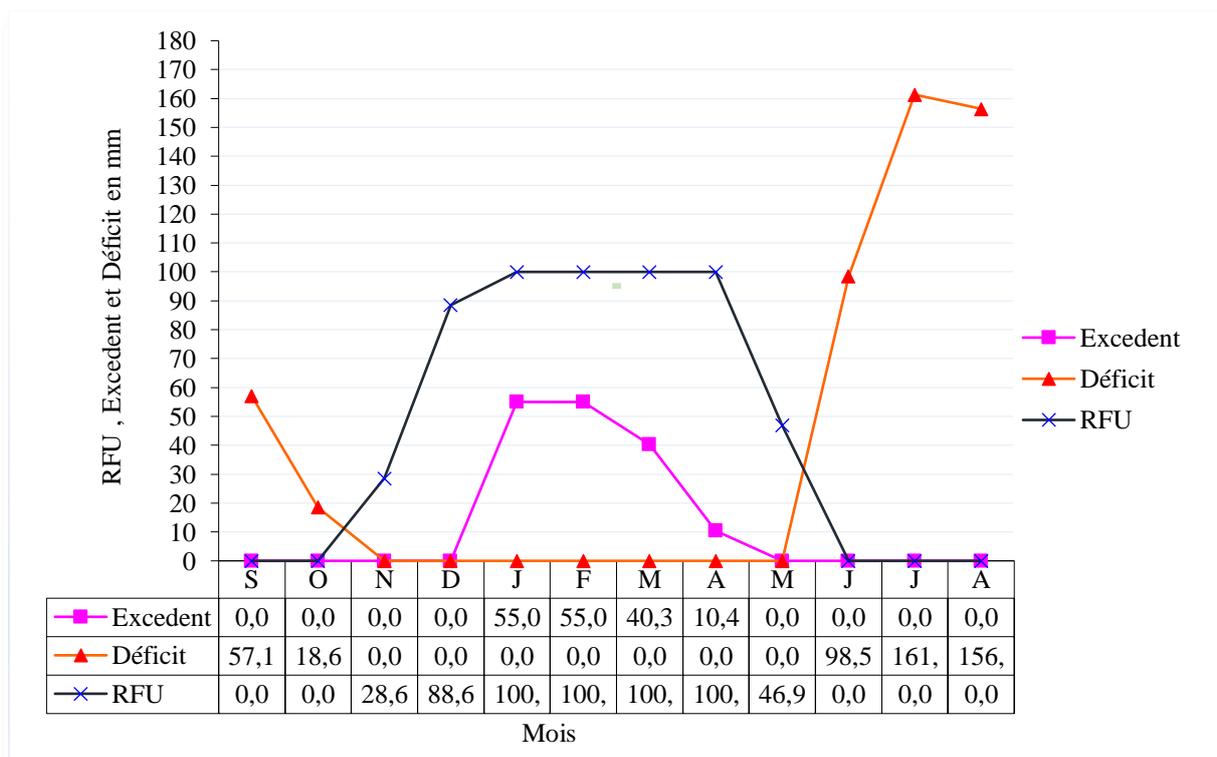


Figure 3.b : Représentation graphique du bilan de Thornthwaite de la station d'Hélioopolis

Il en ressort de la figure que l'évapotranspiration maximum se produit aux de mois de juillet (166.1mm) et août (155.4mm), ce qui entraîne un déficit agricole (492.6 mm) et nécessite une irrigation pour les zones des cultures. Par contre, pendant les mois de novembre à mai, on observe une recharge de la nappe.

2.6. 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 :

$$R = P^3 / 3(ETP)^2 \quad (1)$$

Cette relation n'est valable que pour les précipitations inférieures à 600 mm

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 Guelma 66.06 mm/an et à Héliopolis 79.49 mm/an.

2.7. 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 :

$$P = I + ETR + R \quad (2)$$

D'où l'infiltration sera égale

$$I = P - ETR - R \quad (3)$$

La lame d'eau infiltrée est de 60.34 mm/an à Guelma et de 81.21 mm/an à Héliopolis.

Tableau 5 : Terme du bilan hydrologique

Paramètres	P(mm)	Etr(mm)	R(mm)	I(mm)
Station Guelma	550.00	423.6	66.06	60.34
Station Héliopolis	585.00	424.3	79.49	81.21

2.8. Calcul d'indice d'aridité

Il a été défini par De MARTONNE (1923) selon la formule et la classification suivante:

$$A=P/(T+10) = 550 / 17,6+10 = 19.92 \quad \text{(Guelma)}$$

$$A=P/(T+10) = 585 / 17,6+10 = 21.10 \quad \text{(Héliopolis)}$$

La formule climatique 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 humide

L'indice d'aridité calculé à la station de Guelma est estimé à 19.92 ce qui traduit que la zone d'étude est située sous un climat semi –aride et à la station de Héliopolis est estimé à 21.10 ce qui traduit que la zone d'étude est située sous un climat tempéré (Tableau 6).

Tableau 6 : Indice d'aridité de la station

Station	P(mm)	T(°C)	Indice d'aridité	Observation
Guelma	550	17.6	19.92	Climat semi-aride
Héliopolis	585	17.6	21.1	Climat est tempéré

2.9. Le coefficient pluviométrique relatif

Le coefficient pluviométrique permet de mettre en évidence les mois ou les années secs et arrosés. Il en ressort que les mois les plus humides vont de Novembre à Mai dont le CP est supérieur à 1. Cependant les mois secs vont de Juin à Octobre (tableau7).

Tableau7: Coefficient pluviométrique relatif

	Guelma	Héliopolis
Mois	Coefficient pluviométrique relatif	
S	0.69	0.67
O	0.96	1.04
N	1.50	1.33
D	1.61	1.70
J	1.50	1.64
F	1.41	1.51
M	1.37	1.46
A	1.17	1.12
M	1.09	0.81
J	0.32	0.36
J	0.10	0.09
A	0.21	0.18

Nous avons deux cas:

- Si $CP > 1$ nous avons une année excédentaire.
- Si $CP < 1$ nous avons une année déficitaire.

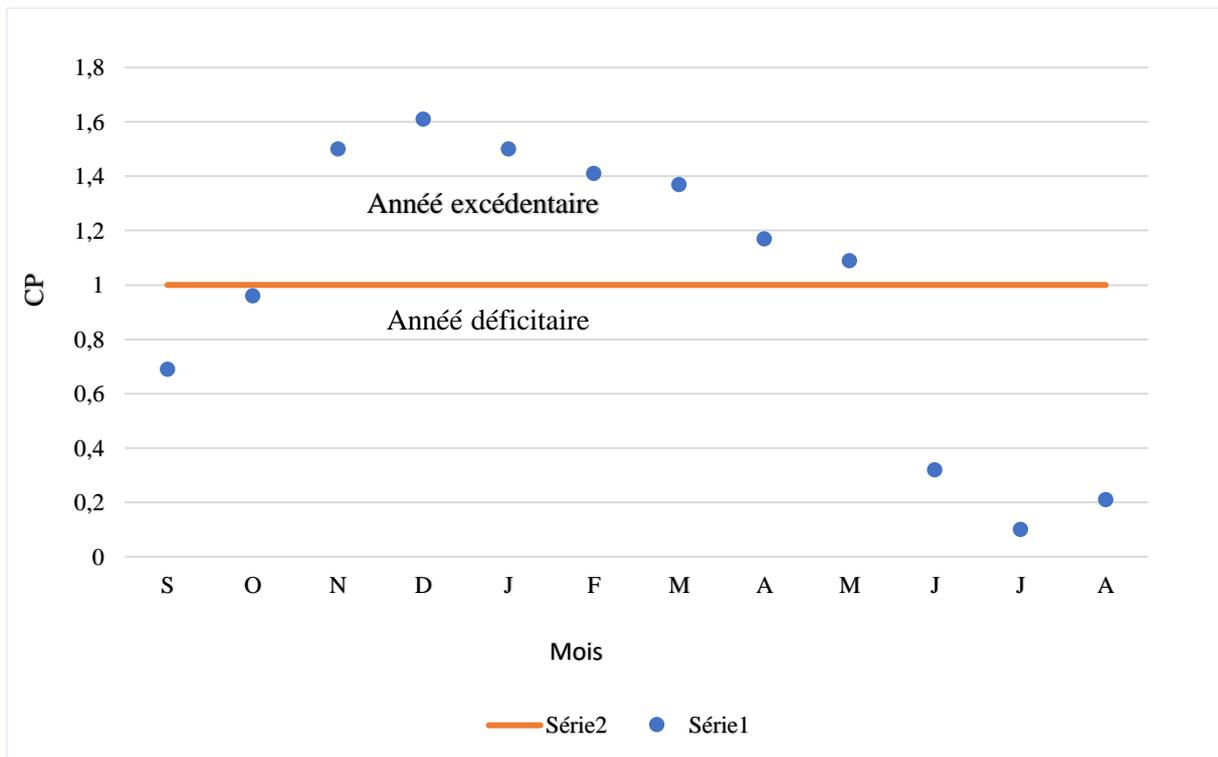


Figure 4.a: Coefficient pluviométrique relatif à la station de Guelma

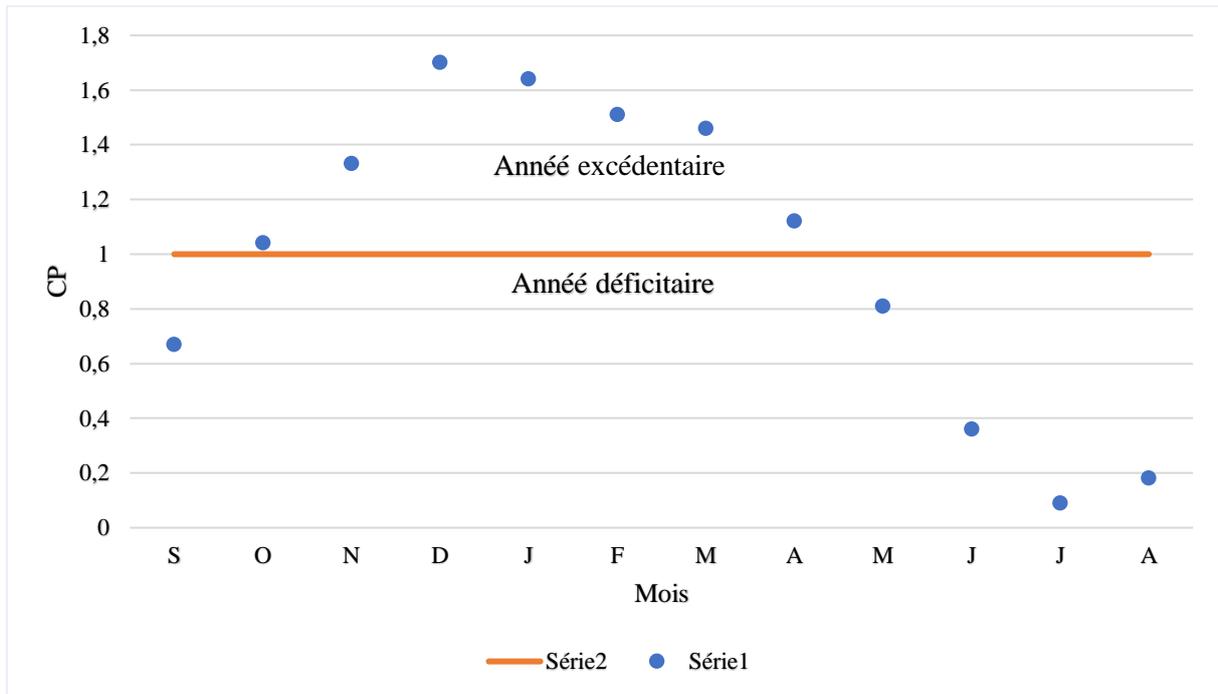


Figure 4.b : Coefficient pluviométrique relatif à la station de Hélio polis

2.10. Précipitations saisonnières

Selon la classification des précipitations saisonniers, nous constatons quelles sont de type HPAE. Avec surtout dominance des précipitations hivernales suivies de celles de printemps (Tableau 8).

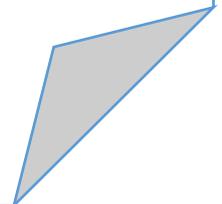
Tableau 8: Précipitation saisonnière

Station	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Observation
Guelma	145	208	167	30	HPAE
Hélio polis	149	237	167.32	31.72	HPAE

2.11. Conclusion

Le bilan hydrologique réalise montre une ETR de 423.6mm a Guelma et de 424.3mm a Hélio polis, un déficit d’écoulement de 492.6 mm à Guelma et de 491.90 mm à Hélio polis, un ruissèlement de 66.06mm a Guelma et de 79.49 mm à Hélio polis. Nous constatons que les précipitations sont HPAE

Chapitre 3 : Hydrogéologie



3.1. Géométrie des horizons

La coupe lithologique des forages ayant traversé toute la puissance aquifère jusqu'au substratum imperméable montre des niveaux de graviers, des alluvions fines reposant sur un substratum marneux à gypse ; avec parfois des passées argileuses, ce qui laisse à dire que cette séquence sédimentaire n'affecte pas la continuité hydraulique de la nappe late .

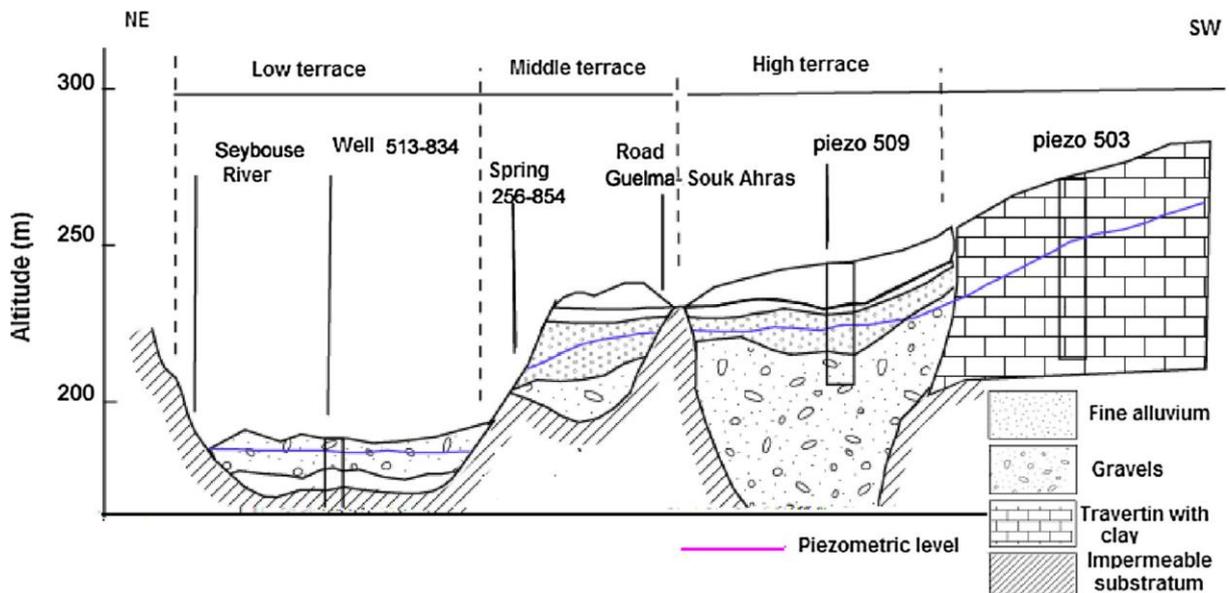


Figure 5: Coupe hydrogéologique de la nappe de Guelma

3.2. ETUDE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Le tableau ci-après (Tableau 10) donne les valeurs de la transmissivité, les épaisseurs mouillées et les perméabilités obtenues après l'interprétation des essais par pompages dans les forages exploitant la nappe Plio-quaternaire (DHW, 1997).

3.2.1. Les épaisseurs mouillées

Sont variables allant de 2 à 70 m. Les fortes épaisseurs mouillées proviennent des forages situés sur la haute terrasse.

3.2.2. Les transmissivités

Les valeurs des transmissivités vont de 0.23 à $5.50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ sans descendre de l'ordre de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les plus fortes valeurs proviennent de la basse terrasse où les épaisseurs mouillées sont faibles.

3.2.3. Les perméabilités

Les perméabilités varient entre 0.0110^{-5} et 3.410^{-4} m/s. La décroissance des transmissivités et perméabilités (K de l'ordre de 10^{-5} m/s) est influencée par la trame argileuse et les épaisseurs mouillées importantes.

Tableau 9 : Valeurs des transmissivités , épaisseur mouillée et perméabilités de la nappe alluviale

Code des points d'eau	X	Y	T 10^{-3} m ² /s	E (m)	K (m/s)
BA2	925.500	358.500	0.91	60	1.510^{-5}
BA3	929.300	360.400	1.10	53	210^{-5}
G1	930.300	360.4000	2.89	70	4.110^{-5}
G2	928.400	361.200	1.00	59	1.610^{-5}
G3	926.310	363.495	5.50	16	3.4310^{-4}
P36	940.150	368.600	1.50	4.30	3.4810^{-4}
G4	928.350	361.200	1.30	76.60	1.610^{-5}
P35	938.100	360.650	1.10	8.46	1.310^{-4}
F8	927.400	361.100	4.30	47	9.110^{-5}
BK1	926.250	360.500	0.97	51.44	1.810^{-5}
P7	939.500	360.500	0.51	7.9	6.410^{-5}
P56	921.500	363.500	0.70	9	7.710^{-5}
P42	931.50	363.500	0.23	2.5	9.210^{-5}

3.3. Piézométrie

Dans les années 1970 et jusqu'à la fin des années 1980, les puits de la région ont été creusés à la main, de grand diamètre et de faibles profondeurs, n'atteignant pas les 15 mètres. Ils capturaient alors, à peine la nappe superficielle, mais depuis les années 1990 les puits ressemblent beaucoup aux forages de moyenne profondeur, tubés jusqu'à la base et captant directement l'horizon pliocène et quaternaire.

3.3.1. Interprétation de la carte piézométrie

La connaissance des états piézométriques (figure 6) de la nappe a été obtenue à partir de l'inventaire des 75 puits existants et ce pendant la période du mois d'août 2003. L'allure des

cartes des différentes périodes établies par Nouar (1997) ; (Djabri. (1993) et Mouassa (2020), est identique, ce qui a permis de donner une interprétation à la piézométrie d'août 2003. La carte obtenue montre une structure complexe avec formation de dômes et de dépressions. Ces derniers seraient dus à l'apport externe, à l'alimentation ou à des prélèvements par la nappe profonde provoqués par les forages.

Par ailleurs les cartes montrent l'existence d'une ligne de partage des eaux séparant les écoulements vers l'Oued Skhoun et l'Oued Maiz, où ils seront différenciés. A l'Ouest, il est dirigé Sud-Nord et à l'est, il suit l'écoulement général de la Seybouse qui est sensiblement Ouest-Est. Quant au versant Nord, l'écoulement général est Nord -Sud et converge vers la Seybouse. Le changement brusque de la forme des courbes isopièzes serait probablement dû à l'importance de la perméabilité, à la section d'écoulement et à l'exploitation intense de la nappe dans d'autres. L'existence des concavités vers l'aval montre l'existence d'une zone d'alimentation et les concavités vers l'amont traduisent une zone de drainance.

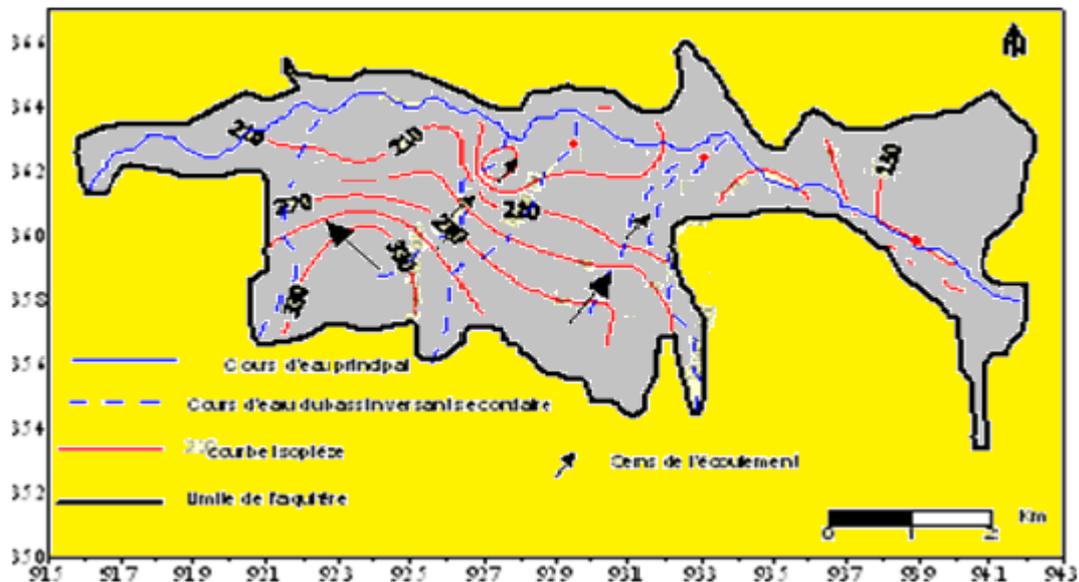


Figure 6: Carte piézométrique de la nappe alluviale de Guelma

3.3.2. Les conditions aux limites

Il en ressort de l'interprétation de la carte piézométrique les conditions aux limites suivantes :

3.3.2.1. Limites externes

- Limites étanches : ce sont les contacts entre les terrains aquifères et les marnes à gypse du miocène avec les argiles numidiennes.
- Limites de contact avec la molasse et grés du miocène : ces terrains sont peu perméables et drainés par l'oued Boussora et l'oued Marmora. Néanmoins, ils constituent une très faible zone d'alimentation
- Limites d'alimentation : Sont représentées par les contacts avec les grés numidiens. Les fortes variations de niveau dans les ouvrages situés à proximité des affleurements indiquent leur rôle de zone d'alimentation.

3.3.2.2. Sous limites internes

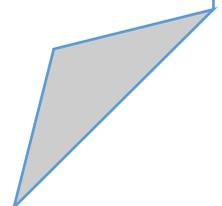
- Alimentation de la nappe des alluvions par les calcaires travertins et la molasse.
- Déversement de la nappe de haute terrasse en direction de l'Oued Boussora d'où l'apparition de plusieurs sources (Ain Zouaniz, Rosfa...) et déversement de la nappe sur le seuil marneux.

3. Conclusion

L'interprétation de la carte piézométrique, a permis de mettre en évidence que l'écoulement se fait du sud au nord. Par ailleurs, il faut signaler que les niveaux piézométriques sont faibles et par conséquent l'alimentation de la nappe se fait essentiellement par les précipitations et le retour des eaux d'irrigation.

Aussi, l'interprétation des essais par pompage réalisés sur les forages, a permis de déceler une même succession au niveau des transmissivités de l'ordre de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Ceci nous laisse penser que la nappe présente une même nature géologique.

Chapitre 3 : Matériels et méthodes



4.1. Introduction

Dans le but de procéder à une analyse physico-chimique des eaux de notre zone étude, 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 huit forages, puits et source permettant à la fois une étude de chaque point et leur comparaison sur la base de prélèvements simultanés.

4.2. 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.

4.3. 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 analyse puis remplir jusqu'au bord et la fermer. Les prélèvements doivent être scellés et munis d'une étiquette : la date, l'heure et le point de prélèvement.

4.4. 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 .

4.5. Analyses physico-chimiques

4.5.1. 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

4.5.2. 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.

4.5.3. 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 ;

-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.

4.5.4. 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 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.

4.6. 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^{3-}) ainsi que le titre alcalimétrique complet TAC et le titre hydrotimétrique TH.

4.6.1. 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.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 :

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

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

4.6.2. 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 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 pur pour les analyses: 0.286g
- Eau distillée.

2) Résultats

La lecture se fait directement sur l'écran.

4.7. 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.

1) 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.

2) Réactifs

-solution de chromate de potassium à 10%

-solution de nitrate d'argent N/10

- 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

Expression des résultats

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

4.8. Détermination des sulfates (SO₄²⁻)

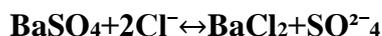
Les sulfates peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfates est l'oxydation des minerais de sulfates, la présence des schistes ou des déchets industriels.

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 Na_2SO_4

Peser 2.4 mg Na_2SO_4

1000ml d'eaux 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

-expression de résultat

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

$$\text{Mg/l SO}_4^{2-} = \text{La valeur lue sur le spectro} \times \text{la dilution}$$

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 :

$$(HCO_3) \text{ mg/l} = V2 \times 61 \text{ volume échantillon} \times N/1000$$

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.

4.9. 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.....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 anhydre..... 0.722g

-Eau distillée.....1000ml

-Chloroforme..... 1ml

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

Appareillage : Etuve ; spectrophotomètre H.V visible

C) Mode opératoire

Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser ;

Ajouter 02 à 03 gouttes de NaOH à30% ;

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

4.10. 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)-éthylènediamine-dichlorohydraté un colorant azoïque rouge. $\lambda_{\text{Max}} = 543\text{nm}$

b) Réactifs

- Solution de nettoyage

Solution d'acide chlorhydrique ($d = 1.12\text{g} = 25\%$)

- 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)-éthylènediamine-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 à ? au frigo.

- **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 250 ml.

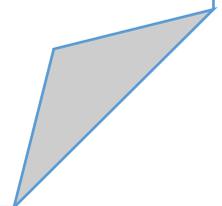
➤ **Solution standard de 100 mg/l**

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

4.11. 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 5 : Hydrochimie



5.1. Introduction

Dans cette partie, nous avons réalisé des analyses physico-chimiques qui ont trait aux eaux souterraines (forages, puits et sources) éparpillés sur le bassin de Guelma. Les prélèvements des eaux souterraines ont été réalisés sur le réseau de surveillance en Mars 2021 (24 échantillons provenant de forages, puits et sources nappe). Le dosage des échantillons prélevés sur les forages, puits et sources proches de Guelma, a été réalisé par à l'ANRH Constantine. La Figure 7 visualise la position géographique des points de prélèvement.

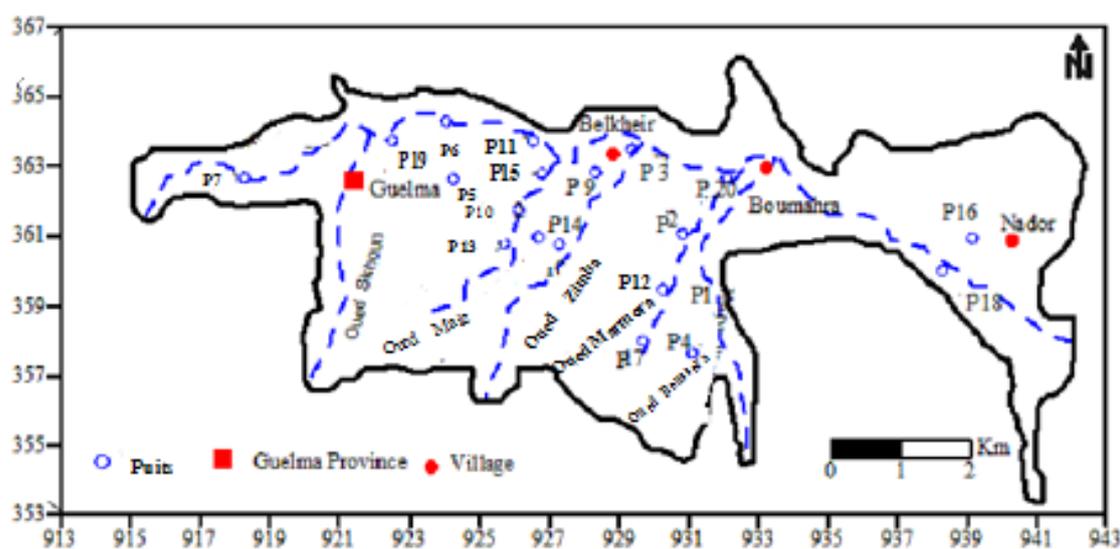


Figure 7: Situation géographique des points de prélèvement

5.2. Hydrochimie des eaux souterraines

Les Paramètres physico-chimiques, y compris le minimum, maximum, la moyenne et l'écart type, sont rapportés dans le Tableau 10. L'abondance des ions majeurs dans les eaux souterraines est dans l'ordre suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ (Figure 8). Le calcium varie entre 70 et 258 mg/L. La teneur en Magnésium oscille entre 4 et 49 mg/L avec une moyenne de 25 ± 11.34 . Le Sodium varie entre 32 et 222 mg/L avec une moyenne de 82.37 ± 39.78 mg/L. Le Potassium présente un minimum de 0 à 25 mg/L avec une moyenne de 7.91 ± 7.51 mg/L. Le Bicarbonate vacille entre 116 et 354 mg/L avec une moyenne de 223.66 ± 82.51 mg/L. Le Chlorure varie entre 70 et 348 mg/L avec une moyenne de 159.87 ± 79.45 mg/L. Le Sulfate balancer entre 10 et 310 mg/L avec une moyenne de

109.20±78.64 mg/L .le Nitrate oscille entre 23 et 110 mg/L avec une moyenne de 55.41 ±22.67 mg/L .

Tableau 10: Statistique descriptive

Paramètre	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart type
TDS	773.04	445	1418	216.23
pH	7.48	7	7.90	0.20
CE	1136.20	668	1981	318.01
Ca ²⁺	109.83	70	258	36.20
Mg ²⁺	25.58	4	49	11.34
Na ⁺	82.37	32	222	39.78
K ⁺	7.91	0	25	7.51
HCO ₃ ⁻	223.66	116	354	82.51
Cl ⁻	159.87	70	348	79.45
SO ₄ ²⁻	109.20	10	310	78.64
NO ₃ ⁻	55.41	23	110	22.67

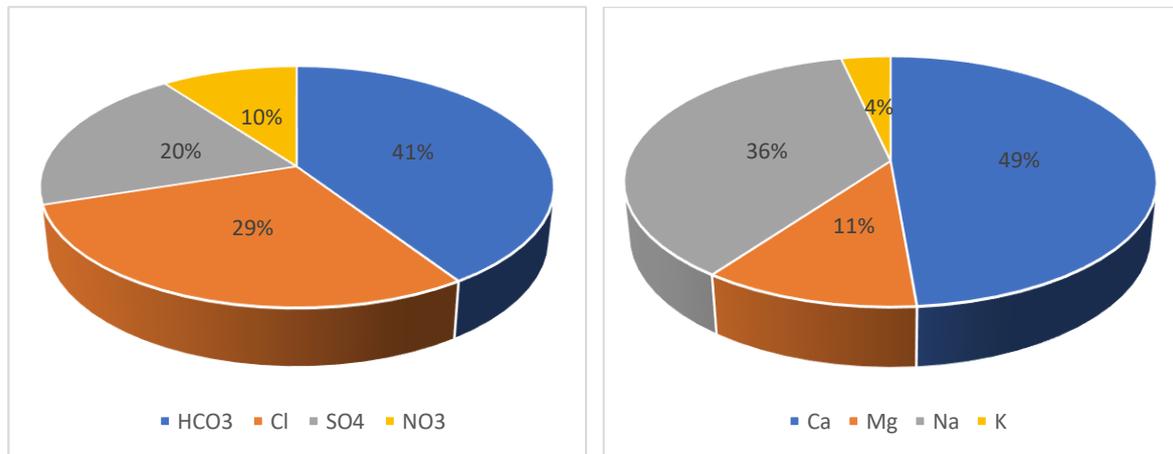


Figure 8: Répartition des anions et cations (%)

5.3. Facies hydrochimique

5.3.1. Diagramme de Chaddah

Les échantillons d'eau souterraine de la nappe alluviale de Guelma, ont été projetés sur le graphique en tant que cations par rapport aux anions exprimés en pourcentage milliéquivalent sur la forme modifiée du diagramme trilinéaire de Piper proposé par Chadha (1999). Huit types d'eau qui peuvent être identifiés à partir du diagramme dépendent de la relation entre les

alcalino-terreux (calcium et magnésium), les métaux alcalins (sodium et potassium), les anions acides faibles (carbonate et bicarbonate) et les anions acides forts (chlorure et sulfate).

La majorité des échantillons sont projetés dans le 6^{ème} cadran, représentant le type $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$, où $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ et $(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}) > (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-)$, ce type d'eau est généralement caractérisé par une dureté permanente. Alors qu'un échantillon sont tracés dans le 7^{ème} cadran, représentant le type $\text{Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}\text{-Na}^+\text{-Mg}^{2+}$, où le sodium et le chlorure sont dominants et montrant une probable dissolution de marne à gypse dans cette zone, où $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ et $(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}) > (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-)$, un tel type d'eau crée généralement des problèmes de salinité. Cinq échantillons sont projetés dans la zone 5 représentant un faciès $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^- + \text{CO}_3$ ou $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^- + \text{CO}_3$ (Figure 9).

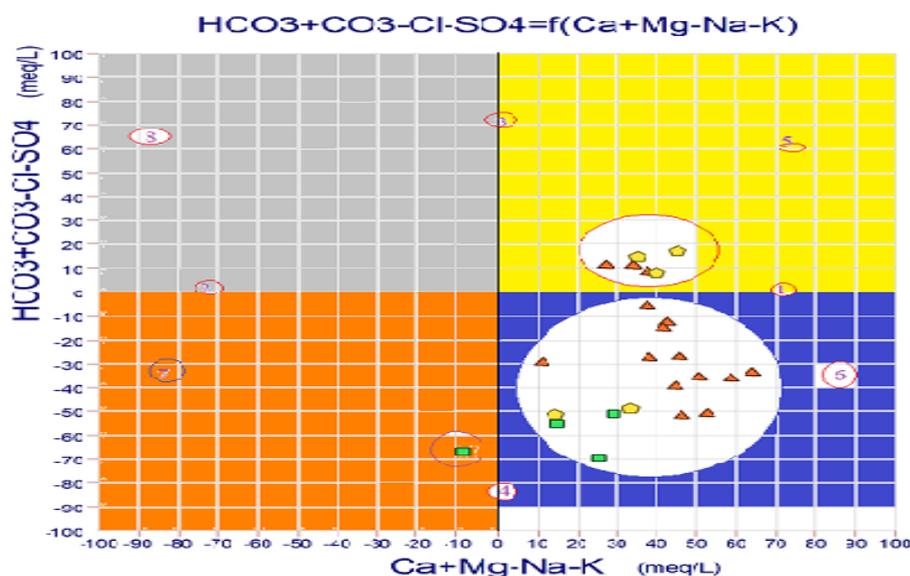


Figure 9: Diagramme de Chadah

5.3.2. Diagramme de Piper

Le diagramme trinéaire de Piper (Piper 1944) est utile pour apporter sur les relations chimiques entre l'eau en termes plus définis. Les ions majeurs sont représentés sous forme de cations et d'anions en pourcentages de milliéquivalents dans deux triangles de base. La lecture des faciès se fait dans le losange. Il en ressort de ce diagramme (Figure 10) les faciès suivants :

- Faciès bicarbonate calcique
- Faciès chloruré sodique

-Facies mixte $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$

-Facies $\text{Ca}^{2+}-\text{Cl}^-$

L'existence de ces 4 facies sont intimement à la nature géologique des terrains, à l'altération des argiles ou au temps de résidence de l'eau dans l'aquifère.

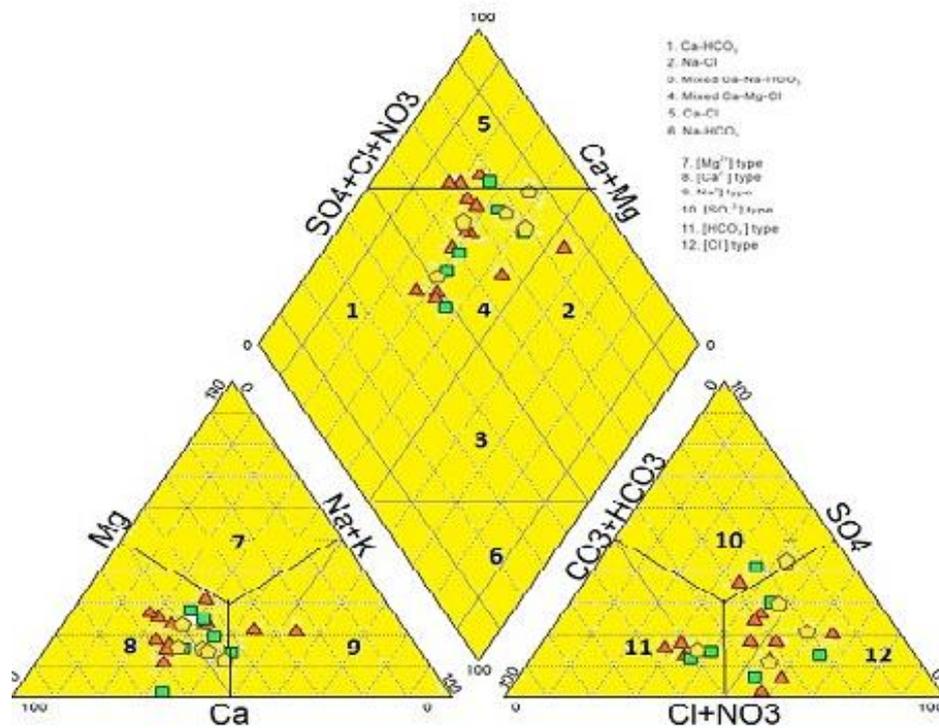


Figure 10: Diagramme de Piper

5.4. Mécanisme contrôlant le chimisme de l'eau :

Les caractéristiques chimiques des eaux souterraines dépendent de divers processus physico-chimiques tels que la dissolution, la précipitation, l'échange d'ions, l'oxydation et la réduction se manifestent pendant l'interaction eau-roche. De cette façon, l'utilisation des diagrammes géochimiques permet d'approcher la nature de sa composition chimique.

Selon Van Wirdum (1980), l'eau est classée comme atmosphérique (At) si elle provient principalement des précipitations pluviales, elle sera Lithotrophe (Li) si sa composition est liée aux roches de l'aquifère et Thalassotrophe (Ta) si elle correspond aux eaux d'origine marine. Les échantillons analysés, une classification atmosphérique-lithotrophique est envisagée (Figure 11), où l'eau provenant de la pluie interagit avec les roches en les dissolvant et en incorporant une partie de leurs ions dans l'aquifère.

La classification des échantillons à l'aide des diagrammes de Gibbs (1970) indique que l'un des principaux facteurs influençant le chimisme de l'eau est l'interaction roche-eau (Figure 12), validant les observations faites à l'aide de la classification de van Wirdum.

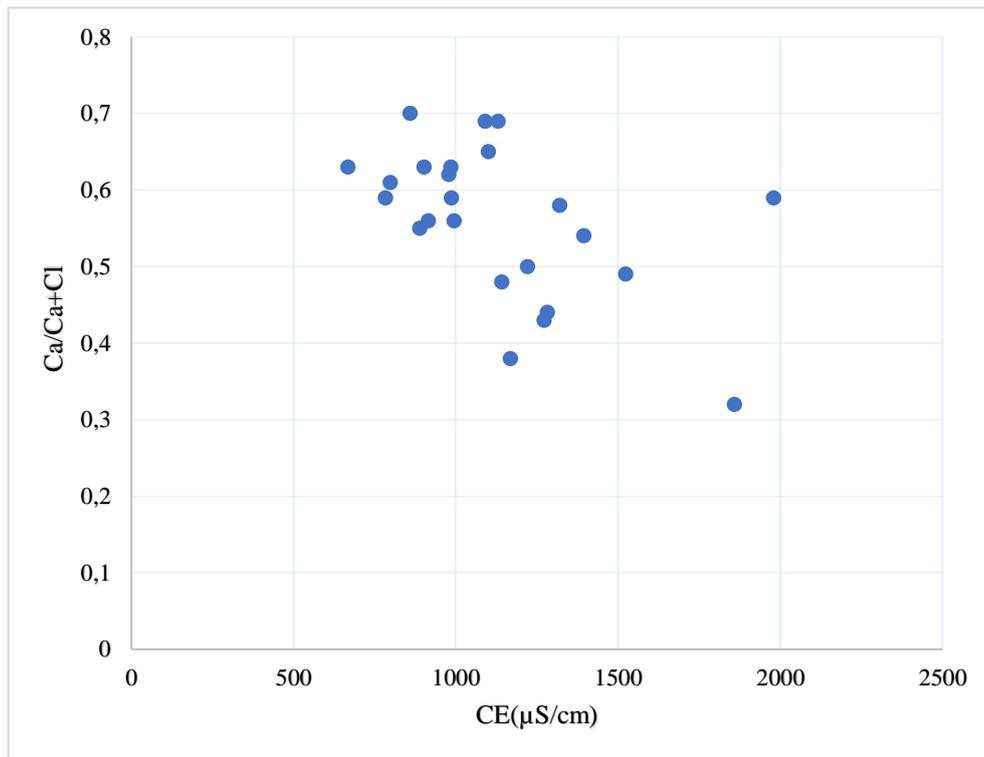
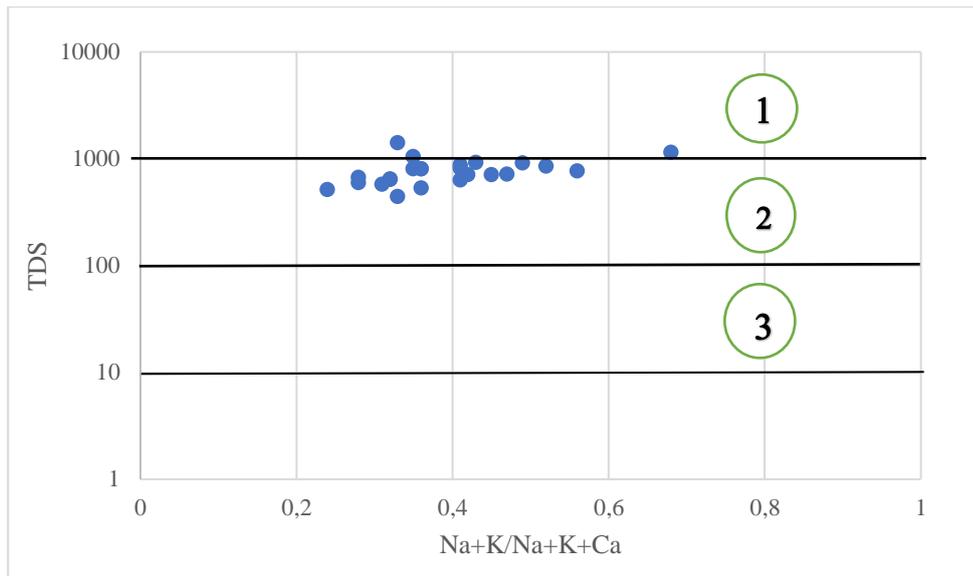


Figure 11: Diagramme de Van Wirdum (1980).



- 1- Evaporation et précipitation 2- Dominance de la dissolution des roches 3- Dominance de la précipitation

Figure 12: Diagramme de Gibbs (1970).

5.5. Indice de saturation

Comme mentionné ci-dessus, la chimie des échantillons d'eau est définie par l'interaction eau-roche, donc l'indice de saturation pour différents minéraux qui pourraient participer à l'enrichissement de certains composants de l'eau a été évalué.

L'indice de saturation (IS) a été calculé à partir des produits de l'activités des ions en solution et des constantes du produit de solubilité (Kps) pour l'anhydrite (CaSO_4), la calcite (CaCO_3), la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), et gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et l'halite (NaCl).

$$\text{IS} = \log \text{PAI} / \text{Kps}$$

Les indices de saturation ont été calculé à l'aide du PHREEQC (Parkhurst et al., 1999)

Une valeur IS négative indique que le système n'est pas saturé par rapport à une phase proposée ; est positif lorsque le système est sursaturé et acquiert la valeur de zéro lorsque l'aquifère est à l'équilibre avec une phase cristalline particulière (Drever, 2002).

Selon les valeurs IS calculées pour les échantillons d'eau (Tableau 11), des valeurs positives ont été observées pour la calcite et la dolomite, ce qui indique qu'elles sont sursaturées avec ces phases d'où un appauvrissement en Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Les indices de saturation sont sous-saturés en gypse et anhydrite ce qui impliquent l'enrichissement de l'eau en sulfates.

La PCO_2 calculée varie entre 0.17 et 2.8810^{-2} pour une valeur moyenne de 1.09×10^{-1} atm. Cette valeur de 7.80×10^{-4} est la seule valeur inférieure à $10^{-3.5}$ atm. (Pression du CO_2 atmosphérique). Une forte intervention du CO_2 d'origine biogénique existe et c'est cette pression qui devrait être à l'origine de la minéralisation. En général, toutes les pressions de CO_2 équilibrantes calculées dans les eaux souterraines sont supérieures à celle du CO_2 atmosphérique ($10^{-3.5}$ atm.). La minéralisation en carbone se fait en système ouvert.

Tableau 11: Indice de saturation et PCO_2

Identifiant	Anhydrite	Calcite	Dolomite	Gypse	PCO_2 (10^{-2}) atm
P1	-2.06	0.17	0.27	-1.84	0.93
P2	-2.79	0.54	1.10	-2.57	0.96
P3	-1.64	0.02	-0.33	-1.42	0.49
P4	-1.66	0.29	0.38	-1.44	0.50
P5	-1.91	-0.02	-0.26	-1.69	0.75
P6	-1.77	-0.37	-1.20	-1.55	0.75
P7	-1.68	0.26	0.58	-1.46	0.36
P8	-1.84	-0.08	-0.35	-1.62	0.73
P9	-2.14	0.50	0.59	-1.92	0.81
P10	-1.92	0.28	0.16	-1.70	1.55
P11	-1.80	0.55	0.94	-1.58	1.15
P12	-1.84	-0.21	-1.04	-1.62	2.16
P13	-2.02	0.45	0.75	-1.80	1.01
P14	-2.03	0.53	0.82	-1.81	0.81
P15	-2.41	0.16	-0.08	-2.19	0.67
P16	-1.90	0.50	0.89	-1.68	0.92
P17	-1.37	0.05	-0.25	-1.15	0.88
P18	-1.05	0.90	0.34	-0.83	0.76
P19	-1.85	0.15	0.21	-1.64	0.68
P20	-1.79	0.95	1.51	-1.57	0.43
P21	-1.65	0.16	-0.06	-1.43	0.35
P22	-1.75	0.22	0.24	-1.53	2.88
P23	-1.28	0.47	0.55	-1.06	0.17
P24	-1.73	0.16	-0.13	-1.51	0.40

5.6. Destination de l'eau

La destination de l'eau pour l'usage domestique, agricole et industrielle est régie par les normes et dépend des conditions physico-chimiques des eaux rencontrées dans la nappe du bassin de Guelma.

5.6.1. Alimentation en eau potable et domestique

La destination de l'eau à l'usage domestique est discutée selon la dureté, la conductivité électrique, TDS et les cations et anions.

5.6.2. La dureté

Elle est exprimée par le titre hydrotimétrique (TH). Elle a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$TH \text{ (mg/L)} = 50 * (Mg^{2+} + Ca^{2+})$$

Ca²⁺ et Mg²⁺ sont exprimées en méq/l

En général les eaux du bassin de de Guelma présente un TH compris entre 220.50 et 450 mg/L avec une moyenne de 381.12 mg/L. En comparaison avec la classification de Sawyer and McCarthy (1967), les eaux de la nappe de Guelma présentent des eaux dure à fortement dures. Pour diminuer la dureté, un traitement spécifique est nécessaire

Tableau 12: Classification de la dureté de l'eau selon Sawyer and McCarthy (1967)

Dureté (mg/L)	Classification	Point de prélèvement
>75	Excellente	-
75-150	Modérément élevée	-
150-300	Dure	P6, P12, P15
>300	Très dure	Le reste des points

5.6.3. Classification selon l'O.M.S :

Le tableau ci-dessous (Tableau13) a permis de confronter nos résultats avec les normes de l'O.M.S (2017). Il en ressort de cette comparaison que les eaux de certains points de prélèvement sont inaptes à la potabilité et usage domestique.

En général les plus fortes valeurs de nitrates se remarquent dans la zone où la nappe est peu protégée (les teneurs dépassant les 50 mg/L). Les concentrations moyennes identifient la région de moyenne couverture ou semi-captive (teneur proche de 50 mg/L) et de faibles concentrations se trouvent dans la zone où la nappe est plus ou moins protégée .

Tableau 13 : Comparaison des éléments physico-chimique avec les Normes de L'O.M.S (2017)

Qualité	TDS	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
OMS 2017	1000	6.5 – 8.5	500 – 700	200	150	200	30	200 – 250	250	50
Points d'eau	Toute les analyses sont inférieures a 1000mg/L	Selon le pH les eaux sont aptes à la potabilité	Eau polluée		Bonne pour la potabilité	Bonne pour la potabilité	Bone pour la potabilité	Les autres sont apte a la potabilité	Non polluée	P1, P3, P5, P6, P8 , P9, P10,P13,P14 ,P21et P24
	>1000, P7,P18 et P22 ; eau polluée			>200, P18 Pollué		P7		>250 , P7, P18, P19 et P22	>250 P17, P18 et P23	Reste pollué

5.7. Aptitude à l'irrigation :

L'utilisation des eaux de la nappe à l'irrigation exige certaines conditions :

- Pas de risque de sodicité .
- Pas d'influence sur la perméabilité du sol par le sodium, bicarbonates.

5.7.1. Classification de Wilcox :

La classification de Wilcox est basée sur la combinaison du pourcentage de sodium et de la conductivité électrique. Ce diagramme fait sortir cinq classes : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise (Figure13). Le pourcentage de sodium est donné par la relation suivante :

$$\% \text{Na}^+ = \frac{\text{Na}}{\text{Na}+\text{Ca}+\text{Mg}} \cdot 100$$

Il en ressort de ce diagramme que la majorité des eaux de la nappe sont aptes à l'irrigation à l'exception du Point de prélèvement qui présentent une salinité excessive.

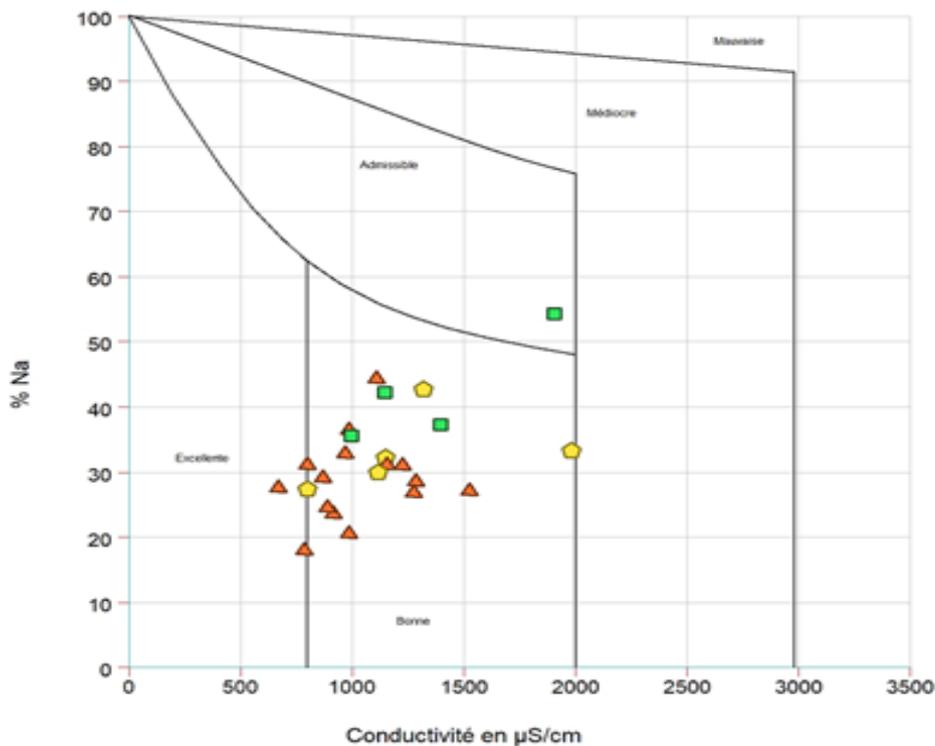


Figure 13: Diagramme de Wilcox

5.7.2. Diagramme de Richards :

Le sodium est le cation le plus étudié, car il présente un effet toxique sur le sol et il est bien connu qu'il réagit sur la texture du sol. Des concentrations élevées en sodium disperse des colloïdes sur le sol causant au sol un effet de dureté et résistant à la diffusion de l'eau. La pression osmotique du sol permet de causer des complications dans l'eau d'être absorbé par les racines des plantes (Richards, 1954). Le SAR est exprimé par la formule suivante :

$$SAR = Na^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+}/2)^{1/2}$$

Où les valeurs de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} sont en meq/L.

Les valeurs du SAR varient de 0.77 to 5.12 méq/L avec une moyenne de 1.95 méq/L. Tous les échantillons sont aptes à l'irrigation (Tableau14).

Les valeurs des conductivités électriques et valeurs du SAR sont projetés sur le diagramme de Richards (1954), montre la classification des eaux selon la méthode du SAR (Figure14). Selon ce diagramme les eaux de la nappe de Guelma appartiennent la catégorie C3S1 (Salinité importante et faible alcalinité) et C3S2 (Salinité importante et alcalinité moyenne). En général ces eaux peuvent être utilisées en irrigation avec certaines restrictions pour le deuxième cas.

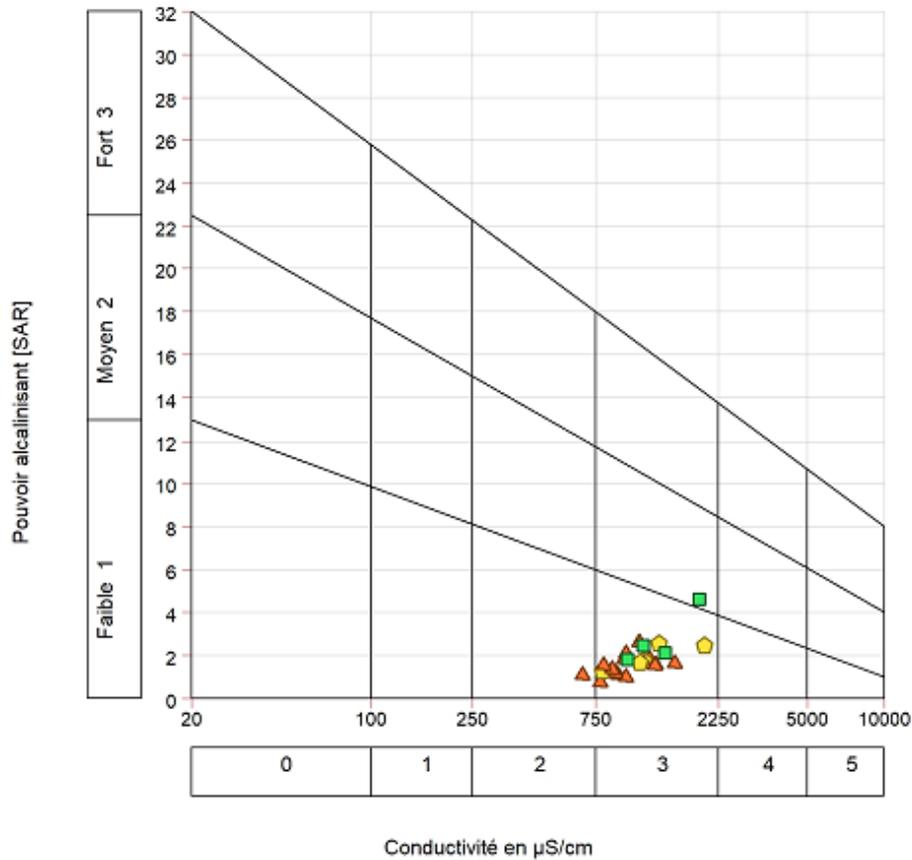


Figure 14: Classification des eaux d’irrigation selon le diagramme de Richards

Tableau 14: Valeurs du SAR et CE

IDENTIFIANT	SAR (méq/L)	CE(μ s/cm)
P1	2.60	1170
P2	1.80	1284
P3	1.12	916
P4	1.00	987
P5	1.20	890
P6	1.13	668
P7	5.12	1860
P8	0.77	784
P9	1.86	1223
P10	1.42	860
P11	2.05	1131
P12	1.41	904
P13	1.85	980
P14	2.12	986
P15	1.55	800
P16	1.86	1101
P17	3.00	1321
P18	2.61	1981
P19	1.52	1273
P20	1.77	1092
P21	2.10	996
P22	1.81	1524
P23	2.55	1395
P24	2.75	1143

5.8. Etude statistique multivariée :

5.8.1. Matrice de corrélation :

La matrice de corrélation est utilisée pour mettre en évidence la relation entre les ions deux à deux par le biais du coefficient de Pearson r . Le tableau récapitule les différentes liaisons entre paramètres. Sur 24 échantillons et 11 individus que la matrice de corrélation a été établie. Le coefficient de corrélation r a un intervalle de -1 et $+1$ et testé à un niveau de $p < 0.05$ (Tableau 15). Généralement, les valeurs du coefficient de corrélation montrent des liaisons fortes, des liaisons faibles et des relations intermédiaires.

Le calcium est bien corrélé avec TDS ($r = 0.78$) ; avec la CE ($r = 0.69$) ; et avec SO_4^{2-} ($r = 0.53$) et avec les chlorures ($r = 0.51$). Le sodium est fortement lié au TDS et CE Cl^- et K^+ avec des valeurs de $r = 0.69$; 0.86 ; 0.73 et 0.63 respectivement. Le potassium est modérément corrélé avec la conductivité ($r = 0.53$) ; $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ ($r = 0.61$) et Avec SO_4^{2-} ($r = 0.55$).

Tableau 15: Matrice de corrélation

	TDS	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
TDS	1.00	0.34	0.97	0.78	0.24	0.79	0.48	0.43	0.76	0.56	0.41
pH	0.34	1.00	0.35	0.23	0.11	0.41	0.31	0.08	0.18	0.29	0.04
CE	0.97	0.35	1.00	0.69	0.30	0.86	0.53	0.26	0.87	0.56	0.37
Ca^{2+}	0.78	0.24	0.70	1.00	-0.23	0.37	0.10	0.39	0.51	0.53	0.22
Mg^{2+}	0.25	0.12	0.30	-0.23	1.00	0.29	0.22	0.28	0.39	-0.30	0.27
Na^+	0.80	0.41	0.86	0.37	0.29	1.00	0.61	0.13	0.73	0.44	0.30
K^+	0.48	0.31	0.53	0.10	0.22	0.61	1.00	-0.12	0.38	0.55	0.14
HCO_3^-	0.43	0.08	0.26	0.39	0.28	0.13	-0.12	1.00	0.03	-0.26	0.24
Cl^-	0.76	0.18	0.87	0.51	0.39	0.73	0.38	0.03	1.00	0.30	0.18
SO_4^{2-}	0.56	0.29	0.56	0.53	-0.30	0.44	0.55	-0.26	0.30	1.00	0.10
NO_3^-	0.41	0.04	0.37	0.22	0.27	0.30	0.14	0.24	0.18	0.10	1.00

5.8.2. Analyse en composante principale (ACP)

Une méthode d'analyse de données multivariée utilisée pour révéler des modèles dans de grands ensembles de données. L'ACP transforme les données en un nouvel ensemble de coordonnées ou de variables appelées composantes principales. Les composantes principales ne sont pas corrélées (c'est-à-dire orthogonales les unes aux autres) et sont des combinaisons linéaires des variables originales (Winter et al., 2000). L'ACP calcule une matrice de corrélation des données d'origine. Cette matrice est utilisée pour calculer les vecteurs propres et les valeurs

propres. La mise à l'échelle des vecteurs propres pour obtenir une longueur unitaire donne les composantes principales et les scores des composantes principales de chaque échantillon sont calculés en projetant les données originales sur les axes principaux (Chen et al., 2007). Les scores des composantes principales peuvent donner des informations sur la distribution des modèles parmi les échantillons. Les éléments des vecteurs propres sont appelés chargements en composantes principales qui peuvent fournir des informations sur la contribution des variables à la distribution des échantillons (Tableau 16).

Tableau 16: Inertie des 3 composantes principales

Axe	Valeurs propres correspondantes	Inertie expliquées	Pourcentage cumulé
1	5.20	47.24	47,24
2	1.70	15.49	62.73
3	1.38	12.50	75.23

5.8.2.1. Contribution des variables au premier facteur :

La répartition dans le plan I-II (Figure15), le facteur I exprime 47.24 % de la variance totale. L'axe F1 est porté par TDS, CE, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- et SO_4^{2-} , et qui lui sont bien corrélés Ce premier axe exprime probablement l'acquisition de la minéralisation.

5.8.2.2. Contribution des variables au deuxième facteur :

Le facteur II, avec une 15.49 % de la variance totale, oppose Mg^{2+} , HCO_3^- aux sulfates SO_4^{2-} . Ce facteur semble traduire l'origine des éléments cités. Dissolution des carbonates, altération des argiles et marnes à gypse.

5.8.2.3. Contribution des variables au Troisième facteur :

Le facteur 3 représente 12.5% de l'inertie totale, il porte dans sa partie négative Ca^{2+} et HCO_3^- et ne s'oppose à aucun élément. Cet axe qui apparait difficilement interprétable, singularise néanmoins le comportement de ces deux éléments vis-à-vis du chimisme de la nappe(Figure 16).

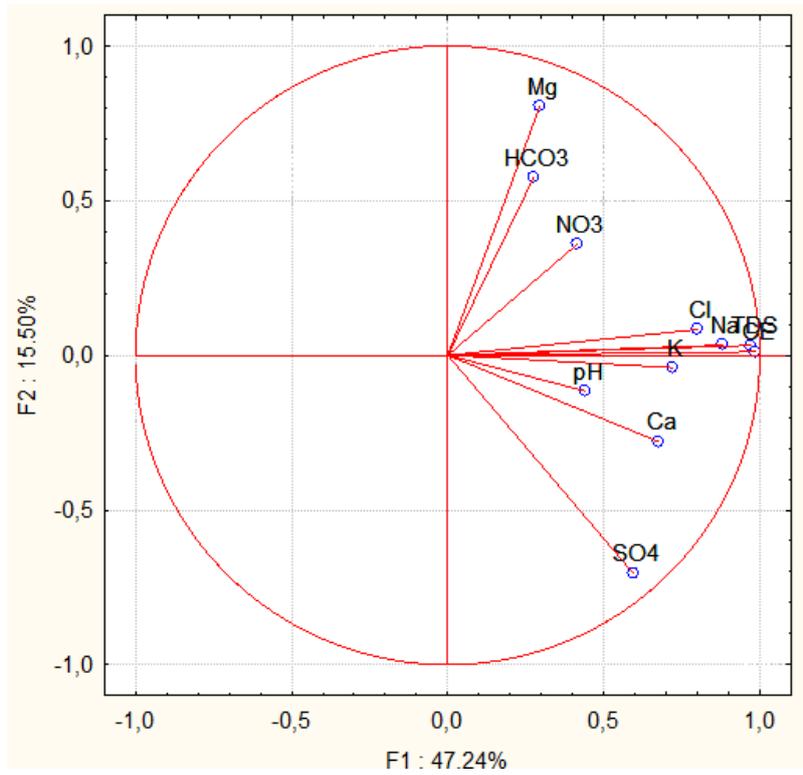


Figure 15: ACP des points de prélèvement selon F1xF2

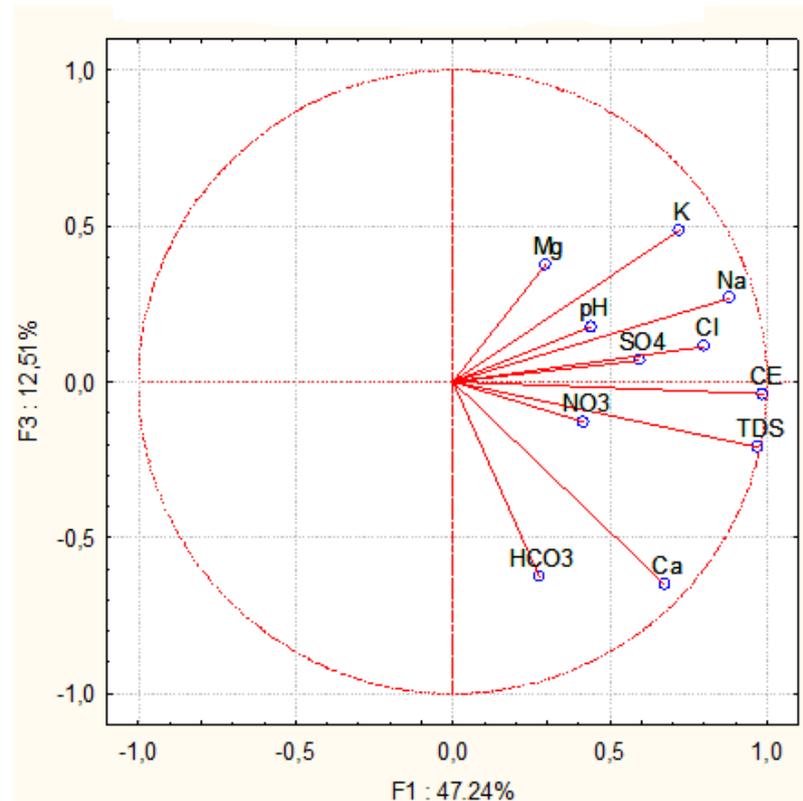


Figure 16: ACP des points de prélèvement F1xF3

5.9. Indice de contamination

A partir des éléments chimiques Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- , on peut déterminer un indice de rang de contamination. La manière est de répartir les teneurs des éléments choisis en fonction de leur degré de liaison en classe (Chauve et al., 1982 ; Kherici 1993) selon la relation suivante :

$$\text{IC} = \Sigma (\text{Na}^+ + \text{K}^+) + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$$

En admettant des intervalles de classes en mg/L pour chaque élément et en les additionnant, on peut repérer l'indice de contamination (Tableau 17). Plus cet indice est élevé plus le point d'eau est pollué. Il en ressort du calcul de cet indice que les eaux en provenance des points de prélèvement (P12, P16, P7, P4, P11, P15, P22, P19, P17 et P18) sont les plus contaminés. Ces points sont situés sur la nappe libre et par conséquent ont une mauvaise perméabilité de couverture.

Tableau 17: Intervalle de classe

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ions										
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000	-	-	-	-	-
SO_4^{2-}	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000	-	-	-	-	-
Cl^-	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000	-	-	-	-	-
NO_3^-	<15	15-30	30-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-110

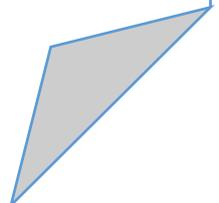
Tableau 18: Indices de contamination des points de prélèvement

Puits	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	IC
P1	1	1	1	3	6
P2	1	1	1	5	8
P3	1	1	1	3	6
P4	1	1	1	7	10
P5	1	1	1	4	7
P6	1	1	1	2	5
P7	1	1	2	8	12
P8	1	1	1	3	6
P9	1	1	1	4	7
P10	1	1	1	3	6
P11	1	1	1	7	10
P12	1	1	1	10	13
P13	1	1	1	3	6
P14	1	1	1	4	7
P15	1	1	1	7	10
P16	1	1	1	11	14
P17	1	2	1	7	11
P18	1	2	2	6	11
P19	1	1	2	7	11
P20	1	1	1	7	10
P21	1	1	1	3	6
P22	1	1	2	6	10
P23	1	2	1	5	9
P24	1	1	1	4	7

5.10. Conclusion

Il en ressort du calcul de l'indice de contamination que les eaux issues de la nappe libre sont les plus contaminées. Selon la classification de Wilcox et Richards , les eaux du bassin de Guelma sont aptes à l'irrigation avec certaines restrictions pour le dernier.

Conclusion générale



Conclusion générale

La région de Guelma est située au Nord-est de l'Algérie orientale. Cette région est connue par des potentialités hydriques importantes caractérisées surtout par les eaux souterraines et de surface. Les eaux souterraines proviennent des forages, puits et sources qui sont captés pour satisfaire la demande en eau de la ville de Guelma et les villages de la région où jadis l'eau était de qualité rurale. En effet, le développement agricole, industriel, urbain et les constructions anarchiques avec des rejets non assainis font que les eaux souterraines et les eaux de surface situées aux alentours de Guelma sont dégradées en qualité. D'un point de vue géologique, la région de Guelma est considérée comme un bassin subsidiaire à remplissage détritique du plio-quaternaire reposant sur un substratum miocène constitué par des argiles et marnes à gypses où parfois le soufre s'intercale. La géométrie du réservoir plio-quaternaire tient même du mode de dépôts des sédiments détritiques qui dépassent 200 m d'épaisseur au centre de la dépression. L'organisation de ces dépôts en séquences sédimentaires et même en cycle, favorise l'existence de niveaux préférentiels d'écoulements communicants au sein d'une matrice argileuse. Ce système aquifère libre à semi-captif constitue une même unité hydrogéologique (homogène en grand). La nature du sol à deux principaux aspects; i) une texture grossière (blocs de différentes tailles) près des bordures des oueds et des massifs polygéniques, et ii) une texture plus ou moins fine constituée par des argiles, graviers, sables au centre, du gypse et sels au Nord de Guelma et s'étend jusqu'à l'ouest de Belkheir. Ce bassin ayant comme bordure les calcaires crétacés ultra-telliens et de grès numidiens au Nord, tandis que la limite Sud Est constituée par les calcaires crétacés du Néritique et des grès numidiens du massif de la Mahouna.

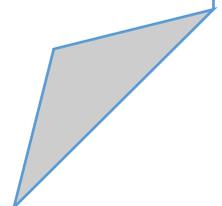
D'un point de vue hydrogéologique le réservoir est caractérisés par des galets et graviers, graviers et sables, graviers et argiles plastiques rouges à jaunes, ont un comportement aquifère. L'alimentation de l'aquifère est régie principalement par les précipitations, l'infiltration des eaux d'irrigation et par alimentation occulte à partir des bordures calcaires fissurées. L'exutoire de l'aquifère s'effectue par prélèvement dans les captages pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau de la ville de Guelma et des villages limitrophes, par évaporation, par écoulement souterrain vers les oueds et par déversement sur les marnes en donnant

naissance à plusieurs sources. L'écoulement souterrain se fait en général du sud vers le nord et suit sensiblement la direction de l'écoulement général de l'oued Seybouse.

Du point de vue hydrochimique, la minéralisation est caractérisée surtout par les chlorures, sulfates, calcium et magnésium pour les forages, puits et sources situées au centre du bassin. Les valeurs obtenues de l'indice de saturation pour la calcite, la dolomite et le gypse ainsi que la pression partielle de CO_2 , montrent que les eaux du bassin de Guelma sont sursaturées en calcite, dolomite ce qui leur donne un appauvrissement en calcium et magnésium dans la majorité des cas. En revanche les indices de saturation pour le gypse sont sous saturées en gypse et anhydrite, ce qui se traduit par un enrichissement en magnésium, sulfate et calcium.

En somme les eaux du bassin de Guelma sont surtout polluées par les nitrates. Cette pollution est la conséquence d'épandage des engrais et les rejets les plus variés et atteignent les eaux souterraines par le biais des eaux d'irrigation du périmètre.

Reference bibliographique



Reference bibliographique

Chadha D.K. (1999). *A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. Hydrogeol. J., 7: 431-439.*

Chauve et al. (1989). *Qualité physico-chimique des eaux de la nappe alluviale de Franche - Comté . Laboratoire de géologie structurale et appliquée 206 p.*

Chen, K., Jiao, J.J., Huang, J., Huang, R. (2007). *Multivariate statistical evaluation of trace elements in groundwater in a coastal area in Shenzhen, China. Environ. Pollut. 147, 771–780.*

Djabri L. (1993). *Etude des caractéristiques d'une nappe côtière de l'Est algérien (cas de la nappe alluviale de Guelma-Boucheougouf-Annaba)-revue hidrogéologia n°10, PP13-29.*

Drever J.I. (2002). *The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments. 3rd Ed. Prentice- Hall, p. 24-26.*

Doneen L.D. (1962). *The influence of crop and soil on percolating water. Proc 1961 Biennial conference on Groundwater Recharge, p. 156-163.*

Gibbs R.J. (1970). *Mechanism controlling world water chemistry. Science, 170 (3962): 1088-1090.*

Kherici N. (1993). *Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines d'un système superposés en milieu industriel et agricole (Annaba-La Mafragh) Nord-Est Algérien. These de doctorat d'Etat – univ. Annaba 170 pages.*

Mouassa (2020)

Nouar T. (1997).

Parkhurst D.L., Appelo, C.A.J. (2013). *User's guide to PHREEQC (ver. 2): A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water Resources Investigation Report, 99, 4259.*

Richards L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Agriculture, Vol. 160. Handbook 60. Washington DC: US Department of Agriculture.*

Sawyer G.N., McCarthy D.L. (1967): *Chemistry of sanitary engineers, 2nd edn. McGraw Hill, New York.*

SOGREAH. (1990).

Piper A.M (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Eos, transactions. Am Geophys Union 25(6):914–928.*

Thorntwaite C.W (1948).

Van Wirdum G. (1980). *Description of water-quality changes in a hydrological cycle for the purpose of nature conservation. In J.C. Hooghart (Ed.). Water quality in groundwater-flow systems. (Reports and notes 5, p. 118-143). The Hague, The Netherlands: Commission for Hydrological Research TNO.*

Vila, J.M. (1980). *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. PhD of Science, Université Pierre et Marie Curie, Paris V.*

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

Winter, T.C., Mallory, S.E., Allen, T.R., Rosenberry, D.O., 2000. *The use of principal component analysis for interpreting ground water hydrographs. Ground Water 32, 234–*

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