

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté : Science de la Nature et de la Vie et Science de la terre et de l'Univers

Département : Science de la Nature et de la Vie



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité/Option : Hydrogéologie

Année universitaire :2020/2021.

---

**Thème**

**Etude de la vulnérabilité à la pollution et évaluation de risque  
des eaux souterraines de la plaine de Guelma Nord-Est Algérien**

---

**Présenté par :**

Taïba Zeyneb  
Aidoudi Imene

**Devant le jury :**

Nouar Tahar

Président

Pr

Université Guelma

Brahmia Ali

Examineur

M.C.A

Université Guelma

Ghrieb Lassaad

Rapporteur

M.C.A

Université Guelma

## Remerciement

---

Avant tous, Nous remercions Dieu qui nous a doté de la patience et de la volonté pour réaliser ce travail.

Nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

Nous exprimons énormément nos sincères remerciements à notre rapporteur monsieur **GHRIEB Lassaad** sur les orientations, les directives pertinentes qui nous a accordé et la patience face à nos questionnements, son aide et sa disponibilité qui nous a permis de finaliser ce travail. On ne peut jamais oublier le climat propice qui nous a créé durant la période de préparation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier vivement les membres de jury :

Monsieur **NOUAR Tahar**, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury.

Monsieur **BRAHMIA Ali**, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

A tout le staff d'enseignant du département qui a contribué à notre formation.

A toute la promotion de l'année universitaire 2020 /2021.

A toute la famille Taïba et Aidoudi pour le soutien et les sacrifices pour notre éducation.

## Résumé

Les eaux souterraines sont des ressources essentielles et vitales pour toutes espèces vivantes sur cette planète, dont seulement 3% de cette ressource est buvable, ce qui constitue un faible pourcentage pour répondre au besoin des consommateurs.

Cette pénurie d'eau est l'une des principaux problèmes liés à la pollution des eaux souterraines qui pourrait être causée par l'utilisation irrégulière des engrais chimiques et même par d'autres polluants quel que soit leur nature physique ou bien organique.

La région de Guelma est située au Nord-est de l'Algérie, elle est caractérisée par son climat subhumide et connue par des formations perméables et une nappe aquifère libre tout le long de l'axe des communes Guelma Belkheir et Boumahra ce qui rendent les eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma exposées à de fortes pollutions et en conséquence à une contamination.

L'objectif de notre étude est d'évaluer la vulnérabilité et d'estimer le degré de menaces sur les eaux souterraines de la région de Guelma en utilisant la méthode GOD ; l'une des méthodes de cartographie à index.

Le couplage entre les outils géologique, hydrogéologique et hydrochimique dans l'étude des eaux souterraines du bassin de Guelma, nous a aidé à connaître les différentes caractéristiques de la zone d'étude.

La méthode de vulnérabilité appliquée dans le bassin et qui s'articule sur trois paramètres à savoir ; type de nappe, lithologie et la profondeur de la nappe, nous a permis de qualifier les zones où se situent la majorité des forages étudiés comme zone de faible vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

Des recommandations de bonnes pratiques agricoles et industrielles sont exigées.

**Mot clés :** Guelma, Eaux souterraines, Cartographie, Vulnérabilité à la pollution, GOD.

## **Abstract**

Groundwater is essential and vital resources for all living species on this planet, in which only 3% of this resource is drinkable, which constitutes a small percentage to meet the needs of consumers.

This water scarcity is one of the main problems associated with groundwater pollution that could be caused by the irregular use of chemical fertilizers and even by other pollutants regardless of their physical or organic nature.

The region of Guelma is located in the North-East of Algeria, it is characterized by its subhumid climate and known by permeable formations and free aquifer all along the axis of the communes of Guelma Belkheir and Boumahra which makes the groundwater from the Guelma aquifer exposed to heavy pollution and consequently to contamination.

The objective of our study is to assess the vulnerability and estimate the degree of the threat on the groundwater in Guelma region using the GOD method; one of the index mapping methods.

The coupling between geological, hydrogeological and hydrochemical tools in the study of groundwater in the Guelma basin, helped us to know the different characteristics of the study area.

The vulnerability method applied in the basin and which is based on three parameters namely; type of water table, lithology and depth of the water table, allowed us to qualify the zones where the majority of the boreholes studied are located as zones of low vulnerability to groundwater pollution.

Recommendations of good agricultural and industrial practices are required.

**Keywords:** Guelma, Groundwater, Cartography, Vulnerability to pollution, GOD.

## ملخص

تعتبر المياه الجوفية من الموارد الأساسية والحيوية لجميع الكائنات الحية على هذا الكوكب، منها 3% فقط صالحة للشرب، مما يشكل نسبة صغيرة لتلبية احتياجات المستهلكين.

ندرة المياه هذه هي واحدة من المشاكل الرئيسية المرتبطة بتلوث المياه الجوفية التي يمكن أن تنتج عن الاستخدام غير المنتظم للأسمدة الكيماوية وحتى عن طريق الملوثات الأخرى بغض النظر عن طبيعتها الفيزيائية أو العضوية.

تقع منطقة قالمة في الشمال الشرقي للجزائر، وتتميز بمناخها شبه الرطب ومعروفة بتكوينات نفاذة وخزان جوفي حر على طول محور بلدية قالمة، بلخير وبومهرة مما يجعل المياه الجوفية للطبقة الجوفية لقالمة تتعرض لتلوث شديد.

الهدف من دراستنا هو تقييم قابلية التأثر وتقدير درجة التهديدات على المياه الجوفية في منطقة قالمة باستخدام طريقة GOD؛ إحدى طرق رسم الخرائط بمؤشر.

إن الاقتران بين الأدوات الجيولوجية والهيدروكيماوية في دراسة المياه الجوفية في حوض قالمة ساعدنا على معرفة الخصائص المختلفة لمنطقة الدراسة.

إن طريقة قابلية المياه الجوفية للتلوث المطبقة في الحوض المائي والتي تعتمد على ثلاثة معايير متمثلة في نوع الحوض المائي، نوعية الصخور وعمق منسوب المياه الجوفية قد سمحت لنا بتأهيل المناطق التي تقع فيها غالبية الآبار المدروسة كمناطق ذات قابلية ضعيفة لتلوث المياه الجوفية.

ينصح بهيكله وتحسين الممارسات الزراعية والصناعية في المنطقة المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** قالمة، المياه الجوفية، رسم الخرائط، التعرض للتلوث، GOD

## Table des matières

Remerciements	
Résumé en français	
Abstract	
Résumé en arabe	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

### Chapitre I : Cadre physique de la zone d'étude

1. Situation géographique .....	1
2. Orographie et relief de la région de Guelma .....	1
3. Réseau hydrographique.....	2
4. Aspects socio-économiques.....	3
Couverture végétale .....	4

### Chapitre II : Aperçu géologique

1. Géologie.....	5
1.1. Nappes alluvionnaire de Guelma.....	5
a. La basse terrasse (terrasse actuelle) .....	5
b. La moyenne terrasse.....	5
c. La haute terrasse (terrasse ancienne) .....	5
1.2. Géologie et stratigraphie.....	6
1.2.1. Le Primaire .....	6
1.2.2. Le Trias.....	6
1.2.3. Le Néritique .....	6
a. Le Jurassique.....	6
b. Le Crétacé.....	6
1.2.4. L'unité tellienne.....	7
1.2.5. L'unité ultra – tellienne .....	7
1.2.6. Le Numidien .....	7

1.2.7. Le Post – nappe .....	8
1.2.7.1. Le Mio-Pliocène.....	8
1.2.8. Le Quaternaire.....	8
1.2.8.1.Les Alluvions anciennes.....	8
1.2.8.2.Les Alluvions récentes.....	8
2. La tectonique.....	9
3. Conclusion .....	10

### **Chapitre III : Aperçu Hydroclimatologique**

Introduction.....	11
1. Caractéristiques climatiques de la région de Guelma.....	11
2. Etude des paramètres climatiques de la région Guelma.....	11
2.1.Précipitations.....	12
2.1.1. Variation moyennes mensuelles des précipitations.....	12
2.1.2. Précipitation saisonnière et annuelle.....	13
2.1.3. Le coefficient pluviométrique annuel.....	14
2.2.Température.....	16
2.2.1. Variation moyenne mensuelle des températures.....	16
2.2.2. Température saisonnière et annuelle.....	17
3. Diagramme pluviométrique de Gaussen (P=2T) .....	18
4. Type de climat.....	19
4.1. L'indice climatique de De MARTONNE (1923) .....	19
4.1.1. L'indice de l'aridité mensuel de De MARTONNE (1923) .....	20
5. hydrologie.....	21
5.1.Estimation des paramètres du bilan hydrique .....	21
5.1.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	21
5.1.2. Estimation du ruissellement .....	24
5.1.3. Estimation de l'infiltration.....	24
Conclusion .....	25

## **Chapitre IV : Aperçu Hydrogéologique**

1. Géométrie de l'aquifère .....	26
1.1. Prospection géophysique .....	26
1.2. Echelle de résistivité.....	27
1.3. Interprétation des coupes géoélectriques .....	28
1.4. Carte du Substratum .....	30
2. Description hydrogéologique de la nappe alluviale .....	31
2.1. Coupe hydrogéologique Nord-Sud n°1(d'après Gaud) .....	31
2.2. Coupe hydrogéologique Nord –Sud n°2 (d'après Gaud) .....	32
3. La piézométrie.....	33
4. Caractéristique hydrodynamique.....	35
4.2. La Carte de transmissivité.....	35
Conclusion.....	35

## **Chapitre V : Aperçu hydrochimique**

Introduction.....	37
1. Caractéristiques physico-chimiques.....	37
2. Détermination du faciès chimique.....	38
2.1. Représentation graphique des faciès hydrochimique .....	38
2.1.1. Classification de Piper .....	38
2.1.2. Formule caractéristique de Stabler.....	39
3. Variation des paramètres physico-chimiques.....	40
3.1. Paramètres physiques.....	40
3.1.1. La température.....	40
3.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH).....	41
3.1.3. La conductivité électrique.....	41
3.2. Paramètres chimiques.....	42
3.2.1. Les cations.....	42
3.2.1.1. Le calcium.....	42
3.2.1.2. Magnésium.....	43

3.2.1.3. Le sodium.....	44
3.2.2.1. Les anions.....	45
3.2.2.1. Les Chlorures.....	45
3.2.2.2. Les Sulfates.....	45
3.2.2.3. Les bicarbonates.....	46
3.3. Eléments de pollution.....	47
3.3.1. Les nutriments : (Cycle de l'Azote) .....	47
3.3.1.1. Les nitrates.....	47
3.3.1.2 Les Nitrites.....	48
3.3.1.3. Le phosphate (PO <sub>4</sub> ) .....	48
Conclusion .....	50
 <b>Chapitre VI : Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans la zone d'étude</b>	
Introduction.....	51
1. Principaux types et origines de pollution dans la zone d'étude.....	51
1.1. Pollution urbaines et domestiques .....	51
1.2. Pollution industrielle.....	51
1.3. Pollution d'origine agricole .....	52
4.1. Pollution par les engrais .....	52
1.4.1. Les types d'engrais.....	52
1.4.2. Les engrais les plus utilisés dans la zone d'étude .....	52
2. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines .....	53
3. Description de la méthode GOD .....	54
4. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans la plaine de Guelma .....	55
4.1. Le type de nappe(G).....	55
4.2. Lithologie de la zone non saturée (O).....	56
4.3 Profondeur de la nappe(D) .....	58
4.4. Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux selon la méthode GOD.....	59
4.4.1. Calcul de l'indice de vulnérabilité selon la méthode GOD.....	59
Conclusion .....	61

Conclusion générale .....	62
Référence Bibliographiques .....	64

## Liste des figures

<b>Fig.1.</b> Situation géographique de la région d'étude.....	1
<b>Fig.2.</b> Carte du massif montagneux de la région de Guelma. (Latifi, 2017) .....	2
<b>Fig.3.</b> Réseau hydrographique de la région de Guelma (MEKAOUI A.H & BENNOUR S.E, 2016) .....	3
<b>Fig.4.</b> Carte structurale de la région de Guelma carte géologique de la plaine de Guelma (JM. Vila, 1988) .....	9
<b>Fig.5.</b> Variation des précipitations moyenne mensuelle de la station météorologique Belkheir Guelma 1989-2020.....	13
<b>Fig.6.</b> Variation des précipitations saisonnières au niveau de la station météorologique Belkhir Guelma (1989-2020) .....	14
<b>Fig.7.</b> Variations du coefficient pluviométrique à la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2021) .....	16
<b>Fig.8.</b> Variation des températures moyennes mensuelles au niveau de la station Belkheir météorologique Guelma (1989-2020).....	17
<b>Fig.9.</b> Répartition des précipitations saisonnières au niveau de station météorologique Belkhir Guelma (1989-2020).....	18
<b>Fig.10.</b> Diagramme pluviothermique de la station météorologique Belkheir de Guelma (1989-2020).....	19
<b>Fig.11.</b> La moyenne pluriannuelle des paramètres climatiques (précipitation, ETP, ETR) de la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2020).....	23
<b>Fig.12.</b> La moyenne pluriannuelle des éléments climatiques (RFU, Excédent et Déficit) de la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2020).....	24
<b>Fig.13.</b> Carte de position des sondages électriques de la plaine de Guelma (CGG.1971, in Kachi. N 2015).....	27
<b>Fig.14.a :</b> Coupe géoélectrique DD' .....	29
<b>Fig.14.b :</b> Coupe géoélectrique EE' .....	29

<b>Fig.15.</b> Carte du toit du substratum imperméable de la nappe alluviale de Guelma (Kachi.N, 2015).....	30
<b>Fig.16 :</b> Coupe hydrogéologique NNW-SSE (d’après Gaud).....	31
<b>Fig.17.</b> Coupe hydrogéologique Nord –Sud (d’après Gaud).....	33
<b>Fig.18.</b> Carte piézométrique de la zone d’étude. (Décembre, 2013) in (Latifi.S.2017).....	34
<b>Fig.19.</b> Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma. (Latifi.S.2017).....	35
<b>Fig.20.</b> Carte d’inventaire des points de prélèvement (2021).....	37
<b>Fig.21.</b> Faciès chimiques des eaux des forages étudiés selon Piper.....	38
<b>Fig.22.</b> Faciès chimiques des eaux des forages étudiés selon Stabler.....	40
<b>Fig.23.</b> Variation de la température dans les eaux de forages étudiés (2021).....	40
<b>Fig.24.</b> Variation du pH dans les eaux de forages étudiés (2021).....	41
<b>Fig.25.</b> Variation de la Conductivité électrique dans les eaux de forages étudiés (2021).....	42
<b>Fig.26.</b> Variation de l’ion calcium dans les eaux de forages étudiés (2021).....	43
<b>Fig.27.</b> Variation de l’ion Magnésium dans les eaux de forages étudiés (2021).....	44
<b>Fig.28.</b> Variation de l’ion sodium et potassium dans les eaux de forages étudiés (2021).....	44
<b>Fig.29.</b> Variation de l’ion chlore dans les eaux de forages étudiés (2021).....	45
<b>Fig.30.</b> Variation de l’ion sulfate dans les eaux de forages étudiés (2021).....	46
<b>Fig.31.</b> Variation de l’ion bicarbonate dans les eaux de forages étudiés (2021).....	47
<b>Fig.32.</b> Variation de l’ion nitrate dans les eaux de forages étudiés (2021).....	48
<b>Fig.33.</b> Variation de l’ion nitrite dans les eaux de forages étudiés (2021).....	49
<b>Fig.34.</b> Variation de l’ion phosphate dans les eaux de forages étudiés (2021).....	49
<b>Fig. 35.</b> Carte de type d’aquifère de la zone d’étude selon GOD.....	56
<b>Fig. 36.</b> Carte de type de lithologie de la zone vadose de zone d’étude selon GOD.....	58
<b>Fig. 37.</b> Carte de profondeur de la nappe de la zone d’étude selon GOD.....	59

**Fig.38.** Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la zone d'étude selon  
GOD.....60

## Liste des tableaux

<b>Tab.1.</b> Cordonnées et période d'observation de la station météorologique Belkheir Guelma.....	11
<b>Tab.2.</b> Les précipitations moyennes mensuelles de la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2021).....	12
<b>Tab.3.</b> Précipitations saisonnières et annuelle de la station Belkheir Guelma de 1989 à 2020.....	13
<b>Tab.4.</b> Précipitation interannuelle de la station météorologique de Belkheir Guelma (1989-2020).....	15
<b>Tab.5.</b> Température moyenne mensuelle de la station pluviométrique Belkheir Guelma (1989-2020).....	16
<b>Tab.6.</b> Température saisonnières et annuelle de la station météorologique Belkheir Guelma (1989 à 2020).....	18
<b>Tab.7.</b> Indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923) en fonction de la température moyenne mensuelle et de la précipitation moyenne mensuelle de la région de Guelma.....	20
<b>Tab.8.</b> Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite au niveau de la Station météorologique de Guelma (1989-2020).....	23
<b>Tab.9 :</b> Échelle de corrélation entre la résistivité et la lithologie selon CGG (1971) (modifiée).....	28
<b>Tab.10.</b> Analyses physico-chimiques des forages (ADE ,2021).....	38
<b>Tab.11.</b> Faciès chimiques des eaux des forages étudiés selon la méthode de Stabler (2021).....	39
<b>Tab.12.</b> Cotation des différents paramètres de la méthode GOD (Foster,1987).....	54
<b>Tab.13.</b> Cotation de type de lithologie de la zone vadose selon la méthode GOD.....	57
<b>Tab.14.</b> Cotation de l'indice de vulnérabilité selon la méthode GOD.....	59

# Introduction générale

## Introduction générale

---

Les eaux souterraines représentent 30 % de l'eau douce de la planète, dont la majeure partie de ces eaux sont stockée dans des aquifères.

Ces ressources sont destinées à la consommation humaine et utilisées dans les domaines agricoles et industriels.

La situation mondiale des ressources en eau est devenue critique et menacée à cause de la nette augmentation de la consommation en plus de la pollution accrue.

Plus d'un milliard de personnes dans le monde n'a pas accès à l'eau potable et près de deux milliards et demi, soit le tiers de la population mondiale, seront confrontés à une pénurie d'eau d'ici 2025 (4th World Water Forum, 2006). La déclaration de Dublin sur l'eau dans la perspective d'un développement durable (ICWE, 1992), faisant état des problèmes liés à l'eau, a permis la création du forum mondial de l'eau associant institutions privées, organisations régionales et non gouvernementales et pouvoirs publics à l'effort d'évaluation et de suivi de la gestion des ressources en eau.

Ces ressources peuvent être confrontées à la contamination lors de l'utilisation des engrais chimiques, des pesticides, des solvants.... etc.

A partir de cette prémisse, la prévention contre la pollution est l'une des étapes les plus importantes et nécessaires pour la préservation des nappes et en conséquent des ressources en eau.

Le présent travail a pour objectif de cartographier et cerner les zones vulnérables à la pollution et d'estimer le degré de risque des eaux souterraines de plaine de Guelma.

Pour atteindre notre objectif et par manque de données nous avons appliqué la méthode GOD qui est une approche empirique développée par Foster en 1987.

Pour bien mener notre travail, plusieurs parties sont combinées et exploitées.

Six chapitres ont été traités :

Le premier chapitre inclut un aperçu sur le cadre général de la zone d'étude avec une description géomorphologique, socio-économique et du couvert végétal.

Le second chapitre a pour but de décrire la géologie ; la stratigraphie et la lithologie du remplissage alluvionnaire de la région.

## **Introduction générale**

---

Le troisième chapitre concerne les caractéristiques hydroclimatiques de la région de Guelma pour permettre d'identifier le type de climat de cette région et d'établir le bilan hydrique et même d'estimer l'écoulement, l'infiltration et le ruissellement qui sert à compléter les chapitres suivants.

Le quatrième chapitre présente l'étude hydrogéologique de la plaine, géométrie et prospection géophysique de l'aquifère, description des coupes hydrogéologiques suivi par détermination de la piézométrie et certains paramètres hydrodynamiques tel que la transmissivité.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques hydrochimique, à la détermination du faciès chimiques et des paramètres physico-chimiques des eaux de quelques forages de la région étudiée.

Le sixième chapitre traite la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines avec une cartographie des zones vulnérables à la pollution de l'aquifère de Guelma.

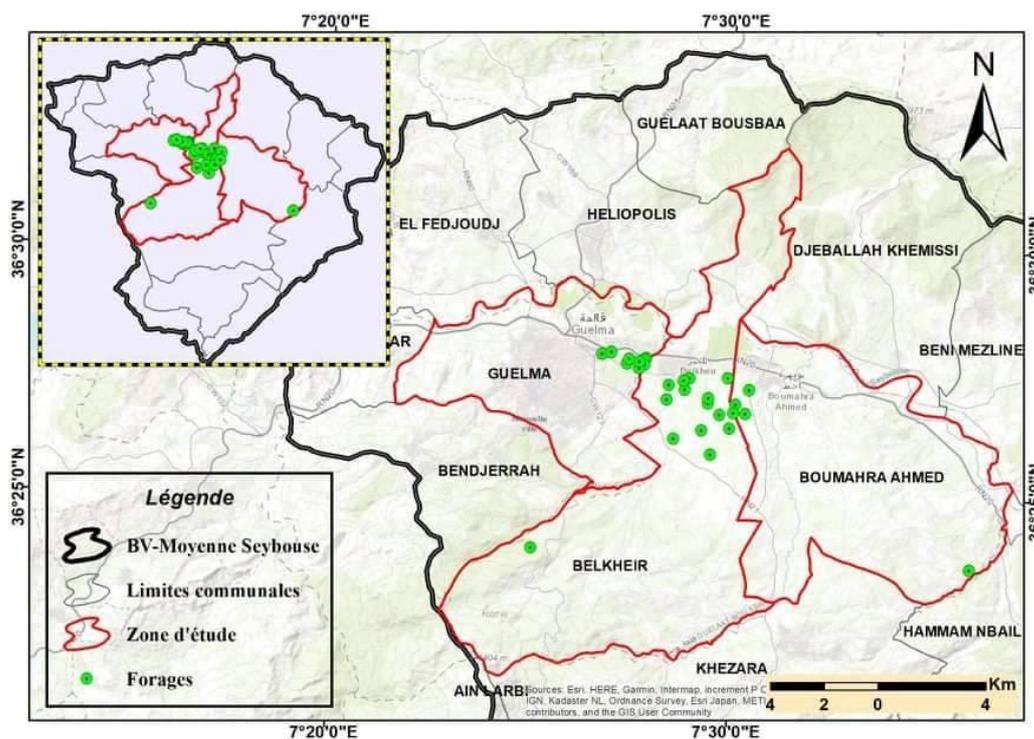
# Chapitre I

## Cadre Physique de la zone d'étude

## 1. Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya de Guelma se situe au Nord-est de l'Algérie, localisée à 60km de la mer méditerranéenne, s'étendant sur une superficie de 3686.84 km<sup>2</sup>. Elle constitue un point de rencontre entre les pôles industriels du nord d'Annaba – Skikda et les centres d'échanges au sud de Oum Bouaghi et Tébessa [25].

La zone d'étude Guelma- Boumahra se situe au cœur d'une grande région agricole (vaste périmètre d'irrigation), d'altitude moyenne d'environ 227m. Elle appartient à la nappe alluviale de Guelma qui couvre une superficie de 122 km<sup>2</sup> et qui est une partie intégrante du bassin de l'Oued Seybouse qui fait partie de la moyenne Seybouse [11].



**Fig.1.** Situation géographique de la région d'étude (Taïba. Z et Aidoudi. I ,2021).

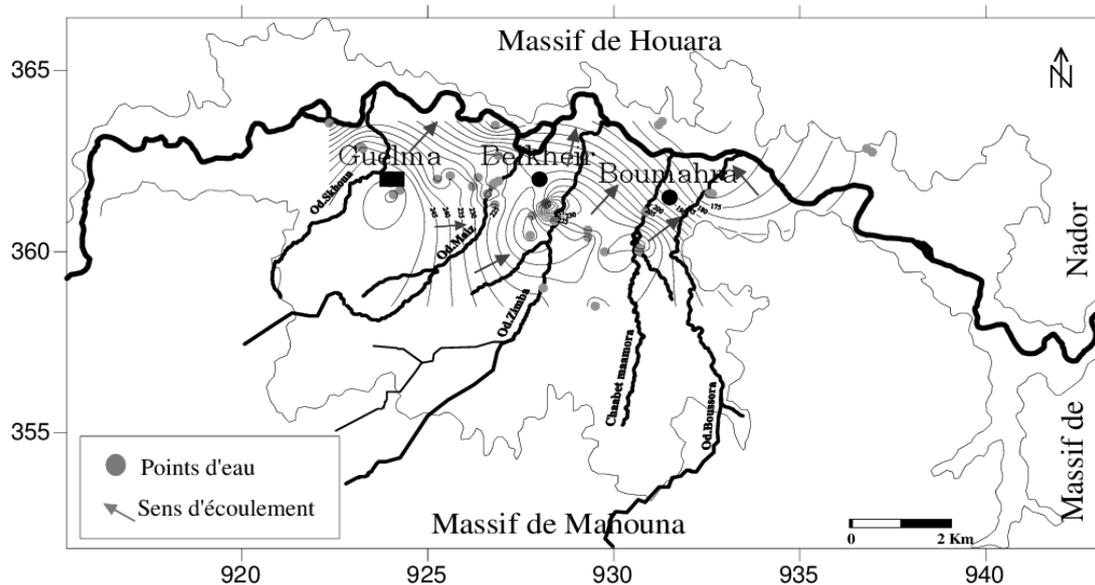
## 2. Orographie et relief de la région de Guelma

L'orographie de la région de Guelma est formée par des reliefs montagneux et collinaires ces reliefs donne aux affluents de la Seybouse un caractère torrentiel et constitue l'extrémité orientale de la chaîne des monts de Constantine et des contreforts occidentales de la chaîne de la Medjerda [4]. (Fig. 2)

Parmi ces reliefs on distingue :

- Djebel Nador (893 m d'altitude),

- Djebel Houara (1292 m d'altitude),
- Djebel Mahouna (1411 m d'altitude) [17].



**Fig.2.** Carte du massif montagneux de la région de Guelma. (Latifi, 2017)

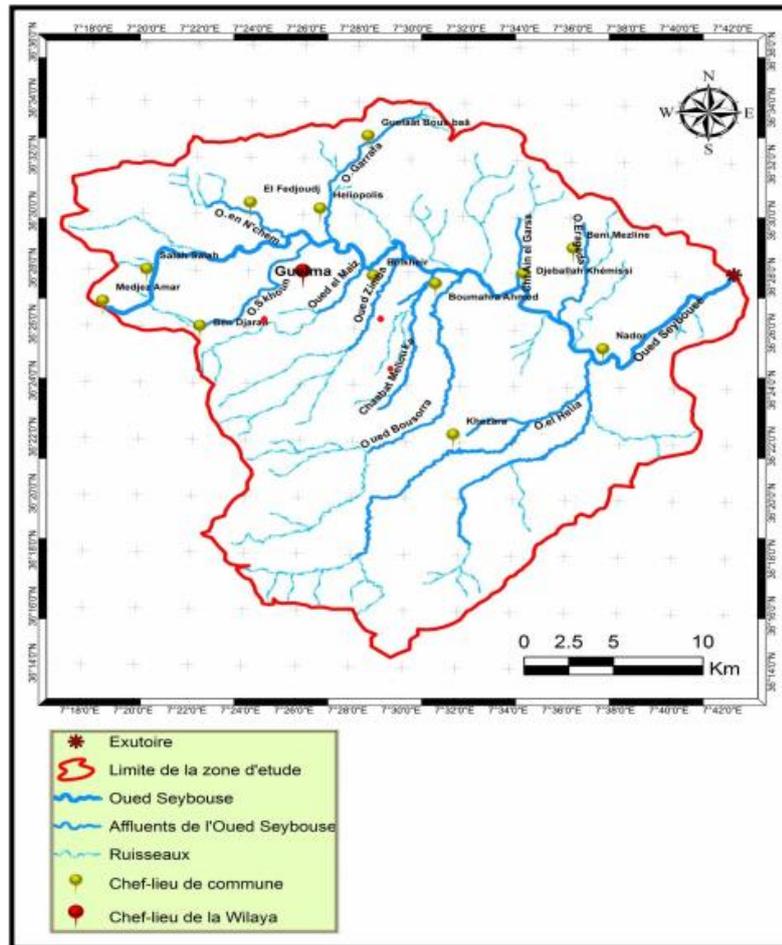
### 3. Réseau hydrographique

L'étude du réseau hydrographique permet de donner une idée sur le développement de son chevelu (ramification lâche ou dense), sa forme, sa hiérarchisation, sa densité de drainage, son rapport de longueur [6].

Le réseau hydrographique du bassin de Guelma est constitué par le seul cours d'eau important, qui est la Seybouse.

Il prend naissance au niveau de Medjez Ammar résultant de la confluence de deux Oueds qui sont le Charef et Bouhamdane et se termine à l'embouchure de la mer Méditerranée au Nord près de la commune de Sidi Salem, wilaya d'Annaba [11].

Le réseau hydrographique du secteur d'étude draine une superficie de l'ordre de 770.91 km<sup>2</sup> [6].



**Fig.3.** Réseau hydrographique de la région de Guelma (MEKAOUI A.H & BENNOUR S.E, 2016).

#### 4. Aspects socio-économiques

L'étude et la maîtrise des données démographiques sont fondamentales dans la prise en charge des besoins sociaux-économiques de la population, le poids démographique, son rythme de croissance, ainsi que toutes les sous-populations qui découlent de la structure par âges.

La wilaya de Guelma a un nombre d'habitants total de 530.736 habitants (DPAT Guelma, 2017) et une population urbaine de 316.478 habitants, soit 59,63 % de l'ensemble de la population. Ce taux reflète une forte urbanisation des centres agglomérés.

L'activité industrielle est à ne pas négliger, plusieurs unités industrielles ont été implantées. On peut citer : la laiterie (Guelma), unité de fabrication des pâtes et conserverie de tomate industrielle en plus de l'exploitation de quelques mines et carrières, comme celle du kaolin du Djebel Debagh et l'unité ENAMARBRE à Boumahra Ahmed [1].

---

## 5. Couverture végétale

La Wilaya de Guelma couvre une superficie végétale de 105.395 ha, soit un taux de 28,59 % de la superficie totale de la wilaya. Le paysage est enfermé discontinuellement dans les massifs répartis d'Ouest en Est.

Les grands espaces de terrains sont à vocation végétale dans la partie Sud-est.

Selon la densité, les forêts se répartissent comme suit :

- Forêts denses : 19.459 ha,
- Forêts claires : 10.491 ha,
- Maquis et broussailles + parcours : 57.402 ha,
- Reboisements : 3.589 ha,
- Vides : 14.457 ha.

-Le taux de reboisement est de 10 % dénotant un effort considérable de reforestation du territoire.

-Les principales forêts sont :

- Forêts de Béni Salah : réserve nationale en liège (12.745 ha).
- Forêt de la Mahouna : d'une vocation récréative s'étalant sur 1.035 ha [4].

# Chapitre II

## Aperçu géologique

## 1. Géologie

La géologie de la région de Guelma est caractérisée par des formations allant du Quaternaire au Trias, présentant ainsi une lithologie très variée et qui comprend essentiellement : les alluvions (sables, graviers, cailloutis...etc.), les grès, les marnes, les argiles et les calcaires. Le fond du bassin correspond à un fossé d'effondrement comblé par des sédiments alluvionnaires d'âge Mio-plio-quatenaire, formant le réservoir aquifère de la vallée de Guelma. Ce remplissage constitue l'ancienne et actuelle terrasse de la vallée de la Seybouse [16].

### 1.1.Nappes alluvionnaires de Guelma

Elle est située dans la vallée de l'Oued Seybouse en grande partie sur sa rive droite. Elle est sillonnée par l'Oued Seybouse d'Ouest en Est, depuis Medjez Amar jusqu'à Nador. (Djabri L, 1996). Ces alluvions sont perméables et sont alimentés par les eaux d'infiltrations des pluies et des apports latéraux du bassin versant de Guelma. Elle est constituée de trois terrasses distinctes (basse, moyenne, et haute) [9].

#### a. La basse terrasse (terrasse actuelle)

C'est la vallée dans laquelle coule l'actuel Oued Seybouse. Elle est formée de graviers, de sables et de galets. Son épaisseur croit vers l'Est, elle est de 8 m au Nord de la ville de Guelma et atteint 16 m au Nord-est de Boumahra, Le substratum est constitué de marnes à gypses et d'argiles du Miocène dans sa partie Ouest. A l'Est, il est constitué d'argiles et de grès numidiens [15].

#### b. La moyenne terrasse

Elle est constituée d'un matériel détritique relativement fin en alternance avec des passées argileuses. Le substratum est toujours marneux à gypse. Son épaisseur est plus importante que celle de la basse terrasse (40 m environ) [14].

#### c. La haute terrasse (terrasse ancienne)

Elle est située au Sud de la moyenne terrasse et elle est formée d'alluvions grossières Plio-quatennaires (galets, graviers, grès, sables et quelques passées argileuses) perméables. La couche superficielle montre une affinité argileuse nette. Le substratum est aussi constitué de marnes à gypses et d'argiles du Miocène jusqu'à l'Oued Boussora. Vers l'Est, il est constitué d'argiles Eocènes. L'épaisseur de cette partie de la nappe aquifère est plus importante que celles des deux premières et varie de 50 m à 150 m par endroits (H'Fais) entre Belkheir et Boumahra.

La plus grande quantité en eau de la nappe est exploitée par le biais de forages de différentes profondeurs, de puits, et de captage de sources [14].

## **1.2. Géologie et stratigraphie**

### **1.2.1. Le Primaire**

Les terrains primaires ne présentent pas beaucoup d'affleurements, ils sont réduits et on les trouve au Nord du massif de Nador N'Bails à l'entrée des gorges de l'Oued Seybouse.

Ces affleurements sont formés par des schistes satinés alternants avec des petits bancs de grés [17].

### **1.2.2. Le Trias**

On le trouve uniquement à l'extrémité Est de la plaine alluviale. Il est formé d'argiles bariolées injectées de gypse, cargneules et de bancs disloqués de calcaires dolomitiques sombres [17].

### **1.2.3. Le Néritique**

Caractérisé par un faciès jurassique – crétacé plus ou moins karstifiée. Il est surmonté par plusieurs nappes de charriages et impliqué dans les grands accidents. Il apparaît aussi sous forme de fenêtre à Djebel Mahouna, Djebel Debagh, Nador et plus à l'Ouest à Djebel Taya [17].

#### **a. Le Jurassique**

Il est représenté par des dolomies noires avec des schistes calcareuses de faibles épaisseurs dans la région de Djebel Debagh [17].

#### **b. Le Crétacé**

Le Crétacé inférieur est représenté par des calcaires massifs ou lissés et de dolomies à algues d'âge Aptien, on le rencontre à Hammam Bradaa et Djebel Debagh.

Les calcaires massifs à microbrèches calcarinites avec des niveaux calcaires à chailles indiquent nettement le faciès néritique du Compagnien – Mæstrichtien (Vila 1972).

Le Crétacé supérieur est caractérisé par des niveaux calcaireux dolomitiques riches en orbitolines et des débris à Rudiste datant le Cénomaniens – Vraconien d'épaisseur limitée [11].

#### 1.2.4. L'unité tellienne

Elle appartient au domaine externe de la chaîne des Maghrébides dans le Nord – Est algérien. Cette unité correspond au domaine Tellien externe qui est constitué de formations paléogènes, où l'on distingue :

- un ensemble méridional à Nummulite et au Sud à Globigérines ;
- un ensemble médian à sédimentation profonde ;
- un ensemble septentrional à matériels Eocène [11].

La série débute par des marnes noires paléocènes et atteint le Lutécien inférieur avec une faune riche en Nummulite.

#### 1.2.5. L'unité ultra – tellienne

Le faciès dominant est celui des marnes et marno-calcaires avec des barres de micrites à microfaunes variées (Delga et al, 1968).

La stratigraphie est la suivante, dont nous distinguons de bas en haut :

- marnes à ammonites (barrémien – albien)
- marnes à micrites vertes (Campanien)
- marnes grises (Maestrichtien)

A Djeballa Khemissi, cette unité est caractérisée par des formations crétacées de faibles épaisseurs [17].

#### 1.2.6. Le Numidien

Il forme les principaux reliefs de la région de Guelma (Mahouna, Houara).

Il est caractérisé par un flysch gréseux constitué par les trois termes suivants :

- épaisseur d'argile verte et rouge d'âge Oligocène
- alternance d'argile et de gros blocs de grès souvent hétérométriques d'âge aquitanien
- argile, silexites et marnes correspondantes au Burdigalien inférieur.

A Hammam Debagh, le sommet est représenté par des grès grossiers à dragées de quartz (Lahondere, 1981) [17].

### **1.2.7. Le Post – nappe**

#### **1.2.7.1. Le Mio-Pliocène**

Représenté au niveau du bassin de Guelma par des marnes à gypse, argiles et conglomérats rouges. Il est considéré comme une formation post – nappe, où on y voit succéder deux cycles :

-La molasse de Guelma visible sur la route Guelma Bensmih, composé de grès jaunes friables, intercalés avec des formations argilo – marneuses grises ou jaunes parfois gypseuses.

-Le second cycle formé par une succession d'argiles de conglomérats rouges, argiles grises à gypses et à soufre et des calcaires lacustres [17].

### **1.2.8. Le Quaternaire**

Les formations du Quaternaire sont la base de cette étude puisqu'avec les formations pliocènes, constituent la roche réservoir de la nappe aquifère de Guelma.

Le Quaternaire occupe le centre du bassin et correspond au faciès de terrasses où l'on distingue : [11].

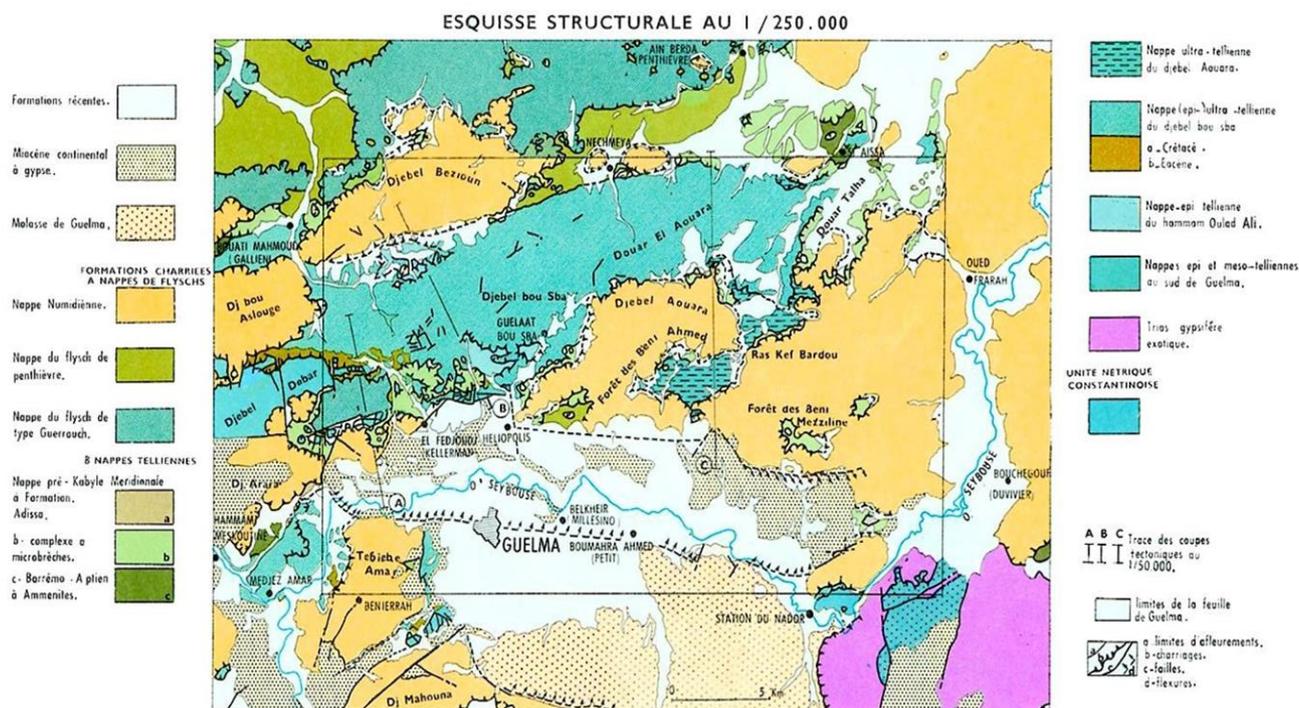
#### **1.2.8.1. Les Alluvions anciennes**

Ce sont des éboulis mélangés parfois à des argiles numidiennes. Elles sont localisées tout le long du versant Ouest du bassin.

Les terrasses d'alluvions anciennes dominant d'environ 55m à 60m le thalweg de la Seybouse, s'écartent pour former la grande plaine qui s'étend à l'Est de Guelma, et se rattache vers le Sud à la terrasse pliocène qui atteint une altitude d'environ 90m à 100m au-dessus de la Seybouse. Cette dernière comprend tantôt des limons avec cailloux roulés, tantôt des conglomérats intercalés de bancs marno – calcaires un peu travertineux [11].

#### **1.2.8.2. Les Alluvions récentes**

Elles forment la majeure partie de la vallée principale actuelle de l'Oued Seybouse. Ce sont des cailloutis, galets et graviers calcaires parfois à ciment marneux [15].



**Fig.4.** Carte structurale de la région de Guelma carte géologique de la plaine de Guelma (JM. Vila, 1988).

## 2. La tectonique

La région de Guelma, située entre le littoral et les abords des Hauts plateaux, se caractérise par un dispositif structural assez complexe. C'est précisément dans cette zone que se sont manifestés successivement, à toutes les époques avec le plus d'intensité, les mouvements orogéniques qui ont affecté cette partie de l'Algérie. La région qui correspond à la chaîne de l'Atlas tellien et au Tell dont fait partie la chaîne numidique, se trouve extrêmement tourmentée et on y trouve représentés des exemples d'accidents tectoniques de tous genres. Selon De La Chavane (1910), les effets tectoniques dans la région de Guelma se sont manifestés surtout par des phénomènes de compression et de refoulement intense des plis qui sont en général déversés vers le Sud et le Sud-Est. Ces plis, souvent empilés les uns sur les autres, se chevauchent et se recouvrent à la façon d'écaillés imbriquées. Ce phénomène de structure écaillée est fréquent dans la chaîne atlasique. Dans ces plis déversés, les flancs inverses sont le plus souvent supprimés par compression et/ou par étirement.

Les formes synclinales s'observent par endroit, dans les zones plus ou moins épargnées par les effets tectoniques. Quant aux voûtes anticlinales, elles sont assez rares et quand elles existent, elles se trouvent plutôt à l'état de brachyanticlinaux ou de dômes, structurés en horst et graben. [6]

### 3. Conclusion

La zone d'étude fait partie du domaine externe de la chaîne Alpine de l'Algérie orientale.

La région est un pays de nappes de charriages. Les terrains qui constituent le sol et le sous-sol sont variés et leurs âges oscillent entre le Trias et le Quaternaire [17].

Concernant la géologie, des différentes phases tectoniques ont joués un rôle prépondérant dans la morphogenèse, donnant naissance à des terrasses et des cônes de déjections au niveau du bassin de Guelma [11].

La description géologique a fait apparaître que dans la zone de Guelma, seules les formations du Mio-Pliocène et accumulations alluvionnaires du Quaternaire peuvent constituer des réservoirs d'eau importants : [11].

- le réservoir de la nappe superficielle, représenté par des alluvions, constituées essentiellement par des sables, cailloutis, galets, limons et conglomérats ;
- le réservoir de la nappe des hautes terrasses, représenté par des galets, conglomérats, limons et sable [17].

# Chapitre III

## Aperçu Hydroclimatologique

## Introduction

Pour étudier et connaître les données et les paramètres climatologiques de la région de Guelma ; il est nécessaire d'évaluer les différents termes du bilan hydrologique (qui sont les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration et le ruissellement).

L'alimentation de l'aquifère se fait en grande partie par les précipitations météoriques qui s'infiltrent et amènent le regroupement des eaux sous le sol formant des eaux souterraines dans des nappes aquifères sans oublier d'indiquer que les eaux infiltrées entraînent dans l'aquifère peuvent provoquer une pollution dans les eaux souterraines.

L'étude est basée sur le traitement et l'analyse des paramètres climatiques, principalement les précipitations et la température obtenus de la station météorologique de Belkheir Guelma. Ainsi que leur évolution dans le temps et l'espace sur une série d'année de 31 ans durant une période d'observation comprise entre 1989 et 2020 afin de caractériser le climat de la région Belkheir et d'établir un bilan hydrologique qui permet le fonctionnement du système hydrogéologiques.

### 1. Caractéristiques climatiques de la région de Guelma :

L'Algérie en termes de la situation géographique et en termes de climat est caractérisée par trois zones climatiques distinctes la première à un climat méditerranéen au Nord, la seconde à un climat semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et la troisième à un climat aride qui caractérise le grand Sahara [12].

La région étudiée Guelma fait partie au première zone climatique qui a un climat méditerranéen. Les données pluviométriques et de températures sont récoltées de la station météorologique de Belkheir qui est située à 4 km de la ville de Guelma. Dans ce qui suit nous présentons un aperçu sur les caractéristiques climatiques présent de cette station dans une période d'observation s'étend de 1989-1990 à 2020 sur une série d'année de 31 ans, le tableau qui se suit illustre les coordonnées et la période d'observation de la station.

**Tab.1.** Coordonnées et période d'observation de la station météorologique Belkheir Guelma.

Période d'observation	Station	Coordonnées de la station pluviométrique Belkheir Guelma		
		Longitude	Latitude	Altitude
1989-2020	Belkheir Guelma	07°28'E	36°28'N	227

### 2. Etude des paramètres climatiques de la région Guelma.

Les différentes données climatiques sont récoltées de la station météorologique de Belkheir Guelma d'une période de 31ans permet de caractériser les conditions climatiques locales de la région d'étude.

## 2.1. Précipitations

La précipitation constitue un facteur climatique très important ; elle joue un rôle dans la distribution spatiale des eaux d'écoulements vers les cours d'eaux ; les mers et dans l'alimentation des nappes souterraines.

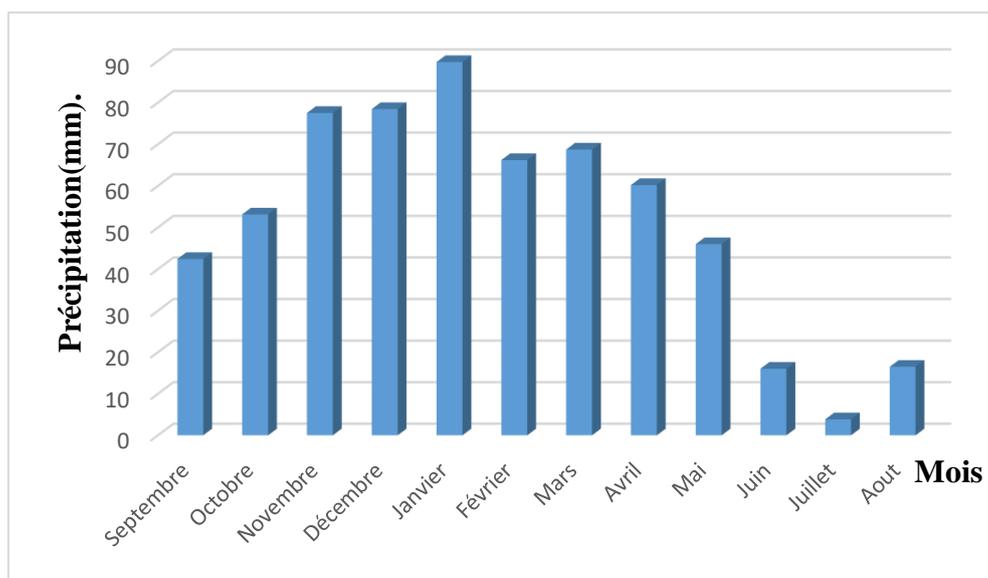
### 2.1.1. Variation moyennes mensuelles des précipitations

La variation des précipitations mensuel sur une période de 31ans allant de 1989 à 2020 (Fig.5) montre que :

- Le mois le plus pluvieux est le mois de janvier avec une précipitation moyenne mensuelle de 89.73mm.
- Le mois le plus sec est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de 3.85mm.

**Tab.2.** Les précipitations moyennes mensuelles de la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2021).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Année
P(mm)	42.43	53.13	77.51	78.45	89.73	66.19	68.72	60.19	46.00	16.04	3.85	16.51	1989-2020



**Fig.5.** Variation des précipitations moyenne mensuelle de la station météorologique Belkheir Guelma 1989-2020.

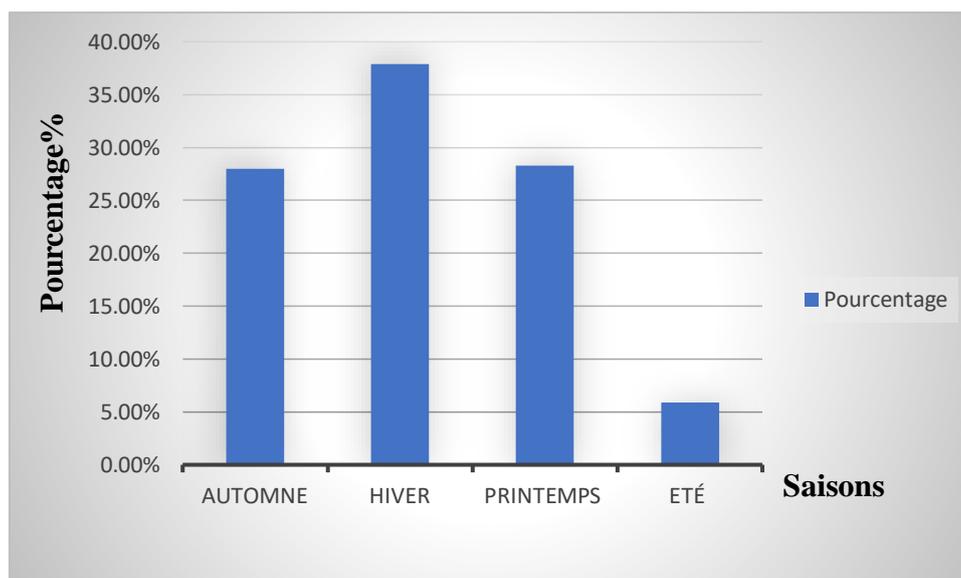
**2.1.2. Précipitation saisonnière et annuelle**

L'étude des précipitations saisonnière et annuelle montre que les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver avec 37.87% des pluies moyennes annuelles et le printemps avec 28.27%.

L'automne représente 27.97% et l'été avec 5.88% seulement des précipitations moyennes annuelles.

**Tab.3.** Précipitations saisonnières et annuelle de la station météorologique Belkheir Guelma de 1989 à 2020.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
<b>P(mm)</b>	42.43	53.13	77.51	78.45	89.73	66.19	68.72	60.19	46.00	16.04	3.85	16.51	<b>618.8mm</b>
<b>Saison</b>	<b>Automne</b>			<b>Hiver</b>			<b>Printemps</b>			<b>Eté</b>			
	173.07mm			234.37mm			174.91mm			36.4mm			
	27.97%			37.87%			28.27%			5.88%			



**Fig.6.** Variation des précipitations saisonnières au niveau de la station météorologique Belkhir Guelma (1989-2020).

### 2.1.3. Le coefficient pluviométrique annuel

Le coefficient pluviométrique est un paramètre climatique qui permet de déterminer les années déficitaires et les années excédentaires [12].

Il est calculé par le rapport de la pluviométrie de l'année considérée à pluviométrie moyenne pour une station donnée.

$$C_p = P/P_{moy}$$

Avec :

**CP** : Coefficient pluviométrique.

**P** : Pluviométrie de l'année considérée (mm)

**P<sub>moy</sub>** : Moyenne annuelle pluviométrique (mm).

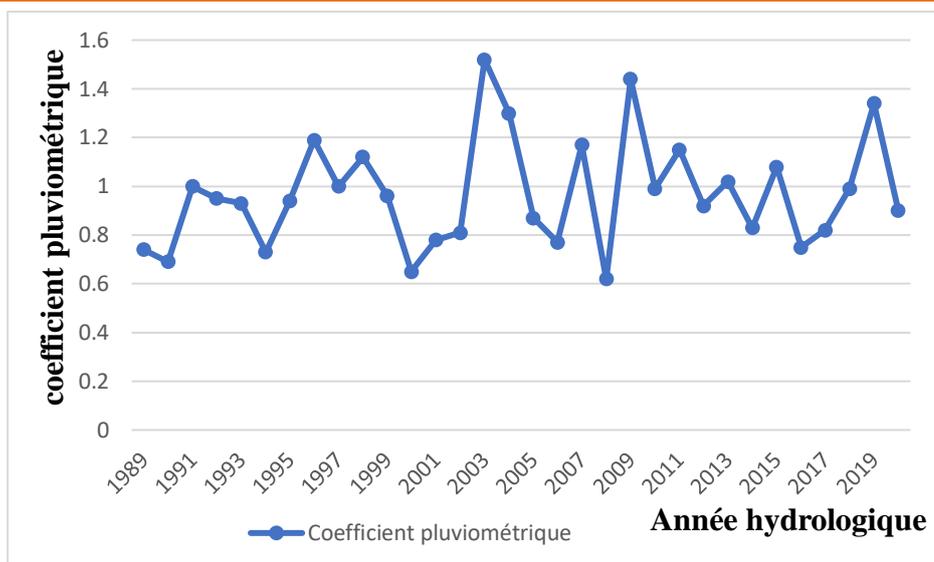
Si :

**Cp > 1** : l'année correspondante est excédentaire.

**Cp < 1** : l'année correspondante est déficitaire. (Tab.4).

**Tab.4.** Précipitation interannuelle de la station météorologique de Belkheir Guelma (1989-2020).

<b>Année hydrologique</b>	<b>Coefficient pluviométrique</b>	<b>Remarque</b>
1989	0.74	Année déficitaire
1990	0.69	Année déficitaire
1991	1.00	Année excédentaire
1992	0.95	Année déficitaire
1993	0.93	Année déficitaire
1994	0.73	Année déficitaire
1995	0.94	Année déficitaire
1996	1.19	Année excédentaire
1997	1.00	Année excédentaire
1998	1.12	Année excédentaire
1999	0.96	Année déficitaire
2000	0.65	Année déficitaire
2001	0.78	Année déficitaire
2002	0.81	Année déficitaire
2003	1.52	Année excédentaire
2004	1.30	Année excédentaire
2005	0.87	Année déficitaire
2006	0.77	Année déficitaire
2007	1.17	Année excédentaire
2008	0.62	Année déficitaire
2009	1.44	Année excédentaire
2010	0.99	Année déficitaire
2011	1.15	Année excédentaire
2012	0.92	Année déficitaire
2013	1.02	Année excédentaire
2014	0.83	Année déficitaire
2015	1.08	Année excédentaire
2016	0.75	Année déficitaire
2017	0.82	Année déficitaire
2018	0.99	Année déficitaire
2019	1.34	Année excédentaire
2020	0.90	Année déficitaire



**Fig.7.** Variations du coefficient pluviométrique à la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2021).

D’après (Tab.4) et (Fig.7) la répartition des précipitations interannuelles dans une période de 1989 à 2020 les années considèrent comme pluvieuses et excédentaires avec un coefficient pluviométrique de  $\geq 1$  sont les suivants :1991,1996,1997,1998,2003,2004 ,2007,2009,2011 2013,2015,2019.

## 2.2. Température

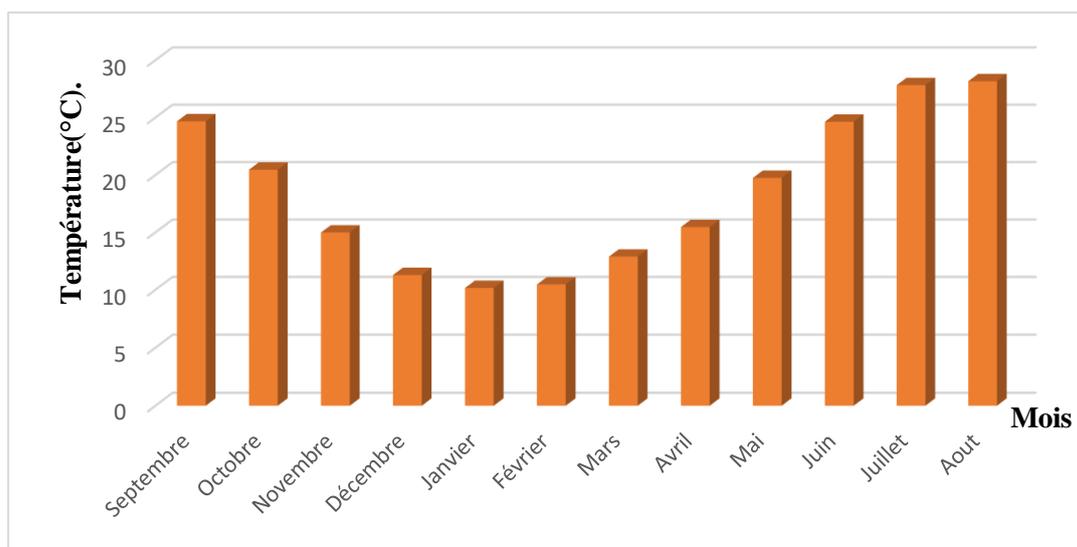
La température est un facteur climatique essentiel ; elle joue un rôle déterminant dans l'estimation du déficit d'écoulement qui intervient dans l'estimation du bilan hydrologique [12].

### 2.2.1. Variation moyenne mensuelle des températures

La température est liée à la durée d'insolation, à l'altitude et aux conditions climatiques locales de la région d'étude [12]. (Tab.5)

**Tab.5.** Température moyenne mensuelle de la station pluviométrique Belkheir Guelma (1989-2020).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Année
P(mm)	24.68	20.46	14.99	11.29	10.16	10.47	12.89	15.46	19.75	24.46	27.83	28.17	1989-2020



**Fig.8.** Variation des températures moyennes mensuelles au niveau de la station Belkheir météorologique Guelma (1989-2020).

L'étude de la variation moyenne mensuelle de la température montre deux saisons thermiques

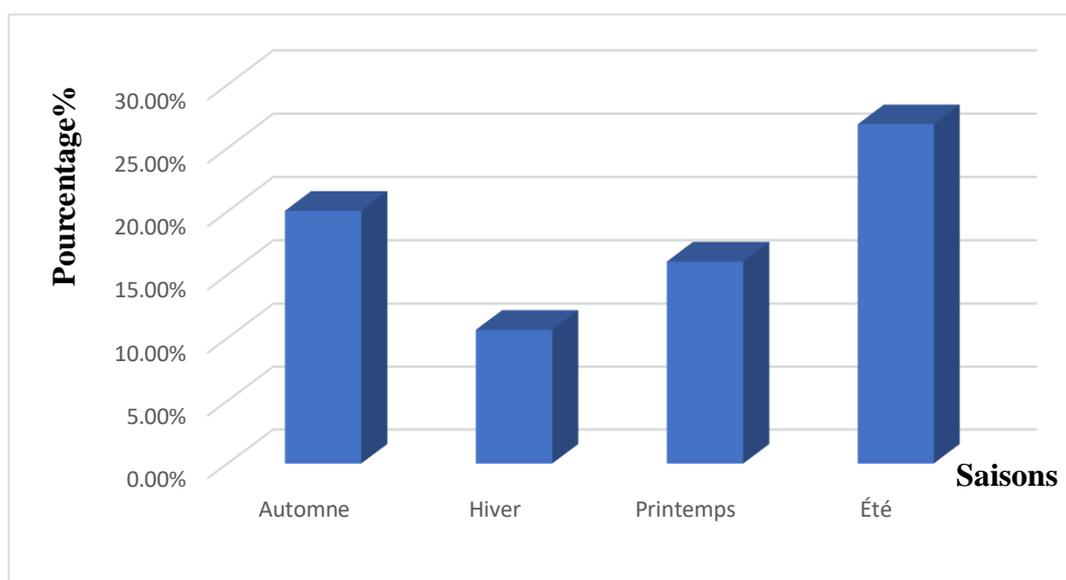
- Une saison chaude, caractérisée par des températures moyennes mensuelles maximales enregistrées au mois de juillet avec une température de l'ordre de 27.83°C et au mois d'août avec une température de l'ordre de 28.17 °C.
- Une saison froide, caractérisée par des températures moyennes mensuelles minimales enregistrées aux mois de décembre avec une température de l'ordre de 11.29°C, janvier de 10.16 et février de 10.47°C.
- La moyenne mensuelle est de 18.4 °C.

### **2.2.2. Température saisonnière et annuelle**

L'étude des températures saisonnières et annuelles est cardinale, car c'est elle qui nous permet d'estimer le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

**Tab.6.** Température saisonnières et annuelle de la station météorologique Belkheir Guelma (1989 à 2020).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
T(°C)	24.68	20.46	14.99	11.29	10.16	10.47	12.89	15.46	19.75	24.64	27.83	28.17	18.4°C
Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Été			
	60.13°C			31.92°C			48.1°C			80.64°C			
	20.04%			10.64%			16.03%			26.88%			

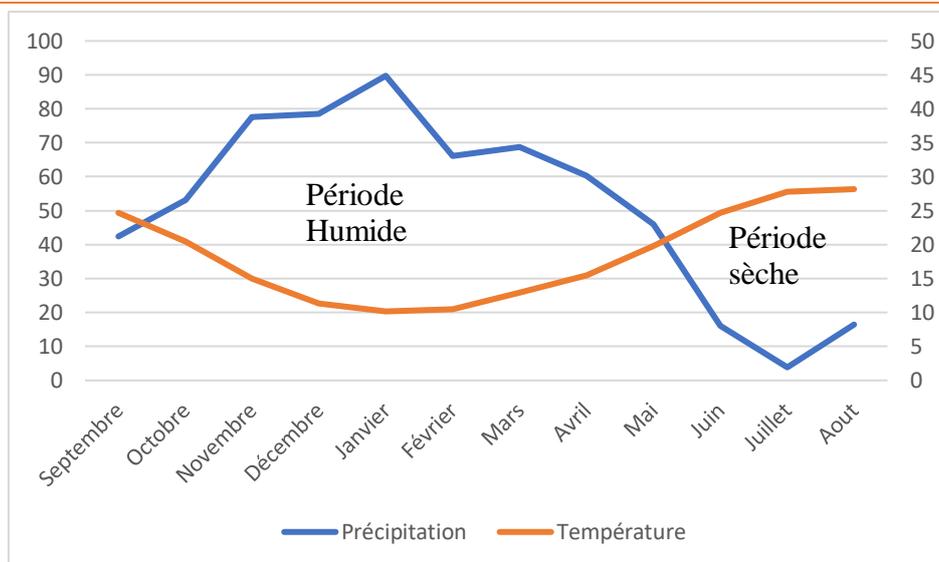


**Fig.9.** Répartition des précipitations saisonnières au niveau de station météorologique Belkheir Guelma (1989-2020).

### 3. Diagramme pluviométrique de Gausson (P=2T).

Un diagramme pluviométrique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures (P = 2T) [12].

La confrontation des données pluviométriques et celle des températures sur le diagramme pluviométrique (Fig.10) révèle que la période sèche s'étale sur quatre mois environ, du mois de juin au mois de septembre alors que la période humide s'étale sur le reste de l'année.



**Fig.10.** Diagramme pluviothermique de la station météorologique Belkheir de Guelma (1989-2020).

#### 4. Type de climat

Pour la détermination du type de climat ; on utilise l'indice de De Martonne pour identifier le type de climat de la région étudiée.

##### 4.1. Indice d'aridité de De MARTONNE (1923)

L'indice d'aridité de **De MARTONNE (1923)** permet de caractériser et de déterminer le type de climat de la région étudiée et d'apprécier deux paramètres l'une est la précipitation moyenne annuelle et l'autre la température moyenne annuelle.

La formule de De Martonne est la suivante :

$$\mathbf{IM = P/(T+10)}.$$

Où :

**IM** : Indice d'aridité annuelle.

**P** : précipitations moyennes annuelles en mm.

**T** : température moyenne annuelle en °C [17].

Selon la valeur d'indice d'aridité de Dr Martonne (1923) on peut déterminer le type de climat de la région de Guelma.

$IM < 5$  : climat hyperaride.

$- 5 < IM < 7,5$  : climat désertique.

- $7,5 < IM < 10$  : climat steppique.
- $10 < IM < 20$  : climat semi-aride.
- $20 < IM < 30$  : climat tempéré. (16)
- $30 < IM < 55$  : Humide. (L'écoulement est abondant).

D'après les calculs de bilan hydrique de la région de Guelma :

Les précipitations moyennes annuelles sont de **618.8mm**.

La température moyenne annuelle est de **18.4°C**.

L'indice de De Martonne **IM=21.79**.

Où  $20 < 20.16 < 30$  ce qui montre que le climat de la région de Guelma est tempéré.

#### 4.1.1. L'indice de l'aridité mensuel de De Martonne (1923).

Le tableau ci-dessous (tab.7) présente les résultats obtenus de calcul de l'indice de l'aridité mensuel de De Martonne 1923. La formule de calcul utilisé est la suivante :

$$IDM = 12P / (T + 10).$$

**IDM** : Indice d'aridité mensuel.

**P** : Précipitations moyennes mensuelles en mm

**T** : Température moyenne mensuelle en °C [11].

**Tab.7.** Indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923) en fonction de la température moyenne mensuelle et de la précipitation moyenne mensuelle de la région de Guelma.

Mois	Précipitation(mm)	Température(C°)	Aridité
Septembre	42.43	24.68	14.68
Octobre	53.13	20.46	20.93
Novembre	77.51	14.99	37.22
Décembre	78.45	11.29	44.22
Janvier	89.73	10.16	53.41
Février	66.19	10.47	38.80
Mars	68.72	12.89	36.03
Avril	60.19	15.46	28.37
Mai	46.00	19.75	18.55
Juin	16.04	24.64	5.56
Juillet	3.85	27.83	1.22
Août	16.51	28.17	5.19

## 5. Hydrologie

L'hydrologie est la science de l'eau soit en forme de Molécule ou d'état comme gaz, liquide ou solide, l'eau voit son étude ressortir à la physique et à la chimie.

Elle est aussi une discipline issue des sciences naturelles qui s'appuie sur le cycle de l'eau et ses propriétés. Son étude concerne les océans, les eaux de surface, mais aussi les nappes phréatiques.

Un bilan hydrologique est un document essentiel pour accompagner la gestion des eaux et améliorer la consommation de chacun [26].

### 5.1. Estimation des paramètres du bilan hydrique

Le but principal du bilan hydrologique est de comptabiliser les apports et les pertes en eau d'un bassin versant, autrement dit de quantifier les transferts d'eau issus des précipitations [12].

$$P \text{ (mm)} = Ex \text{ (mm)} + ETR \text{ (mm)} \text{ avec } Ex = I + R \pm VR$$

Avec :

**P** : précipitation moyenne annuelle (mm).

**Ex** : excédent moyen annuel (mm).

**ETR** : évapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm).

**I** : infiltration (mm).

**R** : ruissellement (mm).

**VR** : variation de la réserve, généralement très faible [12].

#### 5.1.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par évapotranspiration sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol/substrat et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau [23].

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle on utilise la formule de Thornthwaite.

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

$$i = \left( \frac{T}{5} \right) ; \quad I = \sum_i^{12} i \quad ; a = 1.6 \frac{I}{100} + 0.5$$

Où :

**ETP** : évapotranspiration potentielle du mois considéré en mm

**T** : Température moyenne mensuelle en °C ;

**i** : Indice thermique mensuel ;  $i = \left( \frac{T}{5} \right)$

**I** : Indice thermique annuel :  $I = \sum_i^{12} i$

**K** : coefficient ajustement ;

**a** : l'exposant climatique donné par la formule :  $a = 1.6 \frac{I}{100} + 0.5$  [12].

Les résultats obtenus sont expliqués dans le tableau (Tab.8) du bilan hydrique.

### 5.1.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

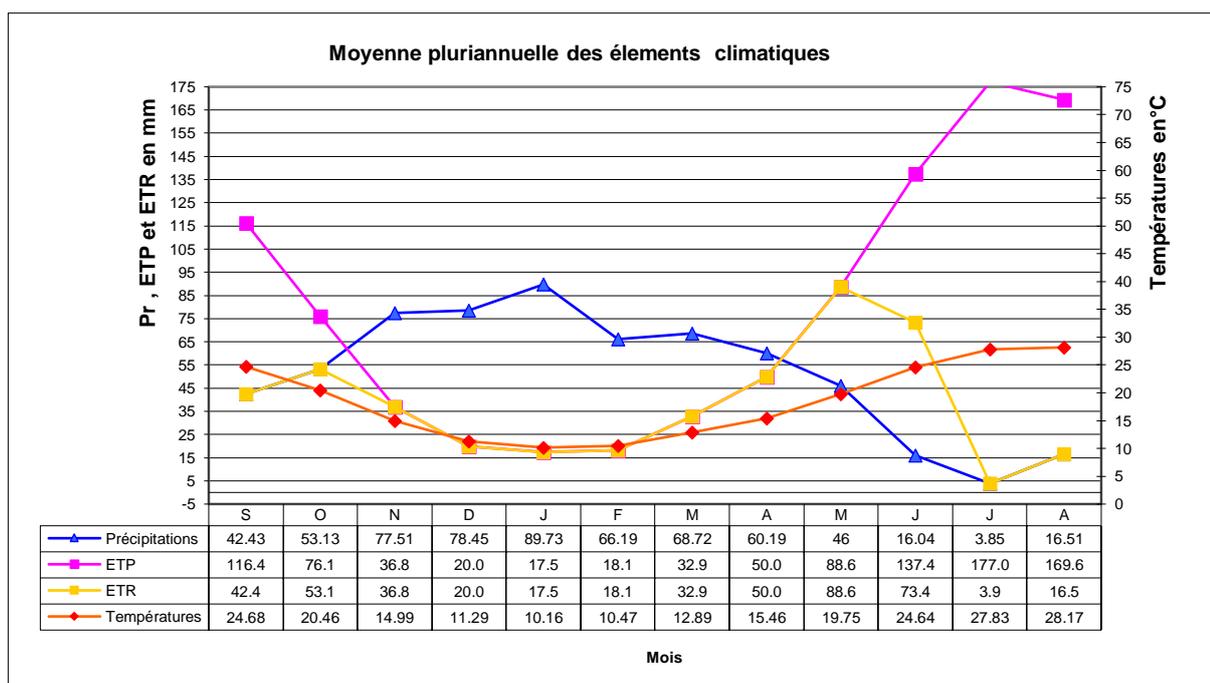
Pour le calcul de l'ETR Thornthwaite a considéré deux cas :

Pour un mois  $P \geq ETP$ , on pose  $ETP = ETR$ , la quantité d'eau qui reste ( $P - ETR$ ) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur, il y'aura un excédent (EX) qui va partir sous forme d'infiltration efficace vers la nappe soit sous forme de ruissellement.

Pour un mois  $P < ETP$  la valeur de  $ETP = P + RFU$  jusqu'à l'égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole  $DA = ETP - ETR$ , ce dernier paramètre représente alors le besoin de culture à l'irrigation [17].

**Tab.8.** Bilan hydrique selon la méthode de C.W. Thornthwaite au niveau de la Station météorologique de Guelma (1989-2020).

Mois	P	T	i	K	ETP <sub>(c)</sub>	ETR	RFU	BH	VR	Déf	Exd
Septembre	42,43	24,68	11.2	1,03	116.4	42.4	0.00	-71.0	0.00	74.0	0.00
Octobre	53,13	20,46	8.4	0,97	76.1	53.1	0.00	-23.0	0.00	23.0	0.00
Novembre	77,51	14,99	5.3	0,86	36.8	36.8	40.7	40.7	40.7	0.00	0.00
Décembre	78,45	11,29	3.4	0,81	20.0	20.0	99.2	58.5	58.5	0.00	0.00
Janvier	89,73	10,16	2.9	0,87	17.5	17.5	100.00	72.3	0.8	0.00	71.4
Février	66,19	10,47	3.1	0.85	18.1	18.1	100.00	48.1	0.00	0.00	48.1
Mars	68,72	12,89	4.2	1.03	32.9	33.9	100.00	35.8	0.00	0.00	35.8
Avril	60,19	15,46	1.5	1.10	50.0	50.0	100.00	10.2	0.00	0.00	10.2
Mai	46,00	19,75	8.00	1.21	88.6	88.6	57.4	-42.6	-42.6	0.00	0.00
Juin	16,04	24,64	11.2	1.22	137.4	73.4	0.00	-121.4	-57.4	64.10	0.00
Juillet	3,85	27,83	13.5	1.24	177.0	3.9	0.00	-173.2	0.00	173.2	0.00
Août	16,51	28,17	13.7	1.16	169.6	16.5	0.00	-153.1	0.00	153.1	0.00
<b>Total</b>	<b>618.8</b>	<b>18,4</b>	<b>90.4</b>		<b>940.4</b>	<b>453.2</b>		<b>-380.1</b>		<b>487.2</b>	<b>165.5</b>



**Fig.11.** La moyenne pluriannuelle des paramètres climatiques (précipitation, ETP, ETR) de la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2020).

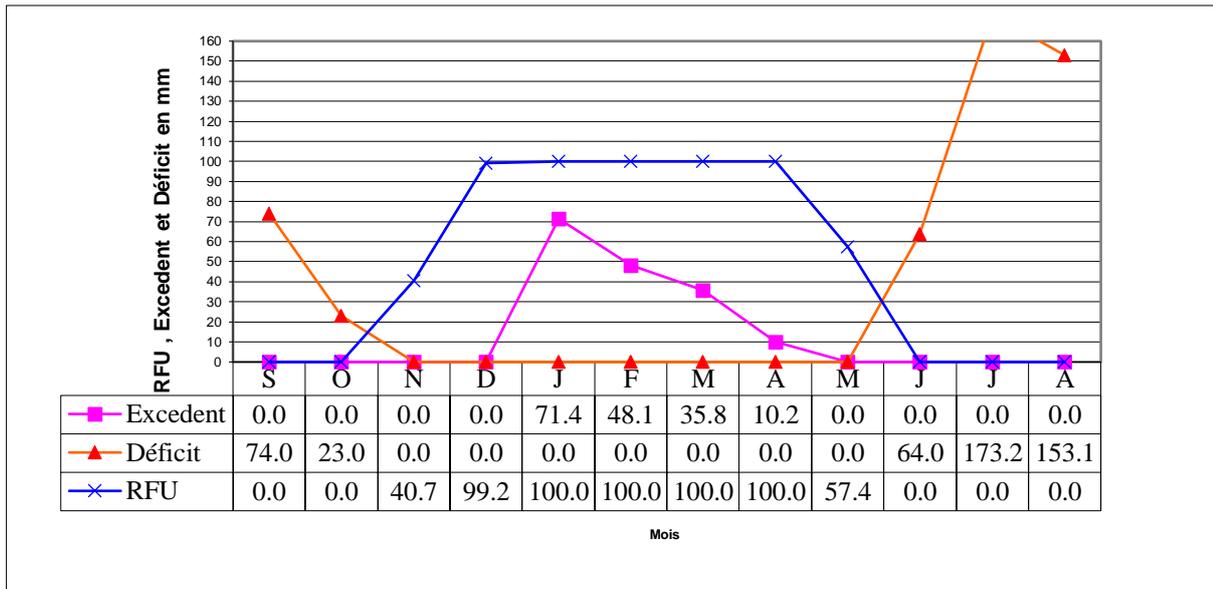


Fig.12. La moyenne pluriannuelle des éléments climatiques (RFU, Excedent et Déficit) de la station météorologique Belkheir Guelma (1989-2020).

**5.1.3. Estimation du ruissellement**

La lame d'eau ruisselée sera estimée à l’aide de la formule de Tixeront – Berkaloff qui s’écrit de la manière suivante :

$$R = P^3 / 3 (ETP)^2 [12].$$

**R** : ruissellement moyen annuel (mm) ;

**P** : précipitation moyenne annuelle (mm) ;

**ETP** : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm).

On a : **P= 618.8mm, ETP =940.4mm** ; ce qui donne un ruissellement de : **R = 89.31mm.**

**5.1.4. Estimation de l’infiltration**

L’infiltration Représente la quantité d’eau absorbée par le sol et le sous-sol, pour constituer l’eau de rétention, des eaux souterraines et des écoulements souterrains, et reconstitution des réserves souterraines. Elle est calculée à partir de la formule du bilan.

$$P = ETR + I + R$$

Donc:

$$I=P-(ETR+R)$$

Où ;

**I** = Infiltration (mm)

**P** = Précipitations annuelle moyenne (mm).

**ETR** = Evapotranspiration réelle (mm).

**R** = Ruissellement (mm) [17].

**I = 76.29mm.**

### Conclusion

La synthèse des données climatiques nous permet de distinguer que la région d'étude est soumise à un climat méditerranéen, elle est caractérisée par deux saisons distinctes, l'une pluvieuse humide à précipitations relativement élevées et des températures basses, l'autre sèche moins pluvieuse et avec des températures relativement élevées.

La température moyenne annuelle est **18.4 C°**, et la moyenne annuelle des précipitations est de **618.8mm**.

L'étude du climat en utilisant l'indice d'aridité de De Martonne a montré que notre secteur d'étude est en zone tempérée. Elle est marquée par une évapotranspiration réelle (ETR) de **453.2mm** des précipitations, alors que la lame d'eau ruisselée constitué **89.31mm** et de la lame d'eau infiltrées de l'ordre **I = 76.29mm**.

# Chapitre IV

## Aperçu hydrogéologique

## Introduction

Dans la région de Guelma les ressources en eau disponibles deviennent de plus en plus insuffisantes à cause de l'accroissement de la demande, pour les besoins humains, industriels et agricoles, qui deviennent de plus en plus importante.

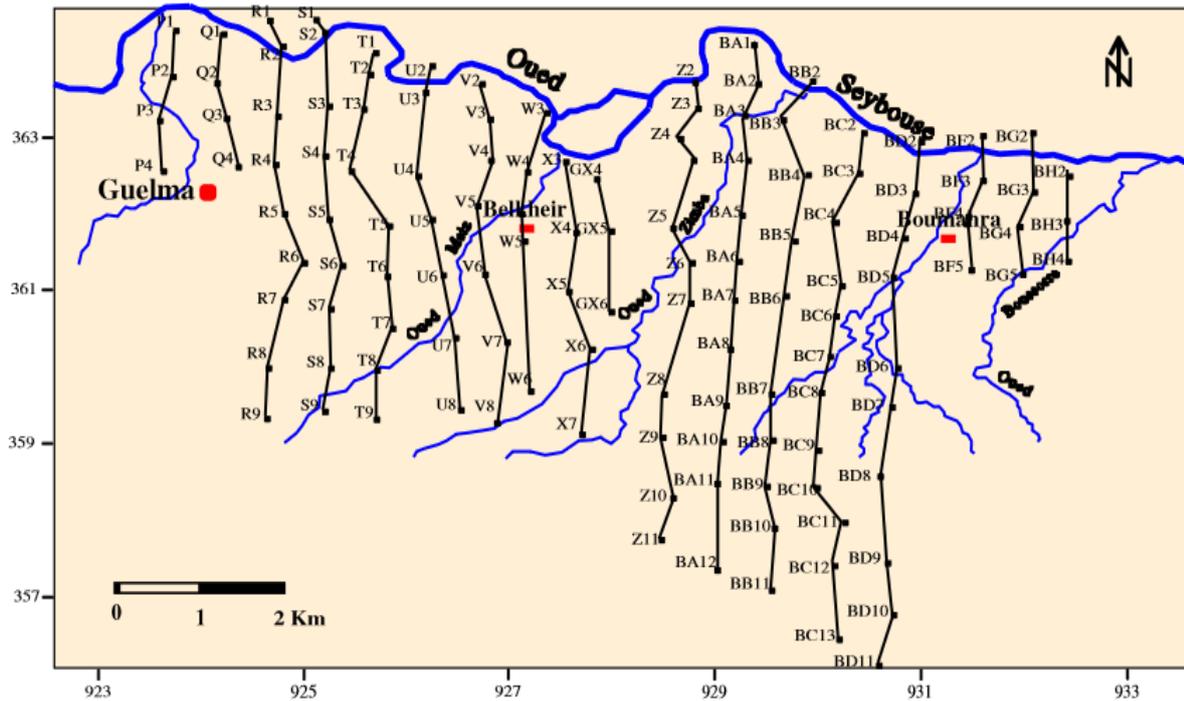
L'effet des périodes de sécheresse de plus en plus longue a aggravé cette situation qui risque de poser un problème de disponibilité de la ressource dans l'avenir. Les études hydrogéologiques réalisées ont permis l'identification de plusieurs aquifères dans la zone d'étude. Ces dernières se succèdent de manière discontinue et hétérogène [17].

### 1. Géométrie de l'aquifère :

#### 1.1. Prospection géophysique :

Les méthodes électriques sont des méthodes classiques très utilisées en hydrogéologie. Elles se basent sur la mesure de la résistivité des formations géologiques. Les formations géologiques possèdent très souvent des résistivités spécifiques restant approximativement constantes, en tous les cas localement, alors qu'elles varient considérablement d'une formation à l'autre [17].

La plaine de Guelma a fait l'objet de deux campagnes géoélectriques : (Fig.13)  
Etude géophysique par prospection électrique a été réalisée par la C.G.G (compagnie générale de géophysique) En 1971 dans le bassin de Guelma, en vue de reconnaître et localiser les horizons aquifères. Les sondages électriques ont été disposés suivant des profils Nord-Sud espacés d'environ 500 m à 700 m avec des sondages électriques distants de 500 m à 1km. Les 238 sondages ont été réalisés dans la région, ont été répartis sur 50 profils géoélectriques. La campagne géophysique a été effectuée selon les lignes d'injection AB de 300 m. La profondeur d'investigation moyenne est 150 m Une deuxième campagne géophysique : Entreprise Nationale de la Géophysique (ENAGEO) pour le compte de la direction de l'hydraulique de Guelma (DHW-Guelma) « prospection électrique par SEV dans la région de Guelma », avec un total de 80 sondages suivant des profils d'orientation presque NE-SW sur la zone des terrasses anciennes de la vallée de la Seybouse [17].



**Fig.13.** Carte de position des sondages électriques de la plaine de Guelma (CGG.1971, in Kachi. N 2015).

### 1.2. Echelle de résistivité

Une corrélation entre l'échelle de résistivité et la lithologie des couches géologiques traversées par les sondages électriques, nous a permis d'identifier les formations perméables qui s'avèrent les plus intéressantes du point de vue hydrogéologique [17]. (Tab.9).

**Tab.9 :** Échelle de corrélation entre la résistivité et la lithologie selon CGG (1971)  
(modifiée).

Age	Lithologie et Résistivité	Perméabilité
Plio-quaternaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niveau sec : <math>200 \leq \rho \leq 400</math> ohm-m</li> <li>• Niveau humide : <math>70 \leq \rho \leq 150</math> ohm-m</li> <li>• Sable et gravier : 10 à 200 ohm-m</li> <li>• Sable et gravier à passées argileuses : 50 à 80 Ohm-m</li> <li>• Limon sableux de 15 à 50 ohm-m</li> <li>• Limon argileux de 10 à 80 ohm-m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formation perméable</li> <li>• Formation imperméable</li> </ul>
Substratum miocène	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marno-calcaire de 15 à 30 ohm-m</li> <li>• Marno-sulfo- gypseuse de 1 à 8 ohm-m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formation imperméable</li> <li>• Formation imperméable</li> </ul>
Substratum numidien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Argile de 10 à 48 ohm-m</li> <li>• Argile gypseuse de 15 à 30 ohm-m</li> <li>• Grès de 40 à 70 ohm-m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formation imperméable</li> <li>• Formation imperméable</li> <li>• Formation perméable</li> </ul>

### 1.3. Interprétation des coupes géoélectriques

L'interprétation des résultats des coupes géoélectriques dans la zone d'étude en se basant sur la lecture des résistivités des formations traversées, a permis de faire une description lithologique des formations géologiques susceptibles de présenter un intérêt aquifère.

La figure (14.a), montre une partie centrale épaisse et résistante (80  $\Omega$ m) correspondant à la nappe alluvionnaire limitée par deux failles correspondant aux axes des Oueds Maïz et Zimba. Cette partie peut présenter un intérêt aquifère [22].

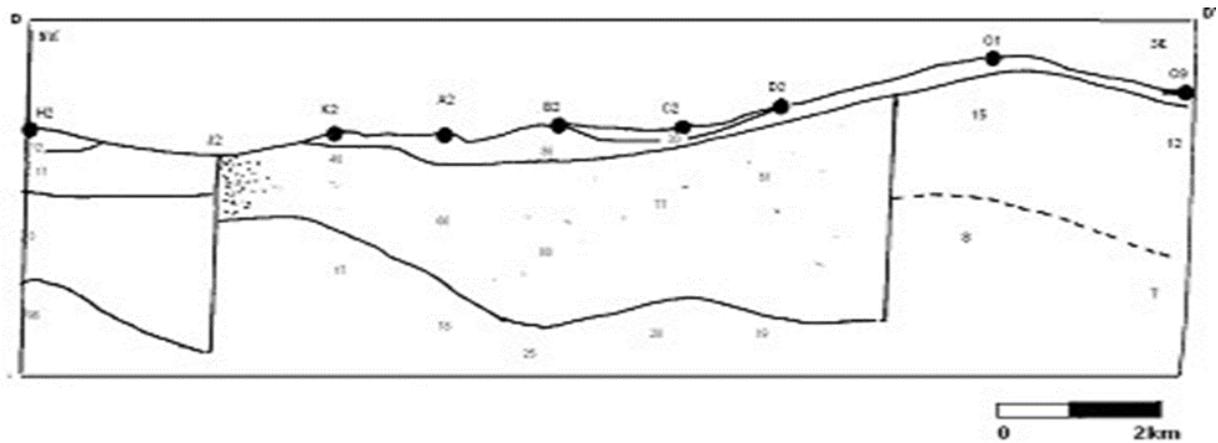


Fig.14.a : Coupe géoélectrique DD'.

De part et d'autre, cette partie est limitée par deux horizons de faibles résistivités que l'on peut attribuer aux marnes argileuses. La figure (14.b), montre aussi entre les points de sondage, A4 et C4, une couche épaisse de 100 à 120 m et de résistivité égale à 150 Ωm que l'on peut attribuer aux alluvions grossières de la nappe et donc d'intérêt aquifère.

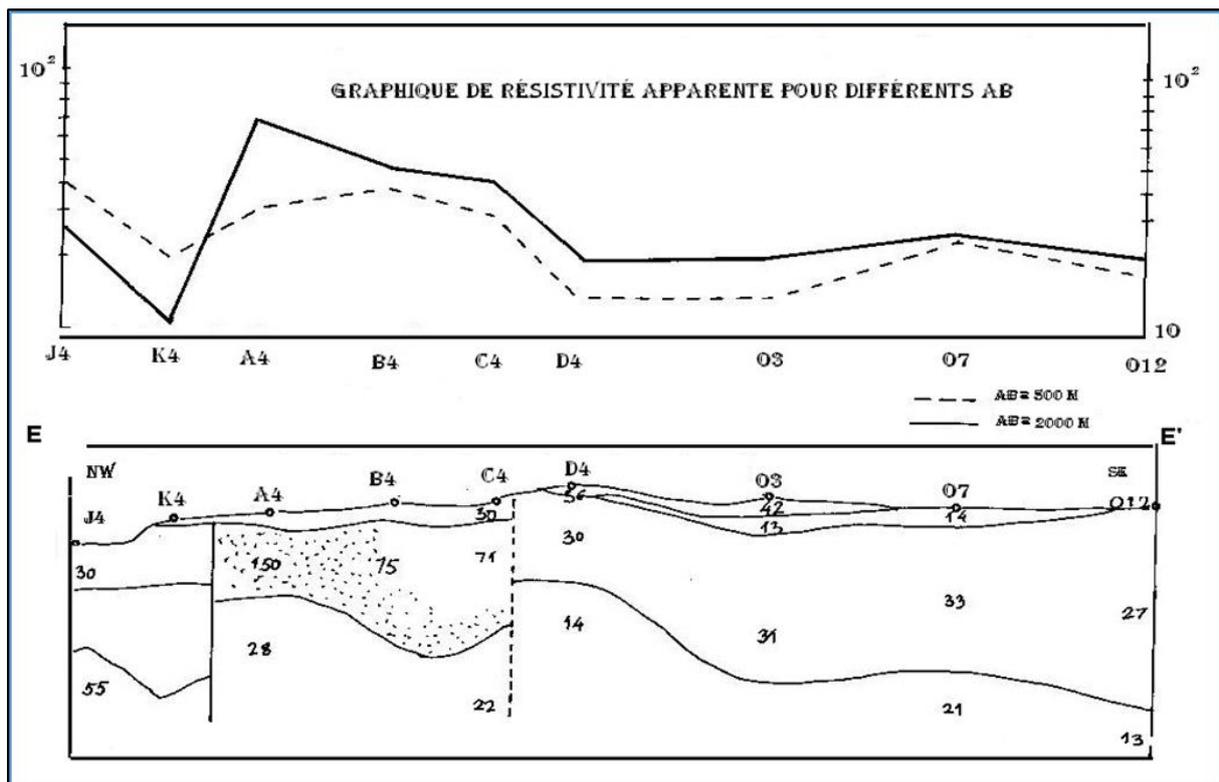


Fig.14.b : Coupe géoélectrique EE'.

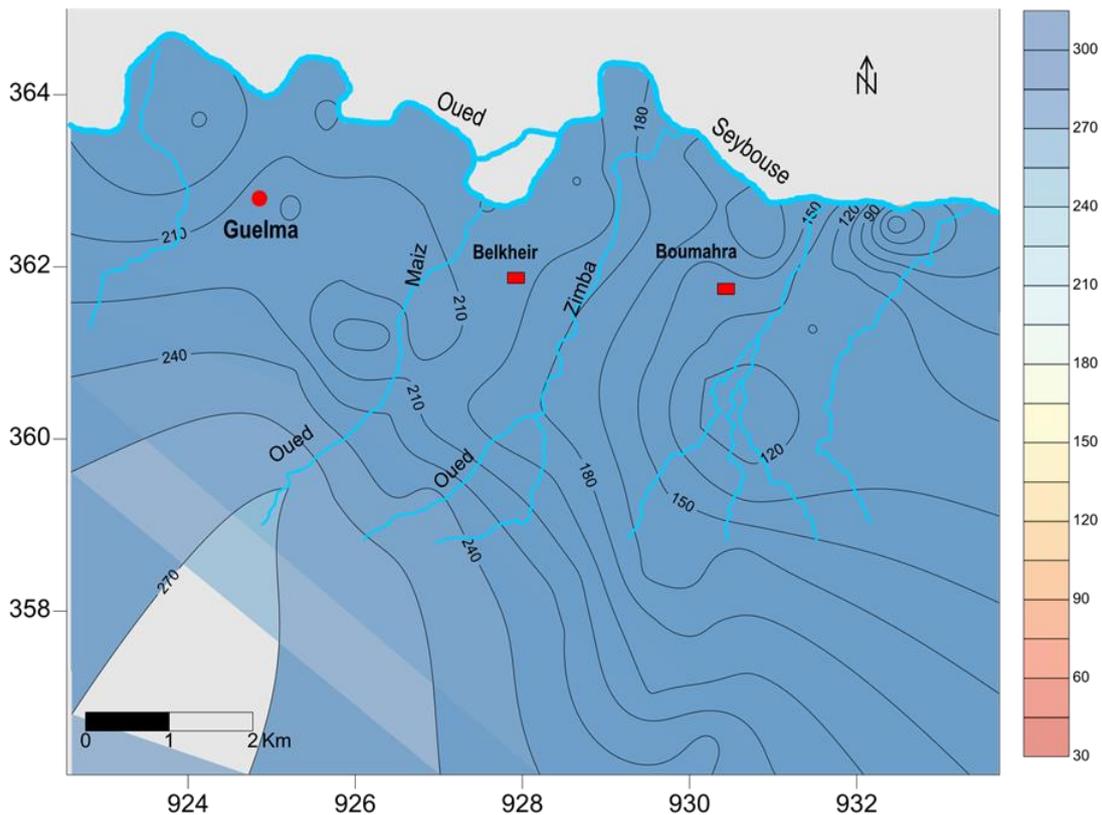
### 1.4. Carte du Substratum

La carte de la profondeur du toit du substratum par rapport au sol a été réalisée à l'aide des coupes transversales des sondages géoélectriques établies dans la zone d'étude (Fig.15).

Le substratum imperméable est formé par des marnes à gypses et d'argiles du Miocène de résistivité de 1 à 8 ohm-m, jusqu'à l'Oued Boussora. Vers l'Est, il est constitué d'argiles éocènes [11].

La profondeur du toit de substratum varie entre 30 et 270 m d'altitude dans la zone d'étude, ce qui traduit un bassin d'effondrement de la plaine de Guelma, comblé par des dépôts alluvionnaires du plio-quaternaire.

Le substratum est moins profond au Sud de Guelma avec 270 m d'altitude. Il afflue en surface dans certains endroits où on note l'émergence de plusieurs sources marquant les séparations des terrasses à savoir les sources de : Ain Guettich, Jurodon et Oued Maïz [11].



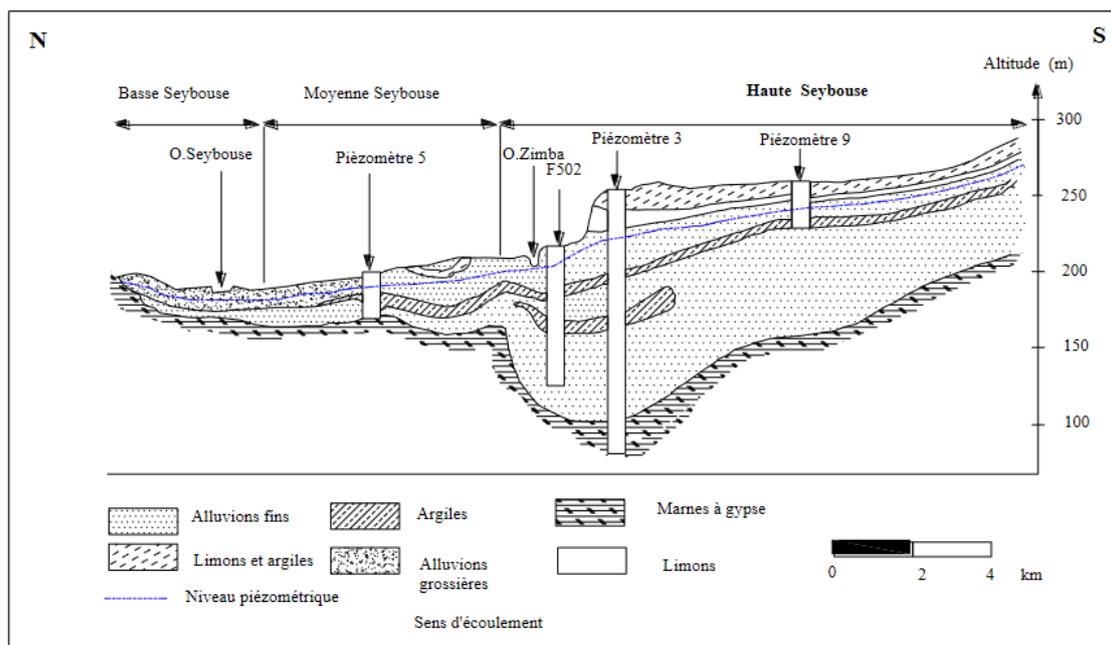
**Fig.15.** Carte du toit du substratum imperméable de la nappe alluviale de Guelma (Kachi.N, 2015)

## 2. Description hydrogéologique de la nappe alluviale

### 2.1. Coupe hydrogéologique Nord-Sud n°1 (d'après Gaud) :

Cette coupe est d'orientation Nord –Sud (fig.16) traverse la ville de Belkheir à l'Est. Nous observons presque les mêmes ensembles aquifères : Les alluvions grossières (cailloutis et sable), d'une épaisseur de 15 m environ, forment la basse terrasse, d'une épaisseur de 30 m environ, avec la présence d'un horizon argileux, d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 8 m, qui s'intercale dans les alluvions pour former la moyenne terrasse.

Cette couche est plus importante avec ses 100 m d'épaisseur, en moyenne, (elle atteint 110 m, forage G2). Elle est formée essentiellement de dépôts plio-quaternaires grossiers, constitués de cailloutis et de graviers avec de petites lentilles d'argiles de faible épaisseur au niveau des forages BK1. La colonne stratigraphique du forage G2 indique une nature semi perméable. L'ensemble forme les hautes terrasses [6].



**Fig.16** : Coupe hydrogéologique NNW-SSE (d'après Gaud).

## 2.2. Coupe hydrogéologique Nord –Sud n°2 (d'après Gaud)

Cette coupe est établie à l'Ouest de Belkheir mais toujours d'orientation Nord–Sud (fig.17).

Nous distinguons du Nord au Sud quatre nappes aquifères différentes :

- Au Nord, la basse terrasse formant la nappe actuelle de la Seybouse. Elle est constituée par des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 10 m reposant sur un substratum marneux à gypse ;
- La moyenne terrasse est constituée d'un matériel relativement fin en alternance avec des passées argileuses d'une épaisseur plus au moins importantes d'environ 40 m et repose sur un substratum marneux à gypse
- La haute terrasse a une épaisseur plus importante (plus de 90 m), grâce à un remplissage alluvionnaire, composé essentiellement de sables, graviers et de cailloutis avec de petites intercalations argileuses.
- La forme du substratum marneux témoigne de l'ancien lit de la Seybouse qui été positionné plus au Sud que son parcours actuel. L'affleurement des marnes à gypse du Miocène forme un seuil qui sépare les nappes aquifères des vallées ancienne et actuelle.
- La partie sud est occupée par les calcaires travertineux du Pliocène qui sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses. D'après la colonne stratigraphique du piézomètre P3, il s'agit de tufs vacuolaires ou spongieux, de calcaires blancs crayeux fissurés avec de nombreuses recristallisations de calcite [6].

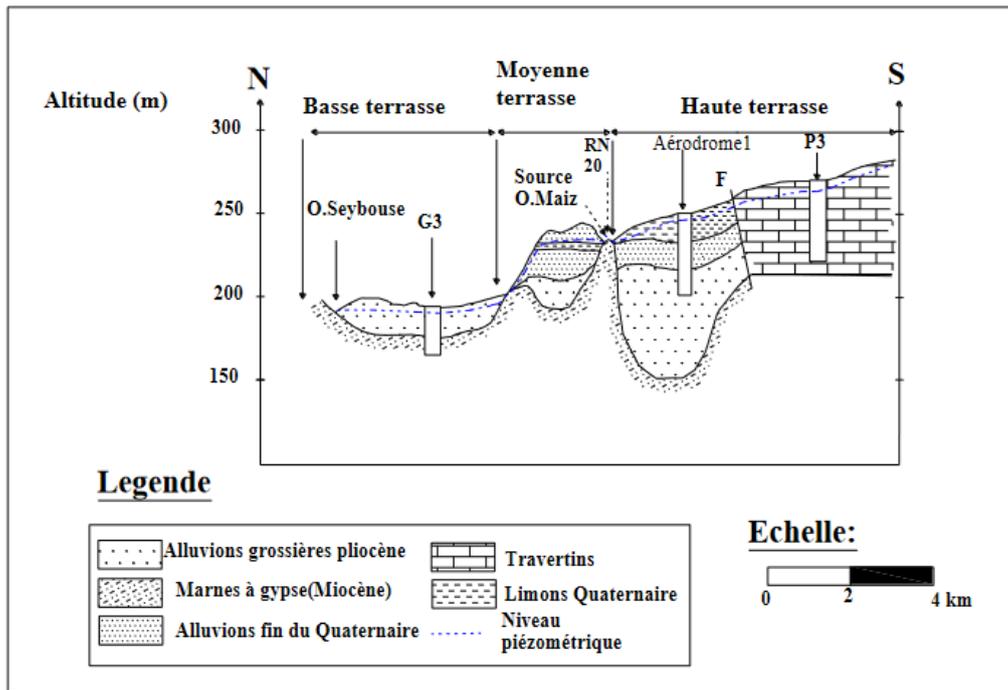


Fig.17. Coupe hydrogéologique Nord –Sud (d’après Gaud).

### 3. La piézométrie :

L’inventaire et la mesure du niveau d’eau dans les points d’eau, sur un fond topographique, a permis l’établissement de la carte piézométrique, qui est la base de toute étude hydrodynamique, car elle permet d’avoir des informations sur le sens d’écoulement des eaux souterraines, des zones d’alimentation et de résurgences de la nappe et la répartition du gradient hydraulique [6].

D’après la figure 18 qui représente la surface piézométrique réalisée au mois de Décembre en 2013 et modifiée par Latifi .S 2017 nous remarquons que l’écoulement se forme au Sud et se dirige vers l’Oued Seybouse au Nord. La morphologie des courbes isopièzes qui se resserrent parallèlement dans la partie Sud –Ouest de la ville de Guelma (zone des travertins) indique que la nappe des travertins alimente celle des alluvions. Ce resserrement signale l’importance du gradient hydraulique dans cette zone et qui est de l’ordre de 0,06 [6].

La partie centrale de la plaine (entre Boumahra Ahmed et Belkheir) est marquée par une augmentation de l’espacement entre les isopièzes impliquant une diminution sensible du gradient qui passe à des valeurs moins à 0,025. Le sens d’écoulement est toujours du Sud vers le Nord [6].

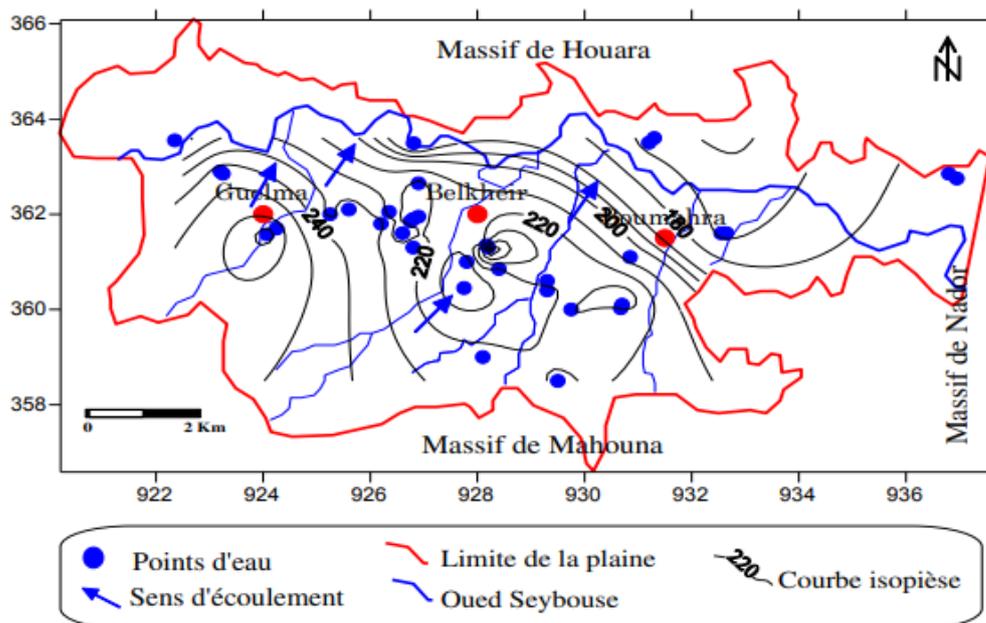
- Dans l'extrémité sud –Est une zone d'alimentation apparaît aux limites de la plaine des alluvions avec la molasse argilo-gréseuse mais les valeurs de gradient sont moyennes de l'ordre de 0,04.
- Dans les alluvions situées sur la rive Nord de l'Oued Seybouse, le sens d'écoulement est Nord –Sud, c'est-à-dire à partir du piémont du Djebel Houara vers l'Oued Seybouse [6].

D'après la forme des courbes, nous constatons l'existence de trois axes de drainage d'orientation générale Nord –Sud, Ces axes sont situés le long des affluents principaux de l'Oued Seybouse (O. Boussora, O. Zimba et O. Maïz). Cependant il y a trois lignes de partage des eaux :

La première est située au Sud de Boumahra entre Chaâbat El Meklouka et Oued Boussora

La deuxième entre les oueds Zimba et Maïz

La troisième située à l'Ouest de la ville de Guelma séparant ainsi les travertins des alluvions [6].



**Fig.18.** Carte piézométrique de la zone d'étude. (Décembre, 2013) in (Latifi.S.2017)



Les terrasses sont constituées d'alluvions qui recèlent des potentialités hydriques importantes. Elles sont alimentées en partie par l'aquifère des travertins situés à l'amont.

L'aquifère est drainé par l'Oued Seybouse, qui sillonne le bassin d'Ouest en Est D'après la carte piézométrique établie, l'oued Seybouse draine la nappe, où l'écoulement se fait généralement du sud vers le nord. A l'ouest, la nappe des hautes terrasses se fait alimentée latéralement par les travertins.

La nappe des hautes terrasses, alimente la nappe des basses terrasses, suivant un axe de drainage d'orientation sud-ouest-nord est. La transmissivité est importante, au niveau de la nappe des basses terrasses, où les plus fortes valeurs sont observées au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse, où les alluvions deviennent plus grossières dépourvues de la matrice argileuse [17].

# Chapitre V

## Aperçu hydrochimique

## Introduction

L'étude de la chimie des eaux souterraines apporte une somme considérable de renseignements utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans les systèmes aquifères, dans les échanges possibles entre l'eau et la roche, sachant que la minéralisation des eaux souterraines peut provenir de l'acquisition des éléments chimiques par la dissolution et l'altération des minéraux du réservoir [19].

Par manque de données, cette étude hydrochimique a concerné uniquement les analyses de quatre forages répartis le long de l'axe de la région Guelma Belkheir et Boumahra (Fig.20), effectuées par le laboratoire d'analyses des eaux dans la station de traitement des eaux de Hammam Debagh, pendant la période des hautes eaux de l'année 2021, pour avoir une idée sur le faciès chimique, la qualité et le degré de la pollution des eaux souterraines du bassin de Guelma.

Dans cette étude nous avons utilisé les paramètres physique ( $T^{\circ}\text{C}$ , pH et CE), les éléments majeurs (Ca, Mg, Na+K, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ ) en plus des éléments indicateurs de pollution ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  et  $\text{PO}_4^{3-}$ )

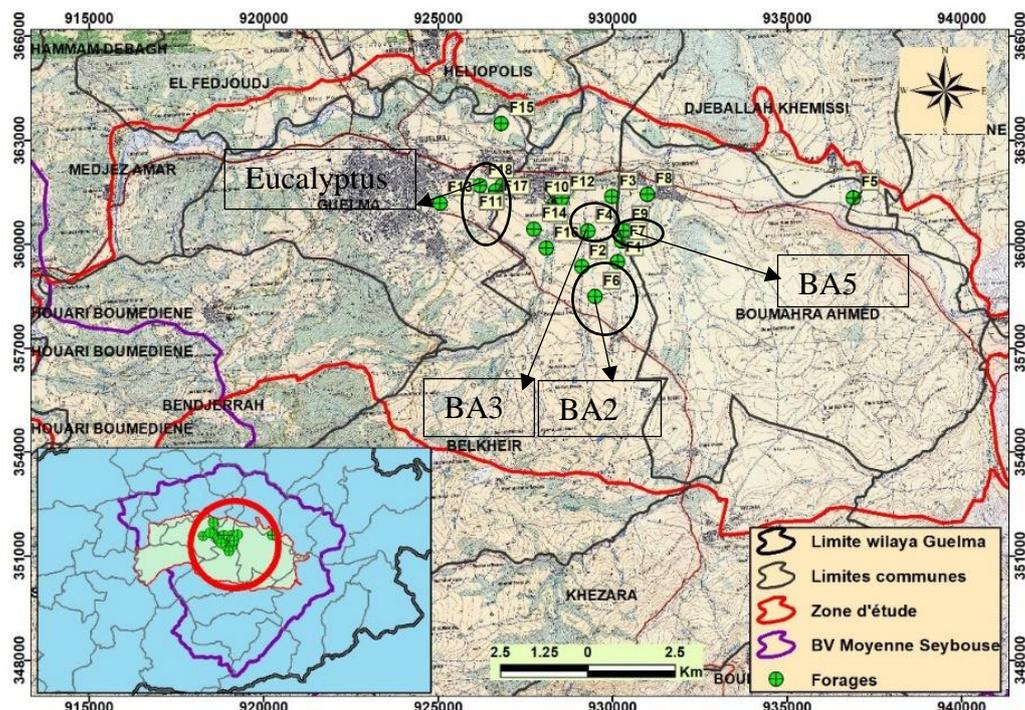


Fig.20. Carte d'inventaire des points de prélèvement (Taïba. Z et Aidoudi.I,2021).

### 1. Caractéristiques physico-chimiques

Le tableau ci-dessous montre les résultats d'analyses chimiques des quatre forages utilisés dans cette étude.

Forages	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<b>BA2(Belkheir)</b>	148.18	36.45	40.8	284	86	298.9	0	0	19.35
<b>BA5(Boumahra)</b>	141.77	34.57	36.8	213	118.5	286.7	0	0	12.95
<b>BA3(Belkheir)</b>	128.16	25.76	33.2	170.4	697.5	274.5	0.0017	0.001	6.479
<b>Eucalyptus (O. Maïz. Guelma)</b>	159.39	14.58	33.6	156.2	24	315.98	0.11	0.002	17.747

**Tab.10.** Analyses physico-chimiques des forages (ADE ,2021).

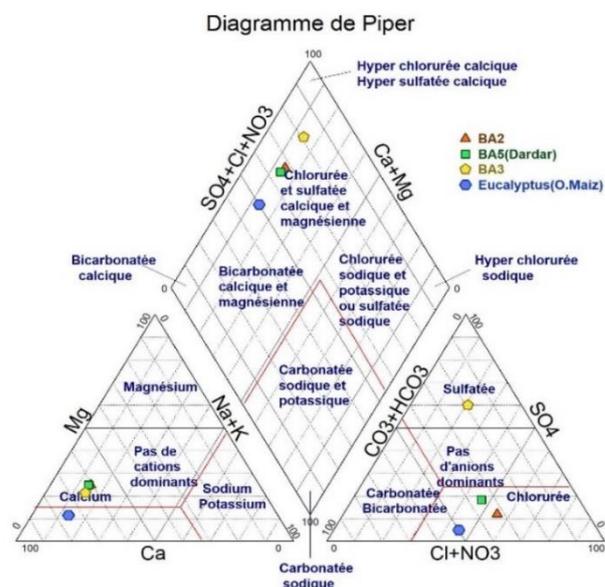
## 2. Détermination du faciès chimique :

### 2.1.Représentation graphique des faciès hydrochimique :

Dans un but de bien identifier le faciès hydrochimique et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines des forages, une représentation graphique des résultats d'analyses a permis de réaliser le diagramme de Piper et de Stabler, en utilisant le logiciel Diagramme, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004) [13].

#### 2.1.1. Classification de Piper :

Le diagramme de Piper a permis de classer et d'identifier le faciès chimique des eaux de forage prélevées (BA2, BA5, BA3 et Eucalyptus).



**Fig.21.** Faciès chimiques des eaux des forages étudiés selon Piper.

- Dans le triangle des cations, le calcium est le plus dominants par rapport au Magnésium et au sodium,
- Dans le triangle des anions, ce sont les chlorures et les sulfates qui sont les plus abondants, les bicarbonates sont peu fréquents.
- Ainsi, dans le digramme losangique, l'évolution chimique est alors marquée par un positionnement au centre du premier petit losange, Le diagramme, fait alors ressortir un faciès chimique : Chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes, Ce faciès indique une dissolution évaporitique riche en sels et en gypse.

### 2.1.2. Formule caractéristique de Stabler :

La formule caractéristique selon Stabler consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale.

$$r \% = \left(\frac{100}{c}\right) \times r$$

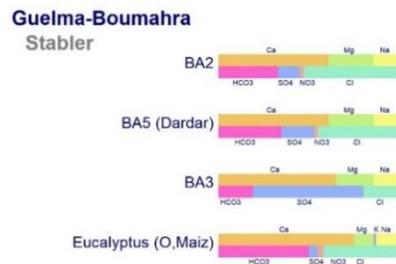
Avec r: la quantité en réaction de l'ion considéré en (mécq/l) ;

c : la concentration totale[13].

Les résultats obtenus sont classés séparément les anions et les cations par ordre décroissant, dans le tableau suivant :

**Tab.11.** Faciès chimiques des eaux des forages étudiés selon la méthode de Stabler (2021).

Forages	Formules caractéristiques		Faciès chimiques
	r % Anions	r % Cations	
BA2(Belkheir)	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> > NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup> > Mg <sup>2+</sup> > Na <sup>+</sup> > K <sup>+</sup>	Chloruré calcique
BA5(Boumahra)	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> > NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup> > Mg <sup>2+</sup> > Na <sup>+</sup> > K <sup>+</sup>	Chloruré calcique
BA3(Belkheir)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> > Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> > NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> > PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> > NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup> > Mg <sup>2+</sup> > Na <sup>+</sup> > K <sup>+</sup>	Sulfaté- calcique
Eucalyptus (O. Maïz. Guelma)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> > NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> > NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup> > Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> > K <sup>+</sup>	Bicarbonaté- calcique



**Fig.22.** Faciès chimiques des eaux des forages étudiés selon Stabler.

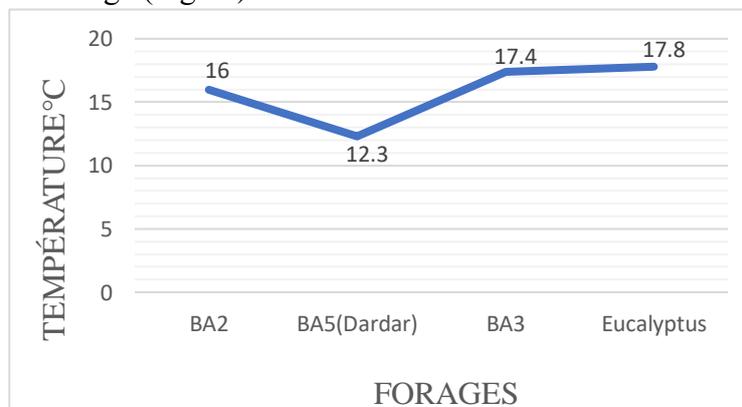
### 3. Variation des paramètres physico-chimiques

#### 3.1. Paramètres physiques

##### 3.1.1. La température

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et elle dépend des échanges thermiques avec l'air ambiant et du rayonnement solaire et permet également d'influencer les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température [13].

Les valeurs de température des eaux dans les forages étudiés varient de 12.3 à 17.8 °C ce qui permet de dire que cet élément est influencé par la température de l'environnement durant la période d'échantillonnage (Fig.23).



**Fig.23.** Variation de la température dans les eaux de forages étudiés (2021).

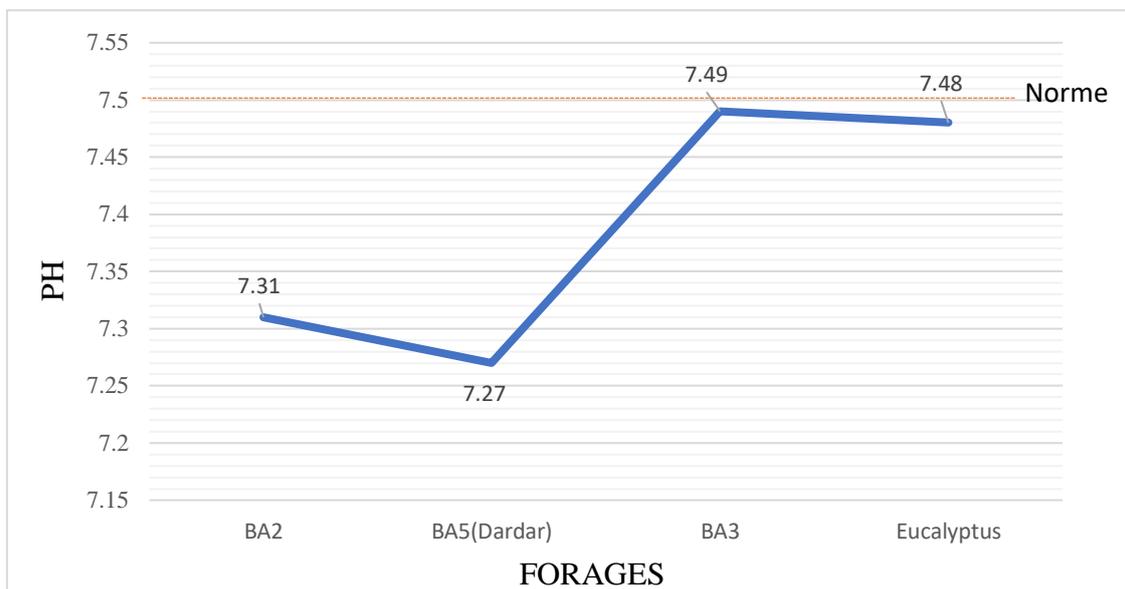
### 3.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions  $H^+$  dans l'eau.

Ce paramètre caractérise l'équilibre physico-chimique et dépend des facteurs multiples dont l'origine de l'eau.

Le pH détermine l'acidité, l'alcalinité et la neutralité des solutions, il est lié à la nature du terrain [12].

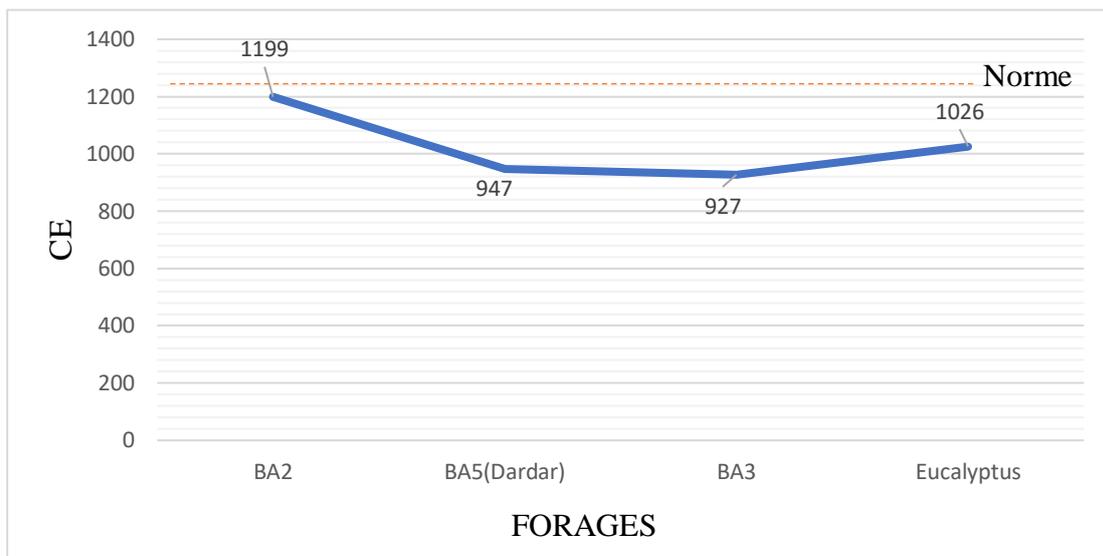
Dans notre étude le pH mesuré dans les quatre forages est de base alcaline variant de 7.27 à 7.49 conformément aux normes mondiales de l'OMS qui varie entre 6.0 et 7.5 (Fig.24).



**Fig.24.** Variation du pH dans les eaux de forages étudiés (2021).

### 3.1.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Sa variation permet de suivre l'évolution de la salinité globale de la chimie de l'eau [12].



**Fig.25.** Variation de la Conductivité électrique dans les eaux de forages étudiés (2021).

D'après la figure ci-dessus, la conductivité électrique mesurée dans les forages varie de 947 à 1199  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . ces valeurs restent dans les normes internationales de potabilité limitées à plus 1200  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

### 3.2. Paramètres chimiques

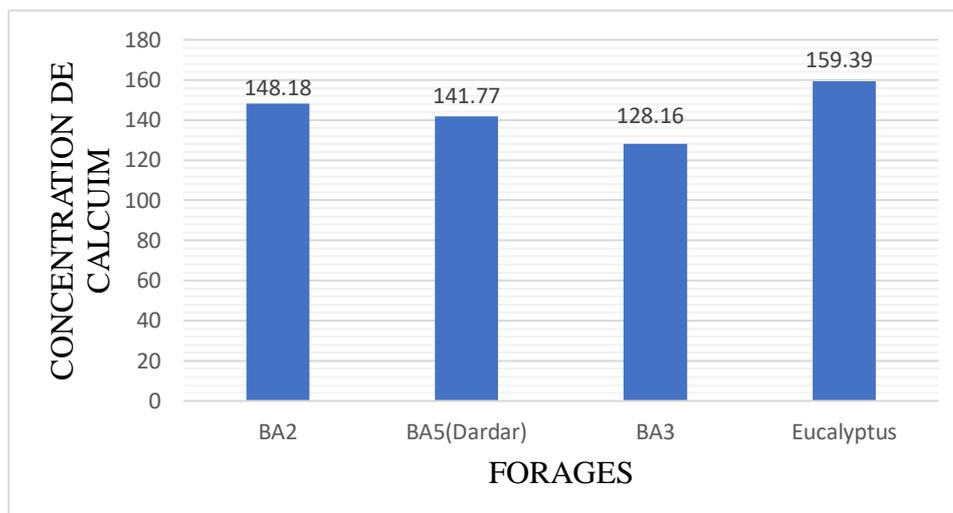
#### 3.2.1. Les cations

##### 3.2.1.1. Le calcium

Sa présence résulte principalement de l'infiltration des eaux météoriques à travers des formations carbonatées. La dissolution qui s'en suit est favorisée par le gaz carbonique provenant de l'atmosphère et du sol [6].



Il existe surtout à l'état de bicarbonates et en quantités moindres sous forme de sulfates, chlorures, etc.... [21].



**Fig.26.** Variation de l'ion calcium dans les eaux de forages étudiés (2021).

La teneur en ion calcium est liée directement à la nature géologique des terrains traversés.

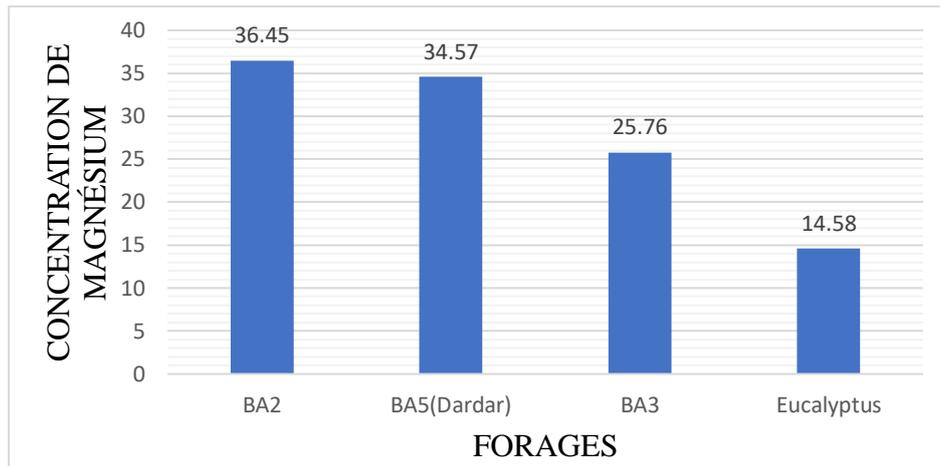
Les teneurs en calcium enregistrées dans les eaux de forages varient de plus de 128 mg/l à plus de 159 mg/l. Et sont donc dans les normes selon l'OMS qui sont limitées à 270mg/l.

Cette concentration est due en grand pourcentage à la dissolution des formations sédimentaires carbonatées, probablement les calcaires travertins ( $\text{CaCO}_3$ ) dans le secteur Belkheir et Boumahra ou bien la dissolution des formations gypsifères ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), qui caractérisent les faciès de plusieurs niveaux stratigraphiques de bassin de Guelma.

### 3.2.1.2. Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Le magnésium est un constituant de nombreux minéraux et roches, en particulier la dolomie (carbonate double de calcium et de magnésium). Il provient également de la dissolution d'autres roches dans les eaux continentales (basalte, magnésites, argiles, etc.). Les eaux magnésiques se forment lorsqu'elles circulent sur des substrats dont les roches sont riches en cet élément [20].

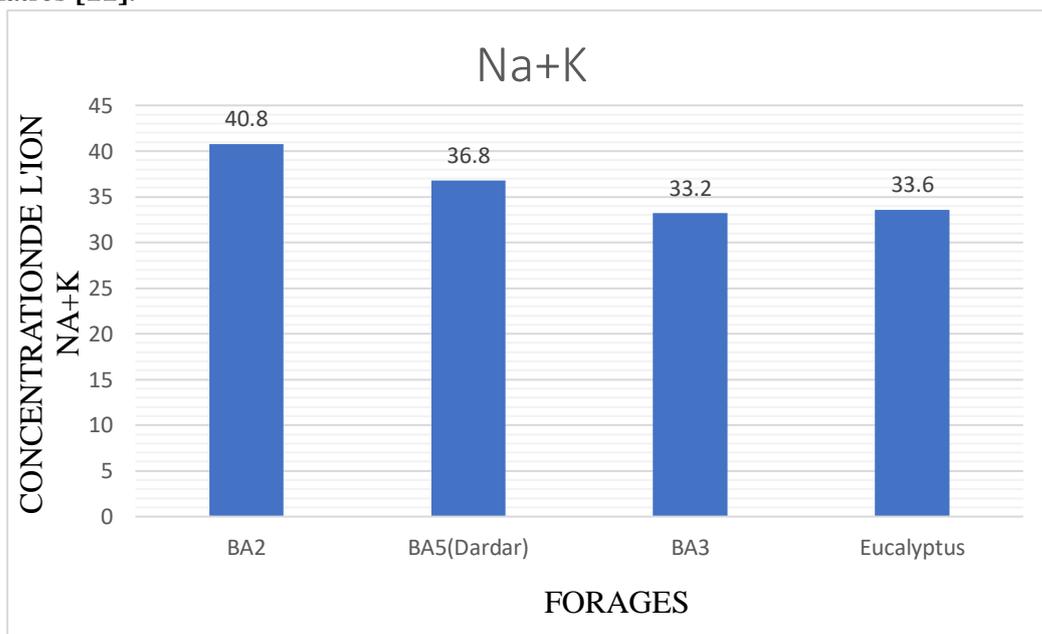
Les teneurs en magnésium varient d'un forage à l'autre de manière décroissante la valeur maximale (36.45 mg/l) enregistrée au niveau du forage BA2 à Belkheir et la valeur minimale (14.58 mg/l) enregistrée au niveau du forage Eucalyptus (O. Maïz. Guelma) (Fig.27). L'apport en cet élément est probablement dû à l'altération des minéraux calciques et la dissolution des formations évaporitiques comme la dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Les teneurs en cet élément restent dans les normes internationales qui sont limitées à 50mg/l.



**Fig.27.** Variation de l'ion Magnésium dans les eaux de forages étudiés (2021).

### 3.2.1.3. Le sodium

Le sodium est un élément dit conservatif car une fois en solution, aucune réaction ne permet de l'extraire de l'eau souterraine. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine, les teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres [11].



**Fig.28.** Variation de l'ion sodium et potassium dans les eaux de forages étudiés (2021).

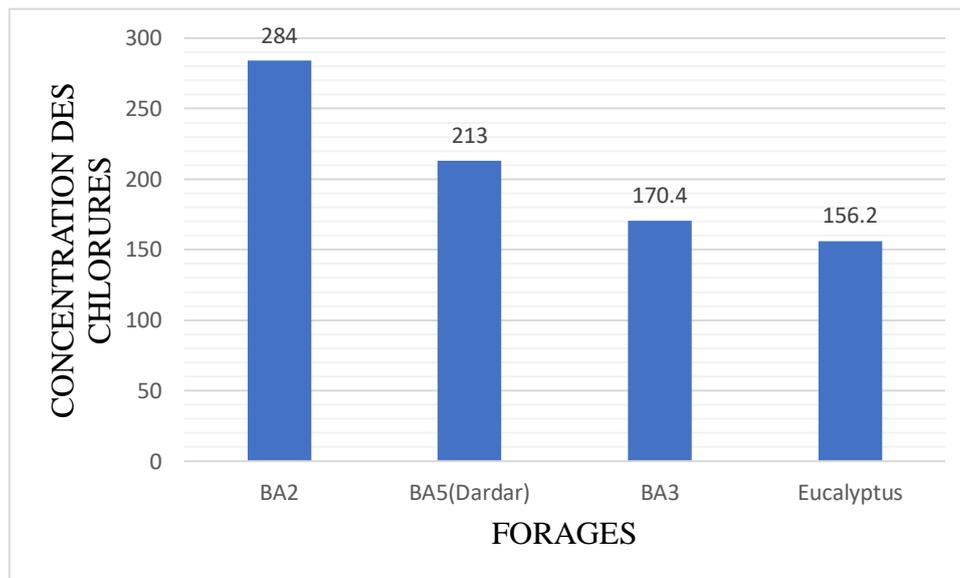
Le sodium varie de manière décroissante dans les quatre forages du prélèvement. Dont la valeur du sodium la plus faible 33.2 mg/l a été enregistrée au forage BA3 et la valeur la plus élevée 40.8 mg/l enregistrée au niveau du forage BA2 à Belkheir. Ces valeurs sont dans les normes internationales qui sont limitées à 200mg/l.

### 3.2.2. Les anions

#### 3.2.2.1. Les Chlorures

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables [5].

Les teneurs en chlorures des eaux analysées sont variées de manière décroissante, la valeur des chlorures la plus basse est de 156.2 mg/l enregistrée au niveau du forage Eucalyptus et la plus élevée est de 284 mg/l enregistrée au niveau du forage BA2. Ces valeurs sont également dans les normes internationales qui sont limitées à 250mg/l. (Fig.29).



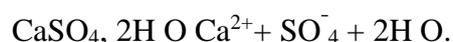
**Fig.29.** Variation de l'ion chlore dans les eaux de forages étudiés (2021).

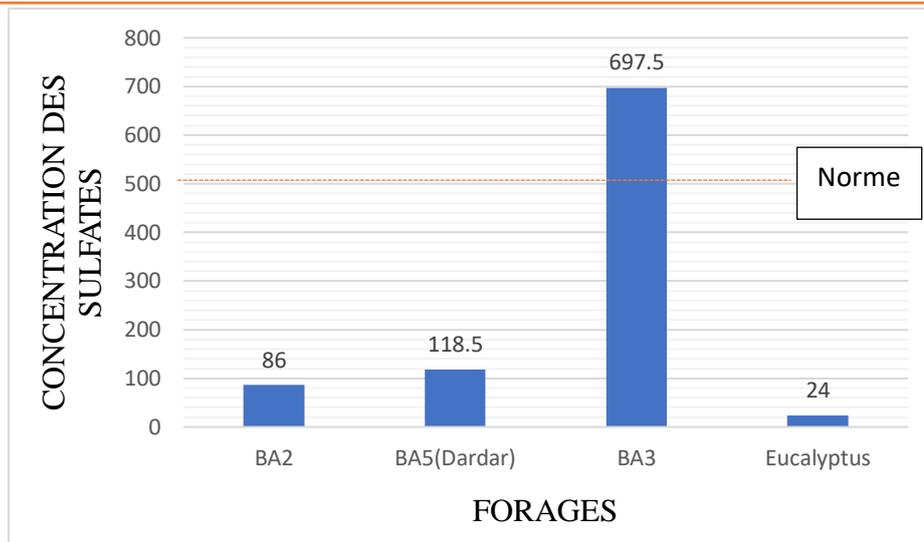
La majeure partie des chlorures viendrait de la dissolution des roches salées du Trias et du Miocène qui caractérisent le bassin de Guelma.

#### 3.2.2.2. Les Sulfates

Composés naturels des eaux, ils sont liés aux cations majeurs : calcium, potassium et sodium. Ils proviennent essentiellement de la dissolution du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Une autre source de sulfates peut être attribuée à l'infiltration de sulfure utilisé comme fertilisant ou comme pesticide.

Le gypse se dissout très rapidement en contact avec l'eau, la réaction de dissolution de gypse est représentée par l'équation suivante [10].





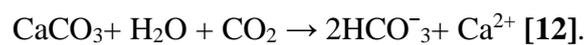
**Fig.30.** Variation de l'ion sulfate dans les eaux de forages étudiés (2021).

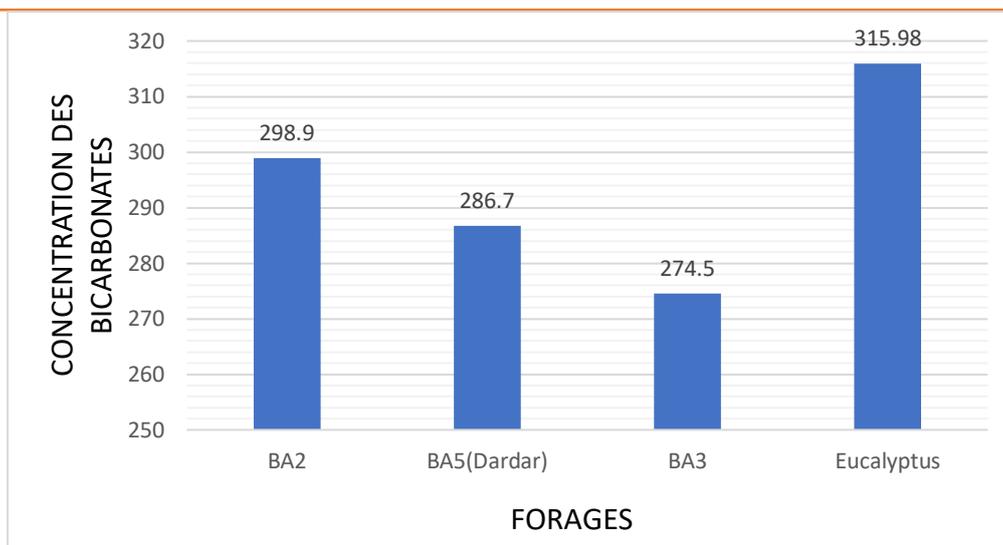
D'après la fig.30, Les eaux de forage présentent des variations spatiales de manière irrégulière des teneurs en Sulfates, Ces teneurs atteignent un pic de 697.5 mg/l dans le forage de Belkheir BA3 qui une valeur très élevée et dépassent la norme de l'OMS qui est 500 mg/l et une valeur minimale de 24mg/l au niveau du forage Eucalyptus.

La présence des sulfates est liée à la dissolution des formations évaporitiques (Gypse= CaSO<sub>4</sub> (2H<sub>2</sub>O)).

### 3.2.2.3.Les bicarbonates

Ils proviennent de la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomie) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO) selon l'équation suivante :





**Fig.31.** Variation de l'ion bicarbonate dans les eaux de forages étudiés (2021).

Dans les eaux souterraines des quatre forages prélevés, les teneurs en bicarbonates varient d'une valeur maximale de 315.98 mg/l au niveau de forage eucalyptus et une valeur minimale de 274.5 mg/l au niveau de forage BA3. Ces valeurs sont dans les normes internationales et qui ne soumise pas à une norme légale. (Fig.31)

La présence de cet élément dans les eaux souterraines des forages BA2 ; BA5 ; BA3 ; Eucalyptus est liée à la dissolution des formations calcaires ( $\text{CaCO}_3$ ) et les formations évaporitiques comme la dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ).

### 3.3.Eléments de pollution :

#### 3.3.1. Les nutriments : (Cycle de l'Azote)

C'est un élément essentiel de la matière vivante. La quantité et la forme chimique de cet élément dans le milieu aquatique y conditionnent le développement de la vie.

L'azote minéral se présente en solution ionique dans l'eau sous 3 formes principales :

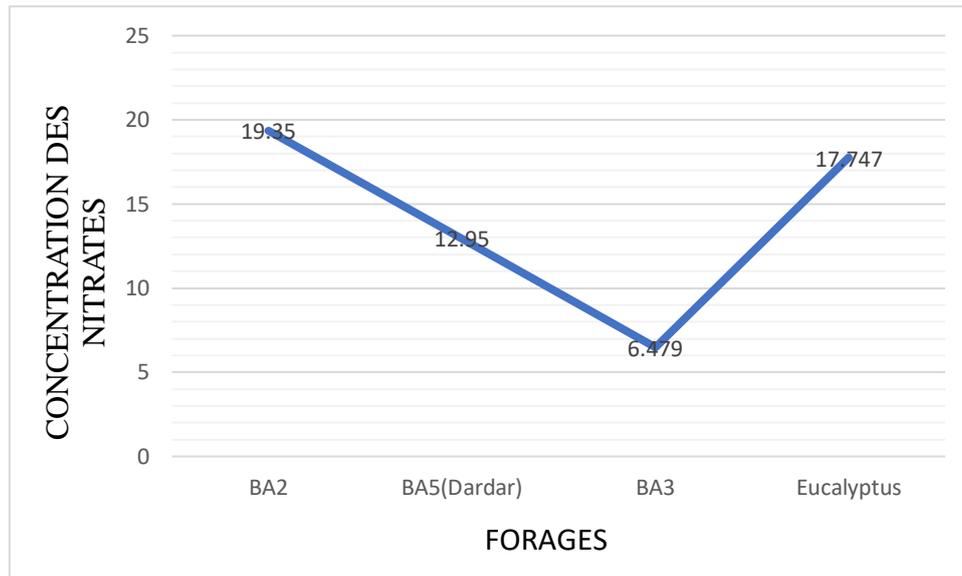
L'azote ammoniacal (ammoniac  $\text{NH}_3$  et ammonium  $\text{NH}_4^+$ );

- Les nitrites  $\text{NO}_2^-$  ;
- Les nitrates  $\text{NO}_3^-$  azote ammoniacal et nitrites sont oxydables. Les nitrates constituent la forme oxydée finale [17].

##### 3.3.1.1. Les nitrates

Les nitrates sont abondamment répandus dans le sol, dans la plupart des eaux et ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et les eaux de surface et sont accentuées par

l'activité humaine qui accélère le processus d'enrichissement en éléments nutritifs par l'apport d'engrais sur les sols cultivés [12].



**Fig.32.** Variation de l'ion nitrate dans les eaux de forages étudiés (2021).

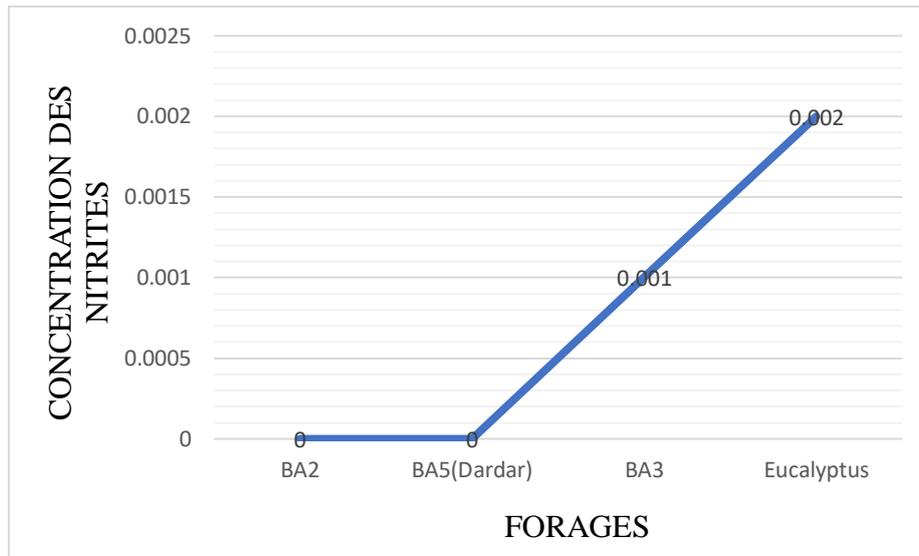
Les nitrates présentent une variation irrégulière (Fig.32), au niveau des eaux souterraines la concentration minimale en nitrates est de 6.479 mg/l enregistrée au niveau du forage BA3 et une concentration maximale de 17.74 mg/l marquée au niveau du forage Eucalyptus.

Toutes les valeurs de nitrates enregistrées sont dans les normes (50mg/l).

### 3.3.1.2. Les Nitrites

Les nitrites représentent la forme la moins oxygénée et la moins stable de l'azote, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique. Elle est due à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium [12].

Les analyses montrent que les eaux souterraines de la région renferment des teneurs très faibles en cet élément (0 à 0.002mg/l). Ces valeurs sont dans les normes internationales et limitées à 30mg/l. (Fig.33).

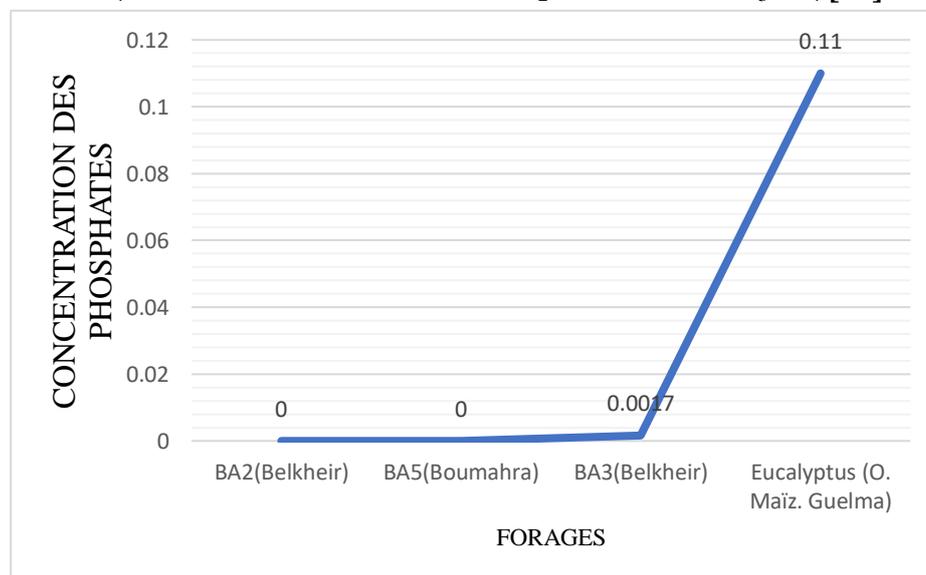
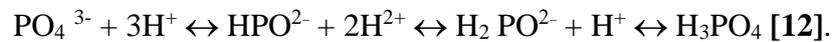


**Fig.33.** Variation de l'ion nitrite dans les eaux de forages étudiés (2021).

### 3.3.1.3. Le phosphate (PO<sub>4</sub>)

Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO<sub>3</sub>, pyro H<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> et ortho H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. En milieu aqueux, les formes méta et pyro tendent vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8.

Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphate sont données par :



**Fig.34.** Variation de l'ion phosphate dans les eaux de forages étudiés (2021).

D'après (fig.34) Les concentrations observées au niveau de la région étudiée sont dans les normes et atteint 0.11 mg/ces valeurs sont dans les normes internationales et limitées de 0.1à 0.2mg/l

### **Conclusion**

L'étude hydrochimique a permis de mettre en évidence l'importance des caractéristiques physico-chimiques des eaux au sein de la région de Guelma.

De manière générale, l'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe alluvionnaire de Guelma permet de dire que :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence des trois faciès le plus dominant est le faciès chloruré calcique et les deux autres sont le faciès sulfaté calcique et le Bicarbonaté calcique.

La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations ainsi que la relation eau-roche.

Les résultats des analyses physico-chimiques ont montré que tous les éléments traités sont dans les normes de l'OMS, sauf pour la concentration en ion sulfates dans le forage BA3 de Belkheir qui atteint 679.5 mg/l et qui dépasse les normes de l'OMS.

# **Chapitre VI**

## **Vulnérabilité à la pollution des eaux dans la zone d'étude**

## **Introduction**

Les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent actuellement une source d'inquiétude qui requiert un intérêt universel.

Cette pollution, générée par les activités anthropiques, peut, en atteignant des niveaux critiques, présenter un danger grave pour la santé publique [24].

Bien que le développement des techniques de décontamination des nappes ait évolué, mais la dépollution reste longue, coûteuse et la restauration de la potabilité des eaux reste difficile [17].

### **1. Principaux types et origines de pollution dans la zone d'étude**

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique et biologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'Homme et ses activités. Elle perturbe parfois considérablement la composition physico-chimique des eaux de surface, ces dernières sont le vecteur principal de transport de ces substances dans les nappes souterraines [7].

#### **1.1.Pollution urbaine et domestiques**

La pollution urbaine constitue une source de pollution importante, en effet toutes les agglomérations situées le long du cours d'eau déversent leurs eaux usées dans l'oued Seybouse ou ses affluents sans traitement préalable sauf pour la ville de Guelma où on a une station d'épuration.

Dans le cas d'assainissement, collectif ou individuel défectueux ou un contact hydraulique avec les nappes, les substances indésirables contenues dans les eaux ménagères (matières organiques, solvants, détergents micro-organismes, antibiotiques...), peuvent atteindre la nappe. Les trois décharges publiques à savoir celles situées respectivement au Nord de Guelaât BouSbâa, à l'Est de d'Héliopolis et au Nord de la ville de Guelma du côté de Djebel

Hallouf, contribuent eux aussi à la pollution par leur lixiviation. Notons que d'autres décharges sauvages existent également dans notre zone d'étude [3].

#### **1.2.Pollution industrielle**

Les rejets de l'industrie de la région de Guelma sont constituées d'eaux usées et de déchets solides et se font en général dans les oueds sans traitement préalable.

Les stations de lavage et de carburants et les unités industrielles déversent également leurs déchets dans les affluents de l'oued Seybouse (O. Skhoun, O. Maïz, O. Zimba, et O. Boussora). Ces rejets peuvent occasionner des modifications aux eaux de surface et souterraines et compromettent la santé de l'homme [3].

### **1.3.Pollution agricole**

Les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des pesticides dans notre zone d'étude contribuent à la dégradation des eaux de surface et souterraines. Le transfert des engrais et pesticides vers la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, soit par rejet dans les puits perdus et gouffre. Les élevages intensifs des bovins (étables, fermes pilotes) et volailles (poulaillers), produisent une grande quantité déjections azotées qui peuvent être aussi à l'origine de la pollution des eaux de surface et souterraines. Les nitrates sont des engrais azotés les plus utilisés dans l'agriculture, ce sont des sels très solubles qui sont soumis au processus de lessivage dans le sol et s'enfoncent progressivement pour atteindre la nappe [3].

### **1.4.Pollution par les engrais**

Les engrais sont utilisés dès l'Antiquité, cette utilisation peut directement affectée le sol vierge qui contient en générale les quantités appropriées de tous les éléments nécessaires à la nutrition des végétaux. Certes, cette pratique permis une augmentation des rendements de production mais par ailleurs elle entraine la perturbation de l'équilibre de l'écosystème en raison du caractère chimique des éléments nutritifs comme l'azote, le phosphore, la potasse, le calcium, le magnésium ainsi que des oligoéléments [11].

#### **1.4.1. Les types d'engrais**

Les engrais sont à base de fumier, de produits chimiques et de minéraux. Les engrais peuvent être classés en deux catégories :

- Engrais Organiques : d'origine d'organisme vivant Animal ou végétale comme le déchet des animaux et les résidus de culture (feuilles, tiges...).

- Engrais Inorganiques ou minérales et chimiques) : ils proviennent essentiellement de sources non vivantes ou artificiel La plupart des engrais commerciaux entre dans cette catégorie [11].

#### **1.4.2. Les engrais les plus utilisés dans la zone d'étude**

L'utilisation des engrais est surement la technique qui contribue le plus à l'augmentation des rendements des différentes cultures. Comme l'azote (N) est un élément essentiel à la croissance et au bon développement de la plupart des Plantes, une enquête a été menée auprès des points de vente au niveau de la wilaya de Guelma afin de quantifier les types d'engrais à base d'azote les plus sollicités par les agriculteurs.

- **N.P.K. (15.15.15)**, est un engrais ternaire qui, contient 15% de N, 15% de P et 15% de K.

Polyvalent, il est utilisé comme engrais de fond au moment du semis, sur des sols non salins disposant d'une capacité de ressuyage.

- **L'urée (46% d'azote)**, engrais azoté de couverture, l'urée est l'engrais sec le plus riche en azote et il est complètement soluble à l'eau. Il est sous forme organique nécessitant une transformation avant son assimilation par la plante. La minéralisation de l'urée s'effectue en présence d'humidité, chaleur et micro-organismes du sol. Son application est recommandée avant une pluie et il doit être enfoui afin d'éviter d'éventuelles pertes par volatilisation. Il est destiné pour toutes les cultures.

- **Nitrate d'Ammonium (UAN)** 32% d'azote, engrais polyvalent liquide, à diluer dans l'eau entre 5 et 10% selon le stade végétatif (Fertial, 2010).

- **Le Super Phosphate Triple (TSP, 46% de  $P_2O_5$ )**, engrais phosphaté de fond utilisé avant le semis des cultures. Contient également des oligo-éléments : Bore (61 ppm), fer (3638 ppm), manganèse (114 ppm), zinc (170 ppm) et le cuivre (05 ppm). Un engrais utilisé à grande échelle dans notre pays, alors qu'il est totalement déconseillé pour le sol alcalin.

D'une façon générale, l'engrais azoté reste le plus utilisé dans la zone d'étude, probablement de par son effet instantané et remarquable sur les cultures de céréales et dont l'impact sur la culture est visible [11].

## 2. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées à travers le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité [8].

L'objectif est de visualiser cette pollution, d'estimer son degré de menace et de cartographier les zones vulnérables et/ou à haut risque [8].

Pour ce faire, et bien visualiser la vulnérabilité à la pollution dans la zone d'étude, nous avons utilisé la méthode GOD, développée par Foster en 1987 et qui présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée.

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe souterraine est définie comme étant la susceptibilité de la qualité des eaux à une charge polluante anthropique [8].

Cette susceptibilité reste liée aux propriétés intrinsèques de l'aquifère, c'est-à-dire sa nature et ses caractéristiques physiques.

Elle dépend du type de nappe, de l'épaisseur de la zone non saturée et de sa composition lithologique, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère.

Dans l'étude de vulnérabilité, on ne doit prendre en compte que les facteurs permettant de favoriser ou de ralentir l'infiltration dans le sol.

La vulnérabilité des nappes à ces diverses pollutions est conditionnée par plusieurs facteurs, parmi lesquels on cite :

- Le pouvoir filtrant du réservoir.
- L'épaisseur de la zone non saturée du réservoir.
- La vitesse d'écoulement des eaux souterraines.
- La nature du réservoir (captif ou libre) [18].

### 3. Description de la méthode GOD

La méthode GOD a été développée par Foster en 1987. C'est une approche empirique où la vulnérabilité des aquifères est définie en fonction de l'inaccessibilité de la zone saturée, au sens de la pénétration du polluant et de la capacité d'atténuation que présente la couche sus-jacente à la zone saturée [8].

Cette méthode est basée sur la combinaison de trois paramètres :

- Type de nappe (Groundwater occurrence) ;
- Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
- Profondeur de la nappe (Depth to Groundwater table) [18].

Les paramètres sont évalués par des cotes allant de 0 à 1 avec des valeurs qui évoluent dans le même sens de la vulnérabilité relative du facteur correspondant.

**Tab.12.** Cotation des différents paramètres de la méthode GOD (Foster,1987).

Type de nappe	Notation	Profondeur	Notation
Aucune	0	>100m	0.4
Captive artisanne	0.1	50-100m	0.5
Captive	0.2	20-50m	0.6
Semi Captive	0.3	10-20m	0.7
Semi Libre	0.5	5-10m	0.8
Libre	1.0	2-5m	0.9
		<2m	1.0

Lithologie	Notation
Sol résiduel	0.4
Siltes Alluvions	0.5
Sable éolien	0.6
Sables Alluviaux et Fluviaux Glaciaires ; Gravier	0.7
Colluvions graviers	0.8

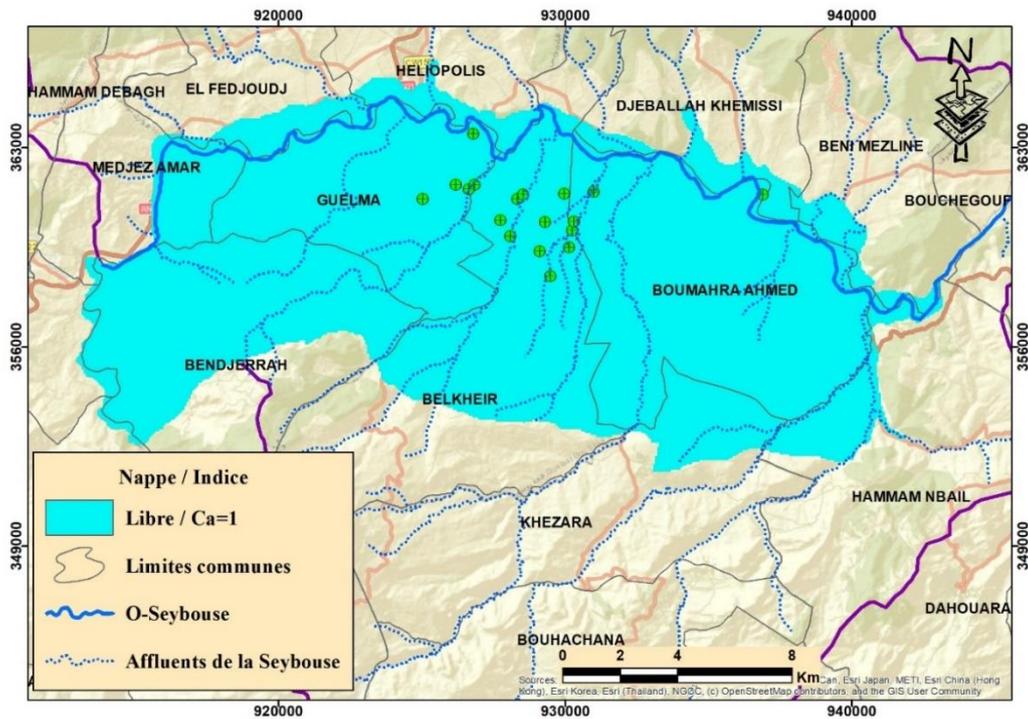
#### **4. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines dans la plaine de Guelma**

L'application de la méthode de GOD dans la zone d'étude nous a conduit à la réalisation de trois cartes des paramètres utilisés et une carte globale de la vulnérabilité.

##### **4.1.Type de la nappe (G)**

Le paramètre (G) permet de déterminer le type de la nappe si elle est libre ou captive, ou semi libre, ou semi captive (Tab.12).

L'évaluation de la vulnérabilité relative à ce paramètre a permis de dégager un seul type d'aquifère avec une nappe libre, portant une cotation de 1. Elle occupe toute la zone d'étude (fig.35).



**Fig. 35.** Carte de type d'aquifère de la zone d'étude selon GOD (Taïba. Z et Aidoudi.I,2021).

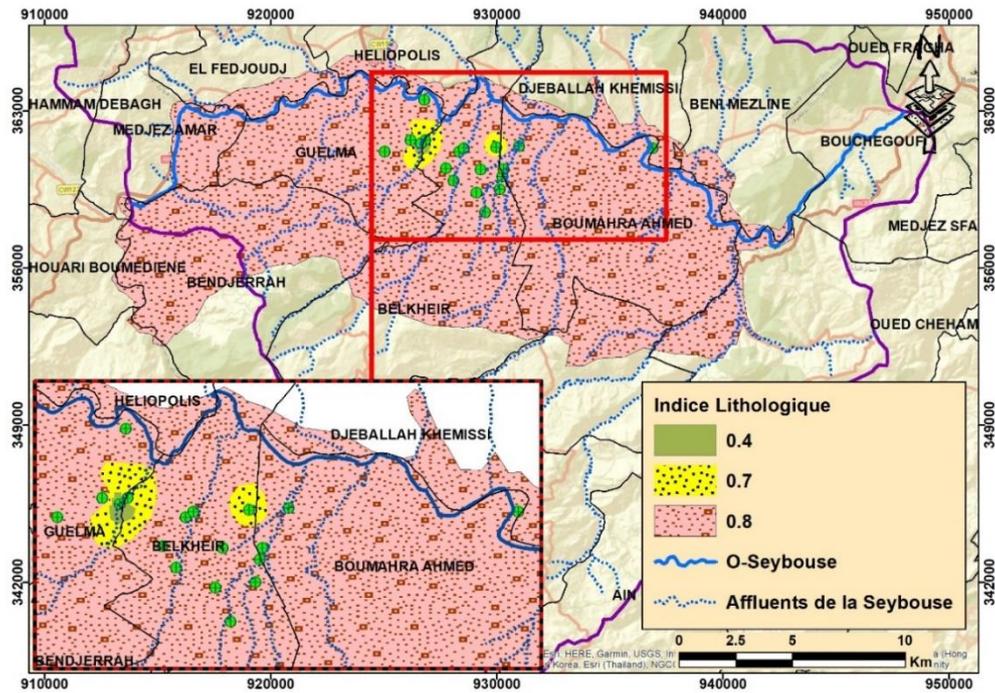
#### 4.2. Lithologie de la zone non saturée (O)

Le paramètre (O) désigne la nature lithologique de la zone non saturée et permet de distinguer cinq classes différentes : sol résiduel, Silts Alluvions, Sable éolien, Sables alluviaux et fluviaux Glaciaires, Gravieres et Colluvions gravieres (Tab.13).

D'après la lithologie des formations dans la zone non saturée de la plaine de Guelma on note trois types différents avec les notations 0.4, 0.7 et 0.8 (Tab.13), (Fig.36).

**Tab.13.** Cotation de type de lithologie de la zone vadose selon la méthode GOD.

Forage	Lithologie	Notation
Zitouna	Colluvions/graviers	0.8
Zone industrielle	Colluvions/graviers	0.8
Rihana	Sables alluviaux et fluviaux Glaciaires, Graviers	0.7
BA3	Colluvions/graviers	0.8
BA1	Colluvions/graviers	0.8
BA2	Colluvions/graviers	0.8
BA5 (Dardar)	Colluvions/graviers	0.8
BA1 Bis	Colluvions/graviers	0.8
Ex Sogedia	Colluvions/graviers	0.8
Sogedia	Colluvions/graviers	0.8
Oued Maïz F1	Sables alluviaux et fluviaux Glaciaires, Graviers	0.7
F9 Belkhir	Colluvions/graviers	0.8
Ferme rouge (Nouader bis)	Colluvions/graviers	0.8
BK2 Nouveau (MATAR)	Colluvions/graviers	0.8
G3	Colluvions/graviers	0.8
G5 bis	Colluvions/graviers	0.8
Oued Maïz OM2(rail)	Sol résiduel	0.4
Ex Sogedia Gu6 Bis	Colluvions/graviers	0.8

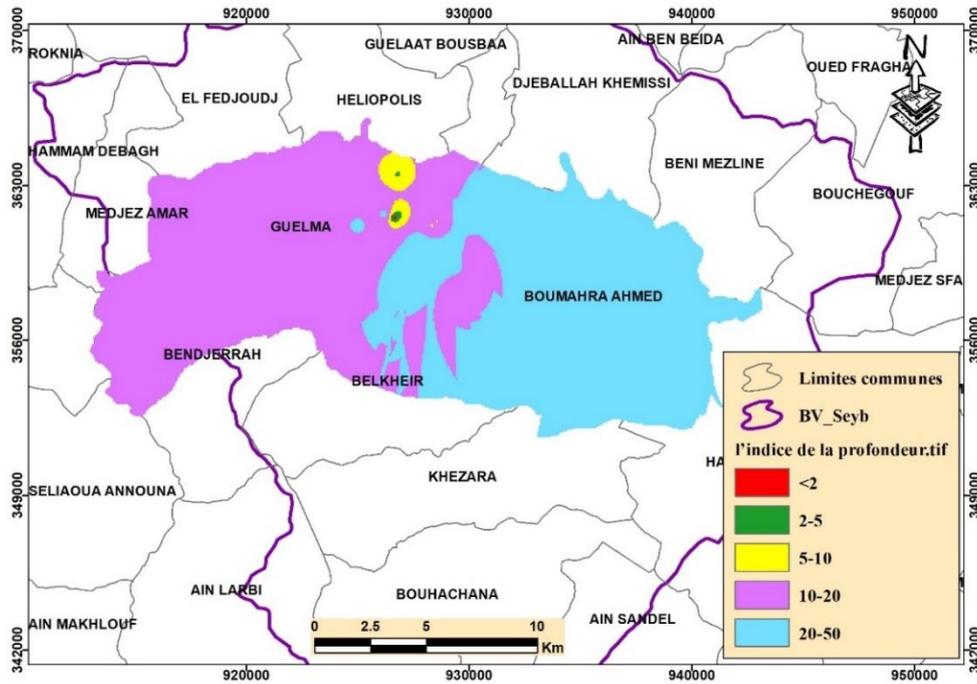


**Fig. 36.** Carte de type de lithologie de la zone vadose de zone d'étude selon GOD (Taïba, Z et Aidoudi, I, 2021).

### 4.3. Profondeur de la nappe (D)

L'évaluation de la profondeur dans la zone d'étude présente la zonalité suivante (Fig.37) :

- Une zone de faible profondeur où le niveau d'eau varie entre 0 et 10m, se localise au niveau des forages : Oued Maïz OM2(rail) ; Oued Maïz F1 ; G3 ; F9 Belkhir ; Sogedia.
- Une zone où la profondeur varie de 10m à 20m, se répartit sur la partie centre et ouest de la plaine de Guelma.
- La zone profonde où le niveau d'eau se trouve de 20m à 50m de profondeur se localisant à l'est de la zone d'étude et notamment dans la région de Boumahra.



**Fig. 37.** Carte de profondeur de la nappe de la zone d'étude selon GOD (Taïba. Z et Aidoudi.I,2021).

**4.4. Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux selon la méthode GOD**

**4.4.1. Calcul de l'indice de vulnérabilité selon la méthode GOD**

L'indice GOD est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Indice GOD} = C_G \times C_o \times C_D [8].$$

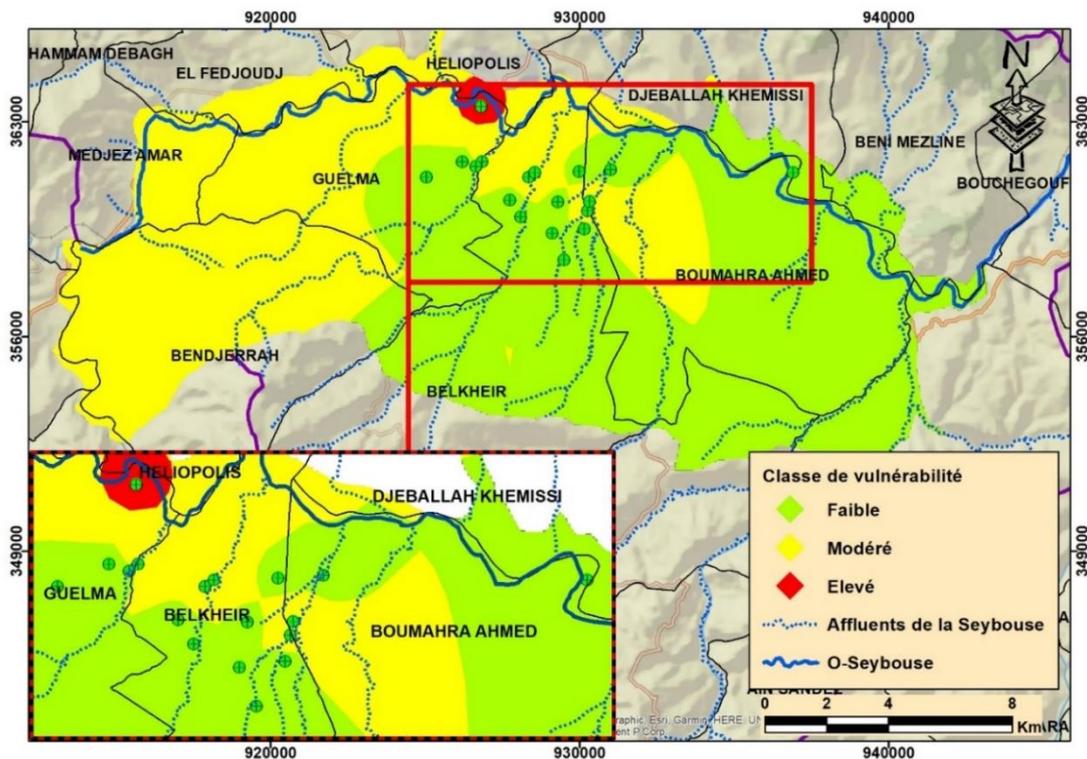
Avec : C : Côte du paramètre correspondant (Tab.12).

**Tab.14.** Cotation de l'indice de vulnérabilité selon la méthode GOD.

Classe	Notation
Nulle	0 à 0,1
Négligeable	0,1 à 0,3
Faible	0,3 à 0,5
Modéré	0,5 à 0,7
Forte	0,7 à 1,0
Très forte	1,0

Le calcul de l'indice de vulnérabilité GOD dans la plaine de Guelma permet de distinguer trois classes (Fig.38).

- Classe de forte vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines au niveau du forage G3 Guelma.
- Classe de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines modérées, qui se localise à l'Ouest et au nord de la zone d'étude.
- Classe de faible vulnérabilité à la pollution des eaux se localisant au centre de la plaine de Guelma et dans la zone de Belkheir-Boumahra et regroupant la majorité des forages dans la région.



**Fig.38.** Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la zone d'étude selon GOD (Taïba. Z et Aidoudi.I,2021).

### **Conclusion**

L'application de la méthode GOD a permis d'estimer les indices de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma. Cette vulnérabilité est répartie en trois classes faible, moyenne et forte.

L'analyse de la carte de vulnérabilité a révélé que :

- La classe de forte vulnérabilité peut s'expliquer par la faible profondeur et le type de la nappe,
- La classe de faible vulnérabilité se justifie par la grande profondeur de la nappe (supérieure à 15 m).

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

Le présent travail, réalisé dans la plaine de Guelma située au Nord-est de l'Algérie, porte sur l'étude de la vulnérabilité à la pollution et l'évaluation de risque des eaux souterraines.

Les résultats de ce travail nous permettent de conclure les résultats suivants :

La zone d'étude appartient à la nappe alluviale de Guelma et fait partie du bassin d'Oued Seybouse et couvre une superficie végétale de 105.395 ha

Elle est connue par ces reliefs montagneux et son réseau hydrographique qui draine une superficie de 770.91 km<sup>2</sup>.

Elle comprend plusieurs unités industrielles comme la laiterie (Guelma), unité de fabrication des pâtes et conserverie de tomate industrielle en plus de l'exploitation de quelques mines et carrières... etc.

Cette zone étudiée est caractérisée par des formations allant du Quaternaire au Trias, ces formations sont constituées essentiellement par des alluvions (sables, graviers, cailloutis...etc.). Le substratum du bassin de Guelma est formé par des marnes et des argiles du miocène et renferme un remplissage alluvionnaire d'âge Plio-Quaternaire.

L'aquifère alluvionnaire de Guelma d'âge Mio-Plio-Quaternaire est constitué de terrasses : haute, moyenne et basses. Ces terrasses comportent des potentialités hydriques importantes.

La région d'étude obéit à un climat méditerranéen, caractérisé par un hiver pluvieux et froid et un été sec et chaud.

Les précipitations calculées à l'aide du logiciel de Thornthwaite ont une moyenne annuelle de l'ordre de 618.8mm/an.

Le bilan hydrique et l'estimation de ses paramètres nous ont permis de faire ressortir une évapotranspiration réelle de l'ordre de 453.2 mm/an, une infiltration et un ruissellement respectivement de l'ordre de 76.29 mm/an et 89.31mm/an.

Dans l'étude hydrogéologique et d'après la carte piézométrique réalisé au mois de Décembre de l'année 2013 modifiée par (Latifi.S,2017), on remarque que le sens d'écoulement des eaux souterraines se fait de Sud vers le Nord et que la Seybouse draine la nappe.

Les fortes valeurs de transmissivités sont remarquées aux secteurs irrigués de Guelma et Boumahra.

## **Conclusion générale**

---

L'étude des caractéristiques hydrochimique des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma permet de faire ressortir trois types de faciès chimiques ; chloruré calcique, sulfaté calcique et le faciès Bicarbonaté calcique.

Concernant les éléments majeurs quel que soit les cations ou les anions sont tous dans les normes internationales de l'OMS et même pour les éléments nutritifs qui représentent des faibles concentrations en nitrites, nitrates et phosphate.

- Selon la carte de vulnérabilité réalisée on peut distinguer trois zones de vulnérabilité différentes.
- La zone de faible vulnérabilité occupant la majeure partie où se localise la majorité des forages de la zone étudiée.
- La zone de vulnérabilité modérée qui se localise à l'Ouest et au nord de la région de Guelma, Belkheir et Boumahra
- La zone de forte vulnérabilité se localisant autour d'un seul forage dans la région de Guelma.

# Référence Bibliographique

## Références Bibliographiques

---

- [1] **Abboudi Nada.2018** les éléments du développement économique local : pour un développement durable dans la wilaya de Guelma ; Université Constantine 3, Algérie, Article publiée dans la Revue Namaa Pour l'économie et commerce ;15p
- [2] **Abdi. A, Brinis. N, Saadi. E., (1991)** : Géophysique, Hydrogéologie, hydrochimie de la vallée de la Seybouse. Région : Guelma, Bouchegouf et Moumna. Mémoire d'ingénieur d'état en géologie. Université de Badji Mokhtar Annaba. 135p
- [3] **Bechiri Naouel (2011)**. Evolution du chimisme des eaux de surface et souterraines dans le bassin versant de la seybouse (Nord-Est Algérien). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba.106p
- [4] **Bouaicha Foued.2018**. Le géothermalisme de la région de Guelma, thèse de doctorat en hydrogéologie, Université des Frères Mentouri de Constantine1.177p
- [5] **Brémond R. et Vuichard R., 1973**. Les paramètres de la qualité de l'eau. Ed. La documentation française. Paris. 173p.
- [6] **Brahmia N., 2016**. Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de la moyenne Seybouse, Nord-Est, Algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.116p
- [7] **Chaoui Widad (2007)**. Impact de la pollution organique et chimique des eaux de l'oued seybouse et de l'oued Mellah sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de Bouchegouf (Guelma). Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba.104p.
- [8] **DJEBASSI TOUFIK, (2021)**. Caractérisation et cartographie des risques de pollution, par outil SIG, des eaux souterraines de la plaine de Tébessa (N.E Algérien) et essai de gestion intégrée de la ressource en eau. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université Cheikh Larbi Tebessi Tébessa.174p.
- [9] **Djabri. L., (1996)** : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Annaba. 261 pages.
- [10] **Freeze. A.R, Cherry J.A, (1979)**. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 604 p.
- [11] **Kachi N. 2015**. Impact du périmètre irrigué sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la Seybouse. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.175p

## Références Bibliographiques

---

- [12] **KHEDIDJA ABDELHAMID** Caractérisation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Tadjnant –Chelghoum Laid et impact de la pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines ; Doctorat en sciences ; Université Batna,2016. 162p
- [13] **Mekaoui Abdel Hafidh et Bennour Salah Eddine (2016)** Bassin versant de la moyenne Seybouse pollution des eaux de surface approche qualitative et cartographique, Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 Guelma, 2016.138p
- [14] **Mouassa Souad (2006)**. Impact du périmètre d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma et sur les sols. Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba. 152 p.
- [15] **Mouassa S.2017**. Évaluation des ressources en eau dans le sous bassin versant de la moyenne Seybouse, région de Guelma Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Badji Mokhtar Annaba, Algérie.143p
- [16] **Mouchara Nabil., 2009**. Impacts des lâchées de barrage Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie amont (Nord-Est Algérien). Mémoire de Magistère, Université d'Annaba.112p
- [17] **Latifi Sabah 2017**.Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord Est Algérien.Rev.Sci.Technol.Synthèse 34 :48-62 (2017). Thèse de doctorat en science ;135p
- [18] **Nassah Omdi 2011**. Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines cas du champ captant du N'Fis (Maroc). Mémoire de licence, Maroc.2011.51p
- [19] **OULDAMMAR Hanane (2019-2020)** Délimitation de biseau salé dans le bassin de Garaat el tarf, université abbes laghrour khenchela, thèse de de doctorat en Ecologie et Environnement. 109p
- [20] **Ramade F., 2002**. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. 2ème Ed. DUNOD. Paris. 1075 p.
- [21] **Rodier J., Bazin C., Broutin J. P., Champsaur H. et Rodi L., 2005**. L'analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eau de mer. 8ème Ed. DUNOD. Paris, 1383 p.
- [22] **Zeddouri A. (2003)**. Contribution à L'étude Hydrogéologique Et Hydro-chimique De La Plaine Alluviale De Guelma (Essai De Modélisation), Guelma, NE Algérien. Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba. 107 p.
- [23] <https://www.aquaportail.com/definition-5214-evapotranspiration-potentielle.html>.
- [24] <https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/2007-v20-n2-rseau1725/015812ar/>.

## Références Bibliographiques

---

[25] <https://www.dcwguelma.dz/fr/index.php/10-menu-principal/44-situation-geographique>.

[26] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydrologie/>.