



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Université Abou bekr Belkaid Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Hydraulique



## THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de  
Doctorat en science de l'Université de Tlemcen  
Option : Hydraulique

Présentée par  
**BELKENDIL Abdeldjalil**

Titre :

**LES RESSOURCES HYDRIQUES DANS LES ZONES  
ARIDES, CARACTERISATION, DYNAMIQUE ET  
DURABILITE (CAS DU SUD – OUEST ALGERIEN)**

Soutenue le : 12/12/2021

devant le jury d'examen composé de :

Mr. CHIBOUB F. Abdelghani	Professeur	Univ. de Tlemcen	Président
Mr. BENKHELIFA Mohamed	Professeur	Univ. de Mostaganem	Examineur
Mr. BEKKOUSSA S. Belkacem	Professeur	Univ. de Mascara	Examineur
Mr. HABI Mohammed	Professeur	Univ. de Tlemcen.	Directeur de thèse
Mr. MORSLI Boutkhil	MRA	INRF de Tlemcen	Co-directeur de thèse

## *Remerciements*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude avant tout à Dieu le tout puissant qui m'a aidé et donné le courage pour mener à bien ce modeste travail.*

*Ma gratitude et mes vifs remerciements vont directement à mon directeur de thèse Mr : **Habi Mohammed** Professeur à l'université de Tlemcen et Monsieur **Morsli Botkhal** Directeur de l'institut National de recherche forestière (INRF) pour avoir encadré et suivi mon travail de près avec toute leur rigueur scientifique exceptionnelle et leur conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Je remercie tout particulièrement messieurs les membres du jury :*

- ***CHIBOUB F. Abdelghani**, Professeur à l'Université de Tlemcen qui a accepté de présider le jury*
- ***BENKHELIFA Mohamed**, Professeur à l'Université de Mostaganem et Mr **BEKKOUSSA S. Belkacem**, Professeur à l'université de Mascara d'avoir bien voulu assister au jury et critiquer ce mémoire.*

*Mes remerciements vont à tous les enseignants et les administrateurs du département d'hydraulique de l'université de Tlemcen.*

*Mes remerciements vont aussi aux responsables de l'ANRH d'Adrar et DHW et de l'ADE Bechar pour leurs aides.*

*Enfin, je tiens à remercier tous les amis et les collègues qui m'on aidé et encouragé dans la réalisation de ce mémoire, je cite spécialement : **Mekkaoui Abderrahmane**, **Merzougui Touhami**, **Bayazid Nourlehad**, **Bekhira abdelghani**, **Bouzouina Omar** , **Mme Nehai Soumeya** et **Mlle Boufeldja Samira**.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers au monde, mon Père et ma Mère, en leur témoignant ma grande reconnaissance pour m'avoir orienté vers la bonne voie. à ma femme et mon fils Siradj*

## ملخص

كما هو معروف فإن المياه تعتبر مورداً حيوياً لكل الكائنات الحية ولا يمكن الاستغناء عنها وعليه استوجب ذلك الحرص دوماً على البحث عن المصادر المختلفة للمياه الصالحة للشرب ودراسة تلك المصادر كمّاً ونوعاً وذلك من أجل إنشاء منظومة تسيير عقلاني تضمن ديمومة تلك المصادر خصوصاً في المناطق الشبه الجافة والمناطق الجافة والتي تعاني دوماً من شح مصادر المياه بسبب العوامل المناخية ، الشيء الذي يؤثر بالسلب على استمرارية تواجد الكائنات في تلك المناطق .

تعد منطقة بشار من بين المناطق التي تشهد أزمة مائية مستمرة بحكم تواجدها غرب الحزام المناخي الجاف والذي يمتد إلى ولاية بسكرة شرقاً وإلى ولاية تمنراست جنوباً وتقع ولاية بشار في الجنوب الغربي الجزائري وتبعد بمسافة 1000 كم عن عاصمة البلاد الجزائر .

خلال دراستنا قمنا بدراسة هيدروجيوكيميائية للمياه بمدينة بشار وما جاورها وذلك من أجل تحديد نوعيتها ومدى تطورها عبر الزمن وذلك من خلال لا دراسة ثلاث حملات معاينة لأخذ عينات من المياه خلال سنوات 2013 و 2018 م ، وقد تم من خلال هاته الدراسة أن المياه الجوفية بالمنطقة المدروسة تتميز بناقلية عالية إذ وصل المتوسط في أخذ حملة معاينة 2018 إلى 4150 ميكروسيمنس/سم في الآبار العميقة وإلى 1999 ميكروسيمنس /سم في الآبار المتوسطة وهذا ما يفسر بالملوحة العالية في بعض الآبار بحيث وصلت إلى 2.84 غ/ل وترجع قيمة الملوحة أساساً إلى تفاعل المياه مع مختلف التكوينات الجيولوجية بالإضافة إلى المصادر الأخرى الناتجة عن التلوث السطحي والتي أثرت أيضاً على تركيز النترات في المياه إذ فاقت في إحدى العينات الـ 50 مغ/ل لتصل إلى 57 مغ/ل الشيء الذي يتطلب معرفة الأماكن الأكثر خطورة بالنسبة للمياه الجوفية وذلك من خلال تطبيق نموذج الـ DRASTIC والذي يسمح برسم خريطة معامل التلوث بناءً على معطيات تتعلق بخصائص جيومحيطية لمنطقة الدراسة بحيث اتضح لنا أن أعلى درجات الخطورة قد سجلت في منطقة المريجة وكذا في وسط مدينة بشار إضافة إلى منطقة وادكة بحكم طابعها الزراعي والذي ينتج عنه لا محالة استعمال مفرط للمواد العضوية والتي تؤثر سلباً على نوعية المياه الجوفية .

على ضوء كل هاته النتائج استوجب اقتراح حلول من أجل الحفاظ على نوعية المياه الجوفية من خلال استعمال التقنيات الحديثة التي هي قيد الاستعمال في أماكن عديدة حول العالم كالتزويد الاصطناعي لطبقات المياه الجوفية والتي عبارة عن حقن كميات مياه في مناطق جيولوجية ذات نفاذية عالية من أجل زيادة منسوب طبقات المياه الجوفية واللجوء إليها في الأوقات التي تشهد ندرة التساقطات .

**كلمات مفتاحية :** ،مياه جوفية ، هيدروجيوكيميائية ، التسيير ، التلوث ، DRASTIC ، التزويد الاصطناعي

### Résumé

Comme on le sait, l'eau est une ressource vitale et indispensable pour tous les organismes vivants. Par conséquent, cela a nécessité une attention constante dans la recherche des différentes sources d'eau potable et l'étude de ces sources en termes de quantité et de qualité, afin de mettre en place un système de gestion rationnel, garantissant la durabilité de ces sources, en particulier dans les régions semi-arides et arides qui souffrent toujours de la rareté des ressources en eau, en raison de facteurs climatiques ; ce qui affecte négativement la continuité de survie des êtres vivants dans ces zones.

La région de Béchar fait partie des régions qui connaissent une crise d'eau continue en raison de sa présence à l'ouest de la ceinture climatique sèche, qui s'étend jusqu'à la région de Biskra à l'est et jusqu'aux confins de la wilaya de Tamanrasset au sud. La wilaya de Béchar est située au sud-ouest de l'Algérie, à une distance de 1000 km de la capitale du pays Alger.

Au cours de ce travail de thèse, nous avons mené une étude hydrogéochimique de l'eau de la ville de Béchar et de ses environs, afin de déterminer sa qualité et l'étendue de son développement dans le temps, à travers l'étude de deux campagnes d'échantillonnage en prélevant des échantillons d'eau au cours des années 2013 et 2018. Les résultats montrent que les eaux souterraines de la région étudiée se caractérisent par une conductivité élevée, la moyenne de la campagne d'échantillonnage 2018 a atteint 4150 microsiemens / cm dans les puits profonds et 1999 microsiemens / cm dans les puits de moyennes profondeurs, ce qui s'explique par la salinité élevée dans certains puits, atteignant 2,84 g / l. La valeur de salinité est principalement due à l'interaction de l'eau avec diverses formations géologiques. En outre, d'autres sources résultant de la pollution de surface, ont également affecté la concentration de nitrates dans l'eau, des échantillons, ont dépassé 50 mg / l pour atteindre 57 mg / l, ce qui nécessite la reconnaissance des endroits les plus dangereux pour les eaux souterraines. En appliquant le modèle DRASTIC, qui permet de dessiner une carte des paramètres de pollution basée sur des données liées aux caractéristiques géo-environnementales de la zone d'étude, il est apparu clairement que les niveaux de risque les plus élevés ont été enregistrés dans la zone de Meridja, ainsi que dans le centre-ville de Béchar, en plus d'une certaine zone à Ouakda, en raison de son caractère agricole, ce qui entraîne inévitablement une utilisation excessive de matières organiques qui affectent négativement la qualité des eaux souterraines.

À la lumière de tous ces résultats, il était nécessaire de proposer des solutions afin de préserver la qualité des eaux souterraines grâce à l'utilisation de techniques modernes utilisées dans de nombreux endroits à travers le monde, comme la recharge artificielle des aquifères, qui est l'injection de quantités d'eau dans des zones géologiques à haute perméabilité afin d'en augmenter le niveau d'aquifère et y recourir en période de rareté des précipitations.

**Mots clés:** eaux souterraines, hydrogéochimie, pollution, gestion rationnel, DRASTIC, recharge artificielle.

### **Abstract**

As we know, water is a vital resource for all living organisms and it is essential. Therefore, this required constant attention to research different sources of drinking water and study these sources in terms of quantity and quality in order to put in place a rational management system ensuring the sustainability of these sources, especially in the semi-arid and arid regions that still suffer from the scarcity of water resources due to climatic factors, which negatively affects the continuity of the existence of organisms in these areas.

The Bechar region is one of the areas experiencing the ongoing water crisis because of its presence in the west of the dry climate belt, which extends to the state of Biskra in the East and up 'at the end of the wilaya of Tamanrasset to the south. the wilaya of Bechar is located in the southwest of Algeria, at a distance of 1000 km from the capital of the country Algiers.

During our study, we conducted a hydrogeochemical study of the water in the city of Bechar and its surroundings, in order to determine its quality and the extent of its development over time, through the study of two campaigns sampling to take water samples during the years 2013 and 2018, and it is through this study that the groundwater of the study region is characterized by high conductivity, because the average of the 2018 sampling campaign reached 4150 microsiemens / cm in deep wells and at 1999 microsiemens / cm in medium wells and this is explained by the high salinity in some wells, reaching 2.84 g / l., The salinity value is mainly due to the interaction of water with various geological formations. Besides other sources resulting from surface pollution, which also affected the nitrate concentration in the water, as in one of the samples it exceeded 50 mg / l to reach 57 mg / l, which requires knowledge of the most dangerous places for groundwater by applying the DRASTIC model, which It is allowed to draw a map of pollution parameters based on data related to the geo-environmental characteristics of the study area, so that we became clear that the highest risk levels were recorded in the Meridja area, as well as in the city center of Bechar, in addition to some areas in Ouakda due to its agricultural character, which inevitably results in excessive use of organic matter which negatively affects groundwater quality.

In the light of all these results, it was necessary to propose solutions to preserve the quality of groundwater through the use of modern techniques used in many places around the world, such as the artificial recharge of aquifers, which is injecting quantities of water into high permeability geological zones in order to increase their level. Aquifers and use them in times of scarce rainfall.

**Keywords:** groundwater, hydrogeochemistry, rational management, pollution, DRASTIC, artificial recharge.

---

# **Sommaire**

---

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
ملخص.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Sommaire.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XIII
Liste des abréviations.....	XV
Avant Propos .....	1
Introduction générale .....	4
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>SITUATION GEOGRAPHIQUE, APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE</b>	
1. Situation géographique.....	8
2. Morphologie .....	9
3. Réseau hydro graphique .....	10
4. Occupation de sol .....	11
4.1. Couverture végétale .....	14
5. Situation démographique et socio-économique.....	14
5.1. Situation démographique .....	14
5.2. Situation socio-économique.....	14
6. Conclusion .....	15
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>APERÇU GEOLOGIQUE</b>	
1. Introduction.....	17
2. Cartes géologiques.....	17
2.1. Sur les coupures spéciales à 1/500 000° .....	18
2.2. Sur les coupures régulières à 1/200 000° .....	19
2.3. Sur des coupures spéciales à 1/200 000° .....	19
2.4. Cartes géologiques à 1/100.000 <sup>e</sup> en Coupures spéciales (inédites).....	20
2.5. Cartes géologiques à 1/ 50.000 en coupures spéciales (inédites) .....	20
3. Contexte géologique .....	21
3.1. Crétacé .....	22
3.2. Tertiaire.....	25
3.3. Quaternaire.....	27
4. Conclusion .....	27
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>APERÇU CLIMATOLOGIQUE</b>	
1. Introduction.....	30
1.1. Continentalité pluviale moyenne.....	31
1.2. Calcul des coefficients pluviométriques.....	31
1.3. L'indice d'aridité de Martonne.....	34
2. Étude des paramètres climatiques.....	34
2.1. Étude des précipitations.....	34
2.2. Étude de la Température .....	37
2.2.1. Températures moyennes mensuelles.....	37
2.3. Diagrammes ombro-thermiques.....	37
2. 4. L'humidité.....	38
2.5. Le vent .....	39



2.6. L'évaporation.....	40
2.7. Les crues.....	40
3. Bilan hydrique.....	40
3.1. Evapotranspiration Potentielle.....	40
3.1.1. Définition.....	40
3.1.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P) .....	41
3.1.2.a. Formule de Thornthwaite.....	41
3.1.2.b. La formule de Serra.....	41
3.2. Evapotranspiration Réelle (ETR) .....	42
3.2.1. Définition.....	42
3.2.2. Estimation de l'évapotranspiration Réelle (ETR) .....	42
3.2.2.a. Formule de Turc.....	42
3.2.2.b. Formule de Coutagne.....	42
3.3. Calcul des réserves facilement utilisables (RFU) .....	42
3.4. Estimation du ruissellement et de l'infiltration.....	43
3.5. Interprétation du bilan hydrologique de Thornthwaite.....	45
4. Conclusion.....	46

### **Chapitre IV**

#### **Etude hydrogéologique**

1. Introduction.....	47
2. Description lithologique de l'Aquifère des calcaires du Turonien: .....	47
3. Conditions aux limites.....	48
4. Étude des paramètres hydrodynamiques.....	49
4.1. Essais de pompage .....	50
4.2. Carte de la perméabilité .....	55
4.3. Carte des transmissivité .....	56
4.4. Interprétation des cartes piézométriques .....	57
5. Étude de la variation du niveau statique en fonction des précipitations.....	62
6. Géométrie des aquifères et conditions aux limites .....	64
6.1. Corrélations des coupes.....	64
6.1.1. Corrélation transversale.....	64
6.1.2. Corrélation longitudinale.....	65
6.2. Géophysique .....	65
6.2.1. Coupes géo-électriques A, C et D .....	68
6.2.2. Coupes géo-électriques E, H et L .....	69
6.3. Linéaments.....	69
7. Conclusion.....	72

### **CHAPITRE V**

#### **ÉTUDE DE LA QUALITE HYDROCHIMIQUE DES EAUX**

1. Introduction.....	74
2. Obtention de la base des données .....	74
3. Méthodologie de travail.....	75
3.1. Prélèvements.....	75
3.2. Mesures <i>in situ</i> .....	76
3.3. Analyses des éléments chimiques.....	76
3.4. Définition d'une norme.....	77
4. Étude des résultats des analyses chimiques.....	78
4.1. Étude statistique.....	78
4.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux (mesure <i>in situ</i> ) .....	78
a. La température de l'eau.....	79

b. La conductivité.....	80
c. La minéralisation totale de l'eau.....	80
d. Salinité, TDS (Total Dissolved Sels.....	82
e. Le potentiel hydrogène de l'eau (pH) .....	83
4.1.2. Sels dissous .....	84
4.1.2.1. Les éléments majeurs.....	84
a. Calcium (Ca <sup>+2</sup> ) .....	84
b. Magnésium (Mg <sup>+2</sup> ) .....	84
c. sodium (Na <sup>+</sup> ) .....	85
d. Potassium (K <sup>+</sup> ).....	86
e. Chlorides (Cl <sup>-</sup> ) .....	86
f. Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	87
g. Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	87
h. Nitrates NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	88
i. Les nitrites NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .....	89
j. L'ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) .....	89
4.1.2.2. Éléments mineurs naturels.....	89
a. Silicium (Si <sup>+2</sup> ) .....	89
b. Phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ).....	90
4.2- Faciès chimique .....	90
4.2.1- Eaux des forages.....	90
4.2.1.1- Interprétation des données chimiques.....	90
a. Formule ionique.....	90
b. Digramme de Piper.....	92
3.2.2. Interprétions des faciès chimiques.....	95
a) Digramme de Schoeller-Berkaloff.....	96
5. Les Mécanismes De Salinité Des Eaux Souterraines .....	98
5.1 : principaux processus de minéralisation des eaux.....	98
a. Altération et dissolution .....	98
b. Échange d'ions.....	100
c. Evaporation.....	102
5.2. L'Indice de Saturation.....	104
5.3. Matrice de corrélation .....	105
5.3.1. Analyse en Composante Principale (ACP) .....	107
5.3.2. Classification Ascendante Hiérarchisée (HCA) .....	112
5.3.3. Variations et répartitions des paramètres physiques des eaux.....	114
a. La température.....	114
b. le potentiel d'hydrogène .....	115
c. la conductivité électrique.....	116
5.3.4. Qualité chimique et répartition des ions des eaux.....	118
a. Le calcium et le magnésium (Ca <sup>2+</sup> et Mg <sup>2+</sup> ).....	118
b. Le sodium et le potassium.....	120
c. Les bicarbonates.....	122
d. Les sulfates.....	123
e. Les chlorures.....	124
f. Les nitrates.....	125
6. Conclusion .....	126

## CHAPITRE VI

### QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE

1. Introduction.....	129
2. Étude de la relation oued/ nappe.....	130
2.1. Composition lithologique des berges et du lit de l'oued.....	131
3. Caractères biochimiques des germes pathogènes polluants les eaux .....	133
3.1. Les coliformes .....	133
3.1.1. Les coliformes totaux .....	133
3.1.2. Les Coliformes Fécaux (Escherichia – Coli) .....	133
3.2. Les streptocoques.....	134
3.3. Les salmonella.....	134
3.4. Le vibrion cholérique.....	134
4. Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau .....	135
5. Analyse bactériologique.....	135
6. Calcul de l'indice de qualité microbiologique (IQM) .....	138
7. Conclusion .....	140

## CHAPITRE VII

### VULNERABILITE A LA POLLUTION ET PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU

1. Introduction .....	142
2. Cartographie de vulnérabilité DRASTIC.....	143
2.1. Profondeur des eaux souterraines.....	145
2.2. Recharge nette.....	147
2.3. Milieux aquifères.....	148
2.4. Milieux de sol.....	150
2.5. Topographie.....	151
2.6. Impact de la zone Vadose.....	152
2.7. Conductivité hydraulique.....	154
3. Consolidation et calcul de l'indice DRASTIC.....	155
3.3 Carte d'indice de vulnérabilité DRASTIC.....	157
4. Indice de pollution et répartition spatiale des nitrates.....	158
5. Conclusion.....	161

## CHAPITRE VIII

### LES MESURES NECESSAIRES POUR LA DURABILITE DES RESSOURCES HYDRIQUES

1. Introduction.....	163
2. Réalimentation des aquifères dans la nature.....	163
3. Réalimentation artificielle des nappes.....	164
3.1. Objectifs et applications.....	164
3.1.1. Changement de la qualité des eaux.....	164
a. Épuration.....	164
b. Régularisation thermique.....	164
3.1.2. Traitement de dommages à une nappe d'eau à la suite de la surexploitation et la restauration de la situation initiale.....	165
3.1.3. Amélioration de régime d'exploitation.....	165
4. les conditions d'utilisation de la recharge artificielle.....	165
4.1. Conditions hydrologiques (source d'alimentation).....	165
4.2. Conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques (réservoirs souterrains).....	166
5. Les différentes techniques de recharge .....	167
5.1. Les techniques directes .....	168
5.1.1. Techniques d'épandage de surface .....	168
5.1.1.1. Inondation .....	169
5.1.1.2. Bassins de recharge .....	170

5.1.1.3. Augmentation de flux .....	170
5.1.1.4. Système de fossés et de sillons .....	171
5.1.2. Techniques de sous surface .....	171
5.1.2.1. Puits de recharge .....	171
5.1.2.2. Fossés de recharge .....	172
5.1.2.3. Puits creusé .....	173
5.2 Méthodes indirectes .....	173
5.2.1. Recharge induite .....	174
6. Schéma décisionnel d'adoption de la technique de recharge artificielle .....	174
7. Exemple d'application de réalimentation artificielle sur la nappe de Turonien de la zone d'étude .....	175
7.1. La conception de la technique d'alimentation artificielle proposée.....	176
8. Conclusion.....	178
CONCLUSION GENERALE ET DISCUSSIONS.....	181
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	186
ANNEXES.....	195

---

# Liste des figures

---

<b>CHAPITRE I</b>	
<b>SITUATION GEOGRAPHIQUE, APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE</b>	
Figure I.1 : Localisation de la zone d'étude. ....	8
Figure I.2: Modèle numérique du site de la zone Kénadsa-Bechar.....	10
Figure I.3 : Réseau hydrographique de la région d'étude .....	11
Figure I.4 : Image satellitaire de la zone d'étude (Landsat TM 8) .....	12
Figure I.5 : Classification d'occupation de sol dans la zone d'étude.....	12
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>APERÇU GEOLOGIQUE</b>	
Figure II.1 : Cartes géologiques à 1/500 000, en coupures spéciales du Nord Ouest... ..	18
Figure II.2 : Cartes géologiques à 1/200 000° en coupures spéciales.....	19
Figure II.3 : Carte géologique du djebel Béchar (Pareyn, 1961).....	20
Figure II.4 : Cartes géologique à 1/100 000 et 1/50 000, en coupures spéciales .....	21
Figure II.5 : Carte géologique schématique de la région nord de Béchar .....	22
Figure II.6 : Coupe du Crétacé de Kénadsa .....	25
Figure II.7 : Coupe du Tertiaire. ....	26
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>APERÇU CLIMATOLOGIQUE</b>	
Figure III.1: Précipitations interannuelles de la station d'ONM Bechar sur une période de 59 ans (1960-2018).....	34
Figure III.1: Précipitations interannuelles de la station de mougheul sur une période de 59 ans (1960-2018).....	35
Figure III.3: Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région d'ONM Bechar sur une période de 59 ans (1960-2018).....	35
Figure III.4: Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région de Mougheul sur une période de 59 ans (1960-2018).....	36
Figure III.5 : Courbe ombrothermique de la région de ONM Bechar (1960/2018).....	38
Figure III.6 : Courbe Ombrothermique de la région de Mougheul (1960/2018).....	38
Figure III.7 : Variation d'humidité relative Moyenne mensuelle des stations d'ONM Bechar et de Mougheul (2000 -2014).....	39
Figure III.8: Représentation graphique du bilan hydrologique de Thornthwaite à la station de Mougheul.....	45
Figure III.9: Représentation graphique du bilan hydrologique de Thornthwaite à la station d'ONM Bechar.....	45
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Etude hydrogéologique</b>	
Figure IV.1 : Carte des points d'eau utilisés dans l'étude.....	48
Figure IV.2 : Carte des conditions aux limites [Idrotecnico, Région de Bechar, 1976]	49
Figure IV.3: Coupe de forage et courbe de rabattement et de remontée du forage B.E.K.....	52
Figure IV.4: Coupe de forage et courbe de rabattement et de remontée du forage Ouakda 4.....	53
Figure IV.5: Coupe de forage et courbe de rabattement et de remontée du forage Kenadsa 2.....	54
Figure IV.6 : Carte de perméabilités de la zone d'étude ( $\times 10^{-4}$ m/s) .....	56
Figure IV.7 : Distribution de transmissivité dans la zone d'étude ( $\times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s) .....	57
Figure IV.8: Carte piézométrique 2013.....	51
Figure IV.9: Carte piézométrique 2018.....	60

Figure IV.10: Cartes piézométriques de comparaison (Campagnes, 2013 & Décembre, 2018).....	61
Figure IV.11: Variation du niveau piézométrique de champ captant Ouakda en fonction des précipitations mensuelles (Piézomètre 1).....	63
Figure IV.12: Variation du niveau piézométrique de champ captant Ouakda en fonction des précipitations mensuelles (Piézomètre 2).....	63
Figure IV.13: Corrélation transversale de l'Est vers l'Ouest.....	64
Figure IV.14: Corrélation longitudinale du Nord vers le Sud.....	65
Figure IV.15: Courbe d'étalonnage de forage J1-153 (BETA-Consults, 2011).....	66
Figure IV.16: Carte des sondages électriques de la région d'Oum Sebaa (BETAConsults, 2011).....	67
Figure IV. 17: Coupes géo-électriques de la région d'Oum Sebaa (BETAConsults, 2011).....	68
Figure IV. 18: Image Landsat 8 de la zone d'étude ( 15/02/2021).....	70
Figure IV. 19 : Carte des Diagrammes de Rose de la zone Kénadsa- Béchar.....	70
Figure IV. 20 : Carte synthétique de toutes les directions des linéaments.....	71

## CHAPITRE V

### ÉTUDE DE LA QUALITE HYDROCHIMIQUE DES EAUX

Figure V.1 : localisation des points d'échantillonnage.....	76
Figure V.2:Diagramme triangulaire de Piper (campagne 2013).....	93
Figure V.3:Diagramme triangulaire de Piper (campagne 2018).....	94
Figure V.4: Diagramme de Schoeller-Berkalof de l'aquifère de turonien de la campagne 2013.....	97
Figure V. 5:Diagramme de Schoeller-Berkalof de l'aquifère de turonien de la campagne 2018.....	98
Figure V.6: Diagramme ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) vs ( $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ ) et rapport molaire $Ca^{2+} / Mg^{2+}$ des eaux du Turonien dans la région d'étude.....	100
Figure V.7: les indices Chloro-alcalins - CAI 1 et CAI 2 indiquant le processus d'échange d'ions dans l'aquifère de turonien.....	101
Figure V.8:Relation entre $[(Ca+Mg) - (HCO_3+SO_4)]$ et $[Na+K-Cl]$ , dans les eaux..	102
Figure V.9:Les graphiques de Gibbs expliquent la chimie des eaux souterraines et le processus géochimique dans la région d'étude.....	103
Figure V.10:Projection de la chimie des eaux de la région d'étude sur le diagramme : Ec vs Na / Cl.....	104
Figure V.11 : Projection des variables sur le plan factoriel (1x2).....	109
Figure V.12 : Projection des variables sur le plan factoriel (1x3).....	109
Figure V.13 : La projection des individus sur le plan factoriel (1x2).....	111
Figure V.14 : Classification ascendante hiérarchisée des eaux à partir de 08 paramètres présentant une corrélation importante.....	113
Figure V.15 : Carte de répartition du Température.....	115
Figure V.16: Carte de répartition du pH dans la zone d'étude.....	116
Figure V.17 : Carte de répartition de la conductivité électrique (CE) dans la zone d'étude.....	117
Figure V.18 : Carte de répartition des résidus secs (RS) dans la zone d'étude.....	118
Figure V.19 : Carte de répartition de calcium ( $Ca^{2+}$ ) dans la zone d'étude.....	119
Figure V.20 : Carte de répartition de magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans la zone d'étude.....	120
Figure V.21 : Carte de répartition de Sodium ( $Na^+$ ) dans la zone d'étude.....	121
Figure V.22 : Carte de répartition de potassium ( $K^+$ ) dans la zone d'étude.....	122
Figure V.23 : Carte de répartition de Bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) dans la zone d'étude.....	123

Figure V.24 : Carte de répartition de Bicarbonates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans la zone d'étude.....	124
Figure V.25 : Carte de répartition de chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) dans la zone d'étude.....	125
Figure V.26 : Carte de répartition de Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) dans la zone d'étude.....	126

## CHAPITRE VI

### QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE

Figure VI.1 : Relation d'échange entre l'oued et la nappe.....	131
Figure VI.2 : Écoulement d'oued Béchar pendant une crue orageuse (Novembre, 2014) .....	132
Figure VI.3 : Eaux de l'oued mélangé aux eaux usées de la ville de Béchar.....	132
Figure VI.4 : Relations entre les coliformes totaux, coliformes fécaux et Escherichia – Coli. ....	133
Figure VI.5 : Points d'eau traités dans l'étude de l'indice de qualité microbiologique (Kabour et al.2015) .....	136
Figure VI.6 : Diagramme de variation des germes aérobies, coliformes totaux et fécaux (Kabour et ,2015) .....	137
Figure VI.7: Diagramme de variation des streptocoques fécaux dans la zone d'étude (Kabour et ,2015) .....	137
Figure VI.8: Classes de qualité correspondant aux couleurs standards.....	139

## CHAPITRE VII

### VULNERABILITE A LA POLLUTION ET PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU

Figure VII.1 : Définition des paramètres DRASTIC .....	144
Figure VII.2: Carte d'évaluation de la profondeur des eaux souterraines.....	146
Figure VII.3: Carte des taux de recharge nette.....	148
Figure VII.4: Carte de faciès lithologique.....	149
Figure VII.5: Carte d'évaluation des sols. ....	151
Figure VII. 6: Carte d'évaluation de la pente.....	152
Figure VII.7: Carte de l'impact de la zone vadose.....	154
Figure VII.8: Carte de la conductivité hydraulique.....	155
Figure VII.9: Illustration conceptuelle de la méthode DRASTIC pour la zone d'étude	156
Figure VII.10: Carte de vulnérabilité « DRASTIC » de la nappe Turonien, selon Aller L., et al., 1987. ....	157
Figure VII.11: Les classes de vulnérabilité de la nappe de turonien.....	158
Figure VII.11: Concentrations des nitrates par ouvrages de la nappe de turonien.....	159
Figure VII.12: Carte des nitrates. ....	160

## CHAPITRE VIII

### LES MESURES NECESSAIRES POUR LA DURABILITE DES RESSOURCES HYDRIQUES

Figure VIII.1: les types de la recharge des aquifères dans la nature.....	164
Figure VIII.2: les techniques de recharge artificielle (Díaz-Cruz et al., 2008).....	167
Figure VIII.3: Technique d'épandage en surface ( <a href="http://www.waterencyclopedia.com">www.waterencyclopedia.com</a> ).....	168
Figure VIII.4: Technique d'inondation (Ramasesha et al., 2007).....	169
Figure VIII.5: Bassins de recharge.....	170
Figure VIII.6: système de fossés et de sillons.....	171
Figure VIII.7: Système de puits de recharge.....	172
Figure VIII.8: Fossé de recharge.....	173
Figure VIII.9: Puits creusé.....	173
Figure VIII.10: Recharge induite.....	174
Figure VIII.11: schéma de détermination de la faisabilité de la réalisation des	175



ouvrages de la recharge artificielle des aquifères (Dillon and Pavelic, 1996) .....	
Figure VIII.12: Zone proposée pour la recharge artificielle.....	177
Figure VIII.13: Schéma d'installation proposée pour la recharge artificielle en utilisant les bassins d'infiltration.....	178

---

# Liste des tableaux

---

<b>CHAPITRE I</b>	
<b>SITUATION GEOGRAPHIQUE, APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE</b>	
Tableau I.1 : Occupation de sol. ....	13
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>APERÇU CLIMATOLOGIQUE</b>	
Tableau III.1. : Les coordonnées Géographiques de la station de mesures [ONM, Bechar].....	31
Tableau III.2: Coefficient pluviométrique de la région d’ONM Bechar .....	32
Tableau III. 3: Coefficient pluviométrique de la région de Mougheul.....	33
Tableau III.4 : Variation de précipitation moyenne mensuelle de la station d’ONM Bechar (1960-2018).....	35
Tableau III.5 : Variation des températures moyennes mensuelles (1983/1984-2003/2004)...	35
Tableau III.6: Données du diagramme ombro-thermique pendant une période de 59 ans 1960-2018 de la station d’ONM Bechar .....	35
Tableau III.7: Données du diagramme ombro-thermique pendant une période de 59 ans 1960-2018 de la station de Mougheul.....	37
Tableau III.8: Données d’humidité relative moyennes mensuelles (2000-2014) des stations de ONM Bechar et de Mougheul (Global Weather Data for SWAT ).....	38
Tableau III.9 : Vitesses moyennes mensuelles du vent à la station de Béchar (1970 – 2000).....	40
Tableau III.10: Bilan hydrologique calculé à partir de la formule de Thornthwaite sur une période de 59 ans (1960-2018) pour la station de Mougheul.....	43
Tableau III.11: Bilan hydrologique calculé à partir de la formule de Thornthwaite sur une période de 59 ans (1960-2018) pour la station d’ONM Bechar.....	44
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Etude hydrogéologique</b>	
Tableau IV.1 : Débit exploité des cinq forages d’AEP.....	50
Tableau IV.2 : Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du Turonien du bassin crétacé de Béchar.(ANRH Bechar).....	55
Tableau IV.3: Ouvrages impliqués et gradients hydrauliques de la nappe Turonien (Campagne de février, 2013).....	58
Tableau IV.4: Ouvrages impliqués et gradients hydrauliques de la nappe de Turonien (Campagne de février, 2018).....	60
Tableau IV.5: Caractéristiques des piézomètres de contrôle dans le champ captant d’Ouakda.....	62
Tableau IV.6: Chroniques piézométriques et pluviométriques (2008-2013).....	62
Tableau IV. 7: caractéristiques de dispositif de mesure.....	66
Tableau IV. 8: formations trouvées d’après les études géophysiques.....	66
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>ÉTUDE DE LA QUALITE HYDROCHIMIQUE DES EAUX</b>	
Tableau V.1 : Paramètres physico-chimiques des forages (campagne 2013).....	75
Tableau V.2 : Paramètres physico-chimiques des forages (campagne 2018).....	77
Tableau V.3 : Les normes algériennes et les normes de L’OMS (OMS ,2011) .....	78
Tableau V.4 : Variation de la température pendant le suivi (2013 et 2018).....	79
Tableau V.5 : Variation de la conductivité pendant les suivis (2013 et 2018).....	80
Tableau V.6 : Variation de la minéralisation pendant le suivi (2013 et 2018).....	81
Tableau V.6 : Classement de la minéralisation des eaux de la nappe Turonienne pendant le suivi (2013 et 2018) .....	81

Tableau V.8 : Variation de la salinité pendant le suivi (2013 et 2018).....	82
Tableau V.9: Variation de TDS pendant le suivi (2013 et 2018).....	82
Tableau V.10 : Variation de PH pendant le suivi (2013 et 2018) .....	83
Tableau V.11 : Variation de $Ca^{2+}$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	84
Tableau V.12 : Variation de $Mg^{2+}$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	85
Tableau V.13 : Variation de $Na^+$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	85
Tableau V.14 : Variation de $K^+$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	86
Tableau V.15 : Variation de $Cl^-$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	86
Tableau V.16 : Variation de $SO_4^{2-}$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	87
Tableau V.17 : Variation de $HCO_3^-$ pendant le suivi (2013 et 2018).....	88
Tableau V.18 : Variation de $NO_3^-$ pendant le suivi (2013 et 2018) .....	88
Tableau V.19 : Variation de $Si^{+2}$ pendant le suivi (2013 et 2018) .....	89
Tableau V.20 : Les types des faciès chimiques dans la zone d'étude en fonction des campagnes.....	90
Tableau V.21 : Faciès chimique des eaux des forages (campagne 2013).....	91
Tableau V.22 : Faciès chimique des eaux des forages (campagne 2018) .....	92
Tableau V.23 : Les valeurs de l'indice de saturation (SI).....	105
Tableau V.24 : Moyenne et écart-type des paramètres physicochimiques .....	106
Tableau V.25 : Matrice de corrélation Pearson des paramètres physico-chimiques des eaux du Turonien.....	107
Tableau V.26 : Les valeurs propres.....	108
Tableau V.27 : Corrélation entre les variables et les facteurs (% après rotation Varimax	108
Tableau V.28 : Caractéristiques physico-chimiques de chaque grappe (concentrations (médianes en mg/L.....	113

## CHAPITRE VI

### QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE

Tableau VI.1 : Exemples de maladies microbiennes associées à l'eau .....	135
Tableau VI.2 : Classes de qualité correspondant aux différents paramètres.....	138
Tableau VI.3 : Classification des paramètres pollués selon cinq classes de qualité (IQM). Contamination fécale IQM.....	138
Tableau VI.4 : Résultats d'application de la méthode de <a href="#">Bovesse et Depelchin, 1980</a> (l'indice de qualité Microbiologique IQM).....	139

## CHAPITRE VII

### VULNERABILITE A LA POLLUTION ET PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU

Tableau VII.1 : Poids attribués pour des paramètres Drastic ( <a href="#">Aller et al., 1987b</a> ).....	145
Tableau VII.2: L'intervalle et la notation de la profondeur des eaux souterraines d'après ( <a href="#">Aller et al., 1987b</a> ).....	146
Tableau VII.3 : L'intervalle et la notation de la recharge nette d'après ( <a href="#">Aller et al. 1987b</a> ).....	147
Tableau VII.4 : Classification des milieux aquifères d'après ( <a href="#">Aller et al. 1987b</a> ).....	149
Tableau VII.5 : Classification des milieux de sol d'après ( <a href="#">Aller et al. 1987b</a> ).....	150
Tableau VII. 6 : Classification des pentes d'après ( <a href="#">Aller et al., 1987b</a> ).....	151
Tableau VII.7 : Classification de la zone vadose d'après ( <a href="#">Aller et al., 1987b</a> ).....	153
Tableau VII.8 : Classification des conductivité hydraulique d'après ( <a href="#">Aller et al., 1987b</a> ).....	155
Tableau VII.9 : les concentrations des nitrates et interprétation ( <a href="#">ABULUDE et al. 2018</a> ).....	159

---

# Liste des abréviations

---

ANRH	: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
DHW	: Direction de l'hydraulique de la Wilaya de Béchar
ONM	: Office National de Météorologie
DPAT	: Direction de Planification et Aménagement du Territoire
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
MNT	: Modèle Numérique du Terrain
AEP	: Alimentation en Eau Potable
P	: Lamme d'eau précipitée
D	: Déficit d'écoulement
Q	: Ecoulement
L	: Longueur
H	: Hauteur piézométrique
T°	: Température
PZ	: Piézomètre de contrôle
GPS	: Global Positioning System
ETP	: Evapotranspiration Potentiel
ETR	: Evapotranspiration Réelle
CE	: Conductivité Electrique
pH	: Potentiel en Hydrogène
RS	: Résidu Sec
μS	: Micro-Siemens
K	: Perméabilité
T	: Transmissivité
R	: Rayon de rabattement
N.S.	: Niveau Statique
NPZ	: Niveau Piézométrique
i	: Gradient hydraulique
WHO	: Word health organisation
O.R.G.M	: Office National de la Recherche Minière
SGA	: Service géologique d'Algérie
RFU	: Réserves facilement utilisées

---

# **Avant Propos**

---

# **AVANT PROPOS**

---

Ce travail a été réalisé sous le couvert du Laboratoire des ressources en eau de l'Université Abu Bakr Belkaid, Tlemcen. A cette occasion, je voudrais exprimer mes remerciements et ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé et participé à la réalisation de ce travail, et sans leur contribution ce travail n'aurait pas vu le jour, et sans oublier les directeurs encadrant toutes les institutions qui nous ont fourni les données et informations nécessaires pour mener à bien cette étude.

Cette thèse a été supervisée par les professeurs Habi Mohamed, professeur à l'Université Abu Bakr Belkaid de Tlemcen, ainsi que par le docteur Morsli Boutkhil, directeur de l'Institut national des recherches forestières de la wilaya de Tlemcen.

J'exprime mes vifs remerciements et ma gratitude à monsieur Mekkaoui Abderahmane et au monsieur Merzougui Touhami, professeurs au niveau de l'Université Tahri Mohammad de la wilaya de Béchar, pour leurs précieux conseils et conseils scientifiques, qui ont grandement contribué à faire avancer ce travail en raison de leur longue expérience dans ce domaine ainsi que des études antérieures qu'ils ont menées au niveau de la région de Béchar.

Nous ne manquerons pas non plus de remercier sincèrement les membres du jury pour leur générosité en acceptant le jugement, les critiques constructives et les précieuses remarques sur ce modeste travail.

M. CHIBOUB F. Abdelghani, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui préside le jury chargé de superviser cette thèse.

M. BENKHELIFA Mohamed, Professeur à l'Université de Mostaganem, qui a accepté d'étudier ce travail.

M. BEKKOUSSA S. Belkacem, Professeur A à l'Université de Mascara, qui a accepté de siéger au jury de cette thèse.

Je tiens à remercier M. Taha Ansari, directeur régional à l'Agence nationale des ressources hydriques ANRH d'Adrar, et tous les ingénieurs travaillant dans l'agence qui ont fourni des données relatives aux points d'eau dans la zone d'étude réalisée par l'agence.

Enfin, je ne peux oublier de remercier ma famille, mes amis et collègues de travail pour leur soutien moral et intellectuel tout au long des années que nous avons passées à développer ce travail et à préparer cette thèse.



---

# **Introduction Générale**

---

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'existence de l'eau est principalement liée à l'existence et à la continuité du lieu où se trouve cette précieuse ressource, et cela se reflète dans l'aspect social et économique des nations, qui repose sur des piliers, notamment l'agriculture et l'industrie, qui ne peuvent se développer sans la présence de la ressource en eau. Au vu de l'évolution démographique du tissu démographique de notre pays, le gouvernement essaie toujours de créer un système de gestion solide et cohérent, en réalisant de nombreux projets importants qui augmentent la capacité de stockage de l'eau, mais le problème s'aggrave, en particulier dans les régions du sud, soumises à un climat sec, où la dépendance est principalement en eaux souterraines et en raison de la rareté des précipitations dans ces zones ; ce qui affecte négativement la régénération de ces ressources souterraines, ainsi que la qualité de ces eaux, qui n'est pas apte à répondre aux besoins des habitants de ces zones, en eau potable, comme c'est le cas avec le système aquifère de Turonien dans la région de Béchar.

La ville de Béchar dépend fortement de l'eau du barrage de Djorf-Torba, situé à l'ouest du chef lieu de la wilaya à un taux de près de 80% ([Kabour et al., 2011](#)). Environ 20% des besoins de la population de la région proviennent de l'exploitation des eaux souterraines du système aquifère de turonien de Ouakda, qui est le plus épuisé, en raison de la qualité de son eau. Le taux de consommation qui augmente en période estivale, et du niveau du barrage de Djorf-Torba qui diminue en raison du manque de précipitations et de sa fluctuation, provoquent ainsi un pourcentage de consommation d'eau souterraine élevé ([Aloui R., et al., 2015](#)). Un autre volume de cette eau est utilisé pour irriguer les terres agricoles, en particulier dans la zone de Ouakda, reconnue par son caractère agricole. En raison de la croissance démographique rapide et incontrôlée et des besoins qui ne cessent d'augmenter, les responsables de la gestion des ressources en eau de la région sont obligé de creuser de nouveaux points d'eau, ce qui met de plus en plus de pression sur la capacité de consommation de la couche d'eau Turonien, et affecte le niveau de cette nappe d'eau, tout en affectant également négativement la qualité physicochimique de l'eau .

Dans la zone d'étude, la couche d'eau de Turonien est considérée comme la plus épuisée, car elle est exploitée avec un régime croissant et continu. La charge chimique de

ces eaux est variable et affectée en fonction des saisons climatiques, à des périodes de fortes précipitations et à des périodes connues sous le nom de rareté des précipitations. La qualité de l'eau est une préoccupation constante pour les responsables de la distribution de l'eau dans la zone, une situation qui nécessite des études approfondies pour connaître les facteurs contrôlant le changement de la nature physico-chimique de l'eau, et pour permettre d'élaborer un plan précis et clair de gestion des eaux souterraines pour cette région. Afin d'assurer la durabilité de l'utilisation de ces ressources, de nombreuses études ont été menées sur les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines dans les zones adjacentes à la zone d'étude, mais la plupart se sont limitées à l'identification des aspects chimiques de ces eaux.

Selon les études géologiques appliquées sur les formations du turonien dans la région d'étude (Idrotecneco, 1976 ; Mekideche D et al., 1995), la nappe du turonien occupe tout le secteur Nord-Ouest de la zone d'étude. Cette nappe fait partie du bassin créacé d'Errachidia –Béchar et se présente comme la ressource la plus importante et la plus exploitée avec un taux de consommation de 20 % (Kabour et al., 2011). Dans la région d'étude, l'affleurement des calcaires Turoniens contourne le bassin Béchar-Kénadsa et il est facilement reconnaissable à ses caractères morphologiques de falaises et sa coloration très claire. Le Turonien est formé par une dalle de calcaire blanc, gris, rose, en gros bancs avec silex, parfois dolomitisé, la puissance est de 25 à 45 m. Le mur de cet aquifère est constitué par une série essentiellement marneuse du Cénomaniens (45 – 50m). Le toit de l'aquifère est constitué de marnes sableuses bariolées avec des bancs d'évaporites (gypse, anhydrite et sel gemme), du Sénonien dont la puissance au centre du bassin est de 700 à 800 m (Lachache et al., 2018).

A travers ce travail de thèse, nous visons à mener une étude approfondie du système aquifère de Turonien. Un diagnostic hydrochimique détaillé du bassin de Turonien sera effectué à travers les données que nous avons obtenues au niveau de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) et des analyses que nous effectuerons sur cet aquifère. A travers de toutes ces données, nous pouvons étudier le développement hydro-chimique de ces eaux, déterminer les processus hydro-chimiques, maîtriser le développement et le changement en termes de changement de temps et de lieu, tout en essayant de définir la géométrie de ce système complexe, afin de développer un système visant la préservation de ce système par une bonne gestion de cette ressource précieuse

Dans cette thèse, nous nous sommes appuyés sur un certain nombre d'outils, de méthodes et d'informations utilisés dans le processus de diagnostic. Aussi nous nous

appuyés sur des références et des recherches antérieures dans le domaine, afin de bien comprendre ce système d'eau, de même que nous nous sommes appuyés sur des moyens géologiques, hydrogéologiques et hydro-chimiques représentés par des coupes géologiques des points d'eau et de puits réalisés par la direction des ressources en eau de la wilaya de Béchar, et en utilisant des données ioniques pour les puits résultant de nombreuses campagnes d'échantillonnage, pour réaliser des cartes illustrant la répartition géographique de ces éléments et minéraux physicochimiques dans la zone d'étude.

Le plan adopté pour ce travail se présente en trois grandes parties essentielles :

La première partie est consacrée à la présentation géographique, géologique, hydro climatologique et hydrogéologique de la région, et à la situation géographique de la zone d'étude : Identification géologique ; Étude climatologique ; Étude hydrogéologique.

La deuxième partie est consacrée à l'étude hydro-chimique et bactériologique, et l'étude de la vulnérabilité à la pollution de la nappe de turonien et qui comprend : Étude de la qualité hydro chimique des eaux ; Étude de la qualité bactériologique des eaux souterraines et de surface et vulnérabilité à la pollution et protection. La troisième partie est consacrée à la réflexion aux mesures nécessaires pour assurer la durabilité des ressources hydriques

Finalement, le manuscrit s'achève par une conclusion générale dans laquelle nous mentionnerons la nature du problème posé, les objectifs de ce travail, la méthode d'approche adoptée et les principaux résultats obtenus et les principales conclusions.

Des recommandations générales sont proposées à la fin de cette étude.

---

**Chapitre I**  
Situation géographique,  
Aperçu géomorphologique

---

# CHAPITRE I

## SITUATION GEOGRAPHIQUE, APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE

### 1. Situation géographique

La zone d'étude se situe dans la région Nord de la wilaya de Bechar et appartient au domaine du Grand erg occidental. Ce secteur qui comptabilise une population totale de 347 385 habitants selon les données de la Direction et Planification et de L'aménagement du territoire (D.P.A.T, 2018), s'étend sur trois daïras et quatre communes (Bechar, Kénadsa, Lahmar et Boukais), réparties sur une superficie d'environ 3500 km<sup>2</sup> (Fig. I.1) selon les coordonnées géographiques suivantes : 32°11'12'' N, 1°42'18''O et 30°53'28''N, 2°44'52''O, dont les limites administratives peuvent être définies comme suit:

- Au Nord-Ouest : par la ville de Mougheul) ;
- Au Sud : par la ville d'Abadla ;
- A l'Ouest : par les villes de Kénadsa et Boukais :
- A l'Est : par les villes de Bechar et Taghit.

La zone d'étude a comme limites géomorphologiques:

- Au Nord: Jebel Horreit, Jebel Antar et la plaine de oued talzaza ;
- Au Sud : Chebket raouia et Garet el hamra;
- A l'Est : Dj. Bechar et Erg el fateg;
- A l'Ouest : Gara MSAKA et Garet el itima .

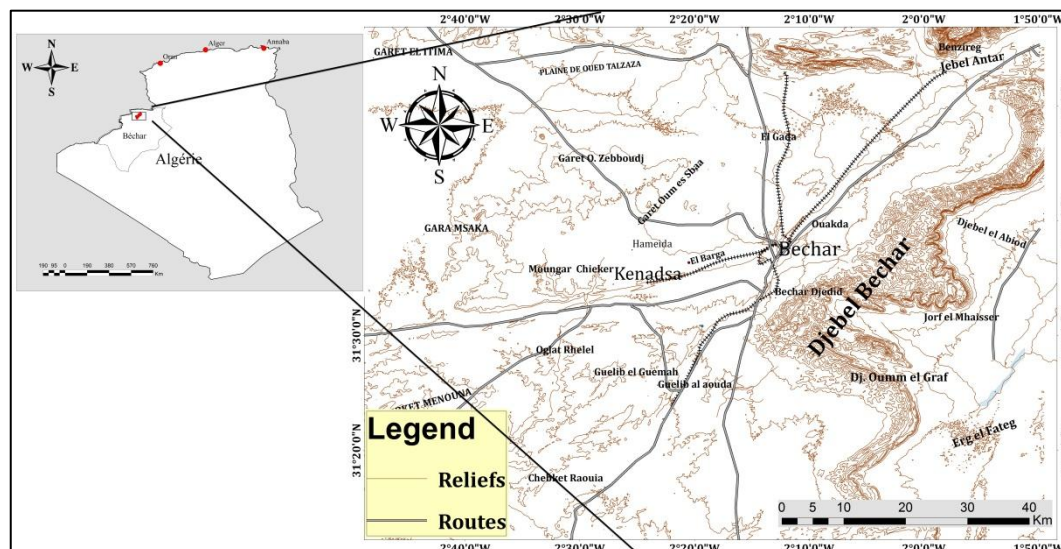


Figure I.1 : localisation de la zone d'étude.

## 2. Morphologie

La zone d'étude se caractérise par divers ensembles géomorphologiques (Fig. I.2), dont nous noterons :

### ➤ Le djebel Béchar

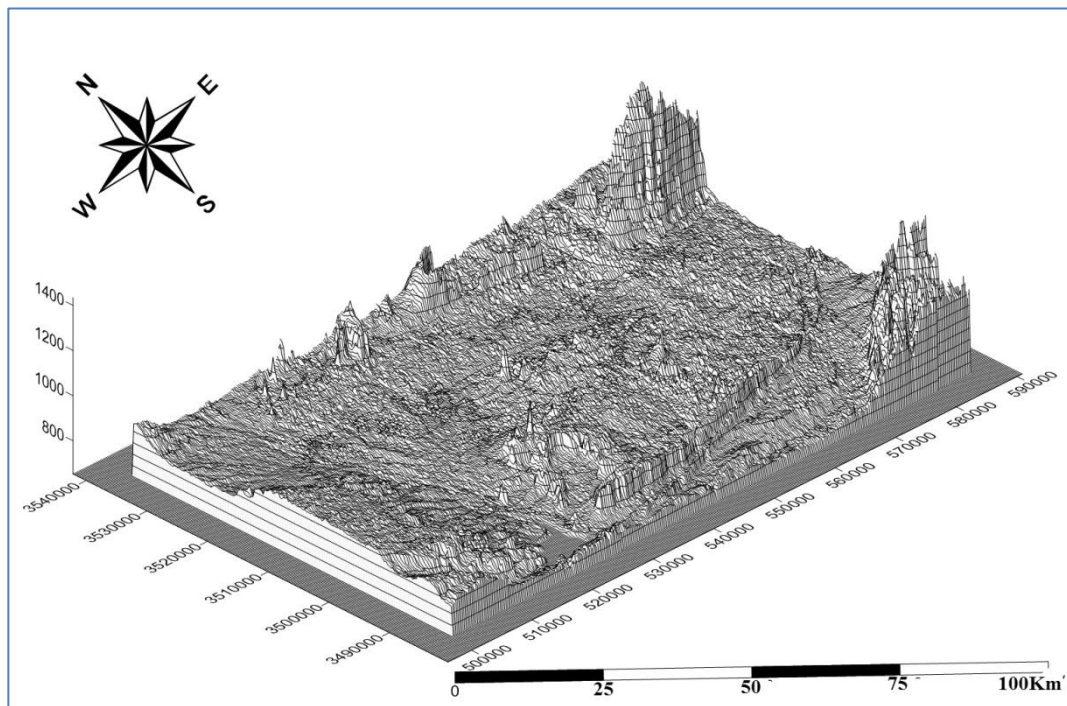
Il correspond à une succession de série montagneuse de direction N – S qui s'étend sur une distance de 84 km et se compose de Djebel Bechar, Djebel El abiod, Djebel Oumm el Graf et Djebel Guettara, à la fin de cette chaîne. L'élévation maximale de cette chaîne culmine à 1480 m au sommet de Djebel Bechar, puis s'atténue vers le Sud pour se confondre avec la Hamada du Guir au niveau de la région d'Igli. Cette chaîne montagneuse sépare deux grands bassins versants de la région : le bassin versant de Zousfana à l'Est et le bassin versant de Bechar à l'Ouest.

### ➤ Le plateau d'Oum Sba

Le plateau d'Oum Sba est considérée comme le témoin le plus célèbre qui est indiqué par des reliefs (barga) sur une élévation de (950 m) et qui s'étendent de la ville de Béchar jusqu'à la ville de Kénadsa du côté Nord, en formant un escarpement méridional de ce plateau. La première barga est cénomano-turonienne, la seconde est tabulaire d'âge tertiaire.

### ➤ La Chabket Mennouna

La Chabket Mennouna est un espace avec de faibles dénivellations (pénéplaines carbonifères) qui s'étend au Sud-ouest de Béchar et se compose de petites crêtes rectilignes monoclinales. Cet espace est déchiqueté par un réseau hydrographique dite chabket Mennouna, composé de plusieurs chaînons dont les plus célèbres sont Guelib El Aouda et Guelib El Guemah.

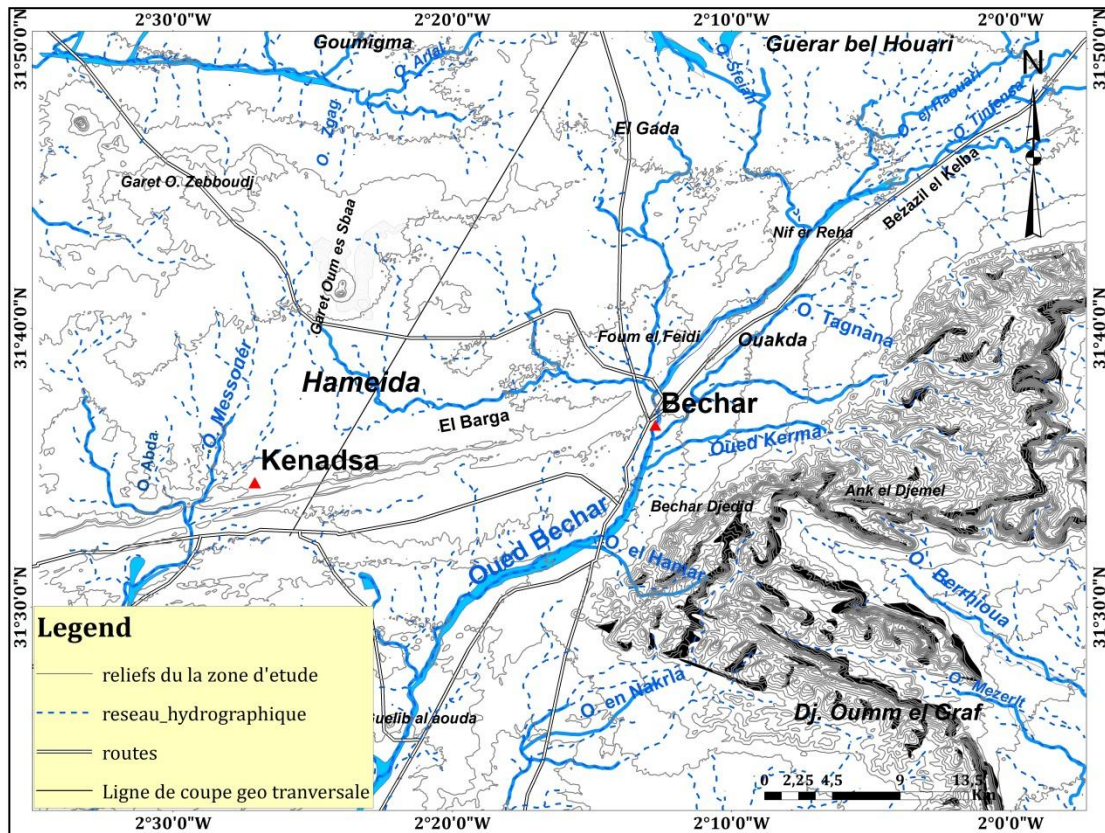


**Figure I.2:** Modèle numérique du site de la zone Kénadsa-Bechar

### 3. Réseau hydrographique

La zone d'étude est caractérisée par un réseau hydrographique moyennement développé, à écoulement irrégulier et temporaire, qui comprend de nombreux oueds dont les plus importants sont ceux de Bechar. D'autres oueds (Fig. I.3) comme Oued Tagnana, Oued Kerma, Oued Messouer, Oued el Hamam, Oued Arlal, Oued Berrhioua, Oued Sedour et Oued el Houari, drainent également la zone d'étude et s'écoulent vers la zone agricole de Ouakda. Tous ces oueds forment des veines pour alimenter le cours d'eau principal qui est Oued Bechar.





**Figure I.3 :** Réseau hydrographique de la région d'étude

#### 4. Occupation de sol

L'occupation du sol est un paramètre d'évaluation de l'influence humaine sur le milieu naturel. Elle est estimée dans cette étude par des techniques de traitement et de classification d'images satellites, issues de la télédétection (Fig. I.4). Ainsi, pour la région étudiée, quatre classes d'occupation ont été choisies : Terrain nu, zone urbaine, végétation et surface d'eau. La réalisation de cette carte s'appuie sur les images satellitaires de type Landsat TM8 (Février 2020) fournies par U.S. Geological Survey (Earth Explorer; 2020)

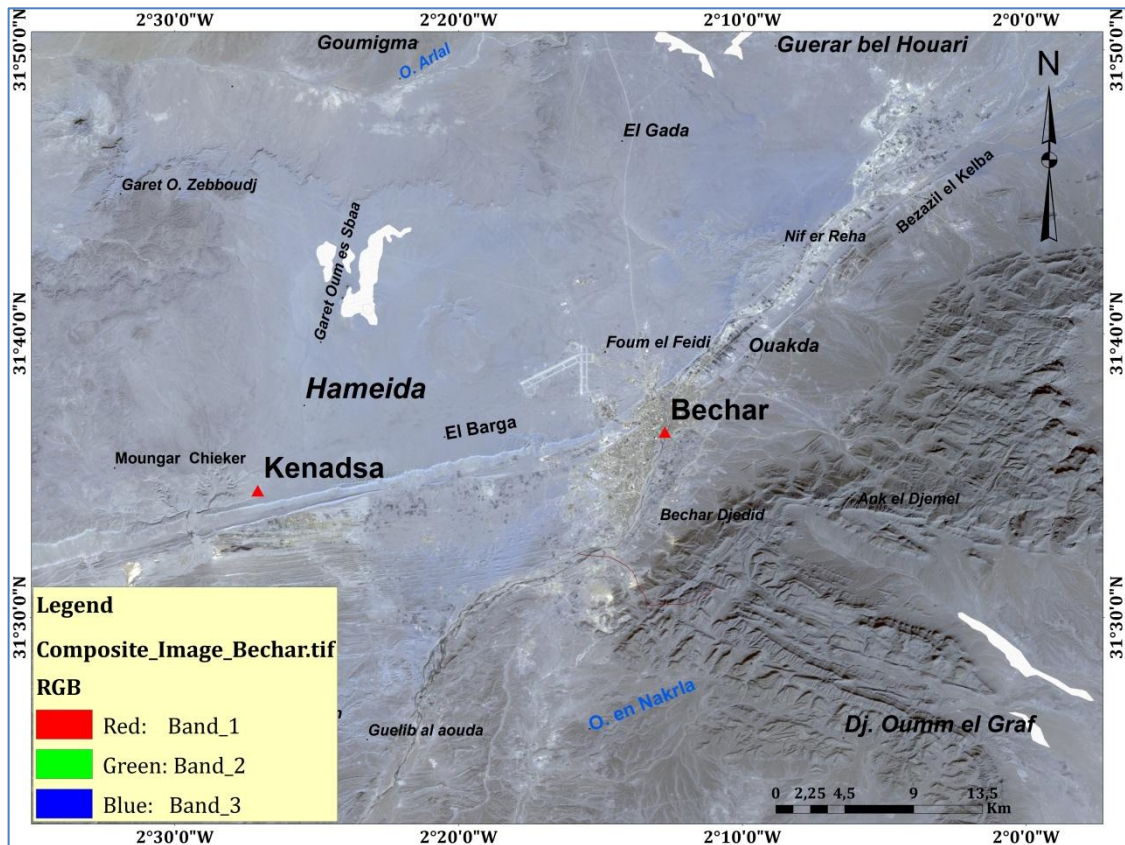


Figure I.4 : Image satellitaire de la zone d'étude (Landsat TM 8).

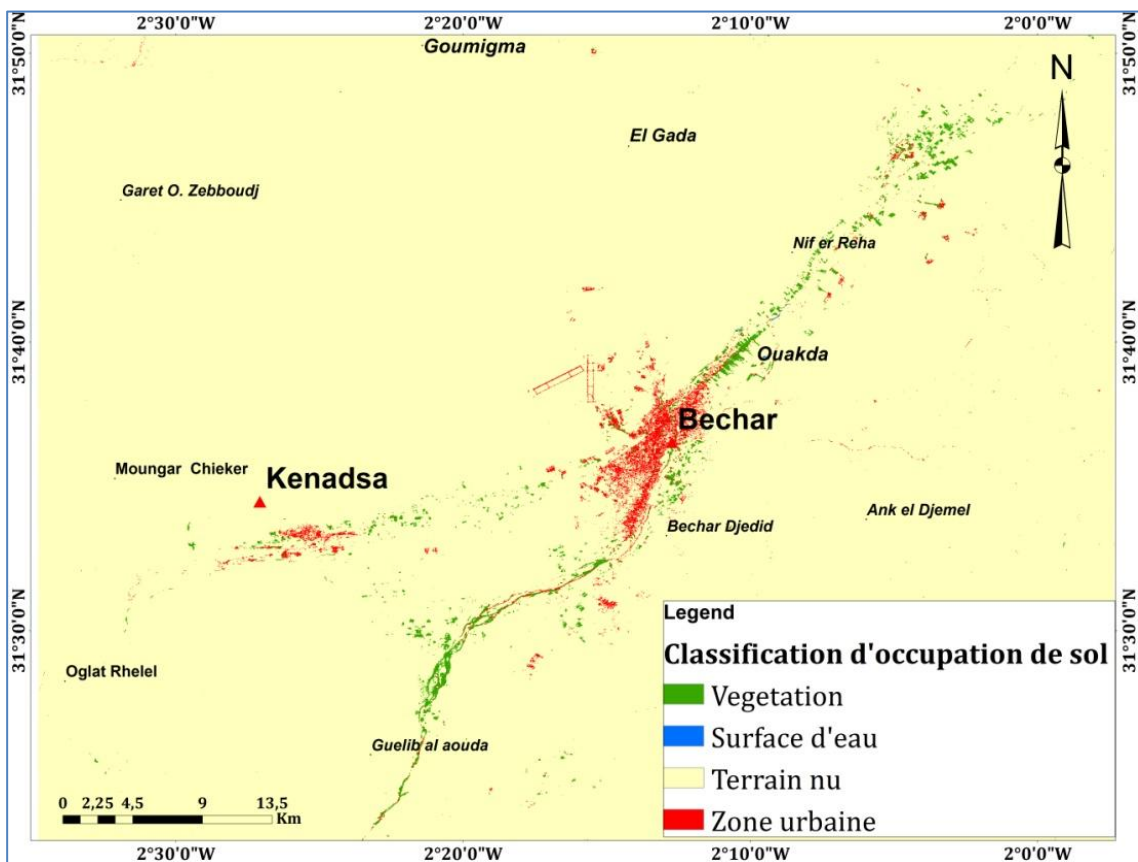


Figure I.5 : Classification de l'occupation des sols dans la zone d'étude.

**Tableau I.1** : Classe d'occupation des sols de la région d'étude.

Classe d'occupation	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Surface (%)
Terrain nu	3448,332	0,98863	98,863
Zone urbaine	20,955	0,00601	0,601
Végétation	18,618	0,00534	0,534
Surface d'eau	0,084	0,00002	0,002

Ce qui peut être constaté à partir du tableau I.1 et de la figure I.5, c'est que la région est principalement un secteur rural occupé à 98,863% par des terrains nus qui s'expliquent essentiellement par les conditions géographiques et climatiques du milieu.

Les zones urbaines quant à elles occupent 0,601% du terrain réparti au centre et à l'Ouest de la zone d'étude sur les villes (Béchar, Kénadsa et Meridja) dont le secteur tertiaire représente l'activité économique principale.

Pour ce qui est de la végétation qui englobe, dans cette étude, le couvert végétal naturel et la végétation issue des zones agricoles, elle représente près de (0,534%) de la zone d'étude.

La couverture végétale naturelle au niveau de la zone d'étude est très modeste puisque le terrain est, pour rappel, majoritairement nu sauf pour quelques zones éparées où sont retrouvées des touffes espacées d'alfa et autres plantes herbacées. Sont retrouvées également certaines espèces végétales dans les zones irriguées à vocation agricole particulièrement dans la région de Ouakda et Mougheul, reconnues pour leurs caractères agricoles.

La densité moyenne de la couverture agricole est la conséquence de divers facteurs résultant à la fois des conditions climatiques, puisque la région enregistre de faibles intempéries (90 mm/an), des chaleurs élevées notamment durant la période estivale et des conditions de dégradation du facteur anthropique tel que la difficulté du travail du sol, liée à la nature du sol, la baisse de la qualité et de la quantité d'eau dans cette région, par conséquent l'abandon par l'homme des travaux agricoles pour se tourner davantage vers des activités commerciales et administratives.

Enfin pour ce qui est des étendues d'eau, celles-ci représentent 0,002% du territoire et constituent le réseau hydrographique de la région.

En résumé, on constate que l'influence humaine sur le milieu naturel est très faible, ce qui assure le bon fonctionnement des mécanismes hydrologiques sans influencer les valeurs des débits. Néanmoins au niveau des zones agricoles, l'activité humaine peut avoir

une influence sur la qualité de l'eau souterraine à travers l'utilisation excessive des engrais, ce qui provoque l'apparition de fortes teneurs en nitrate dans certains points d'eau.

## **5. Situation démographique et socio-économique**

### **5.1. Situation démographique**

La population de la wilaya de Béchar a atteint 347 385 habitants lors du dernier recensement. Selon ces statistiques, la densité de population est estimée à 2.15 habitants/km<sup>2</sup> (DPAT, Bechar, 2018) avec un taux de croissance annuel de 2.1 %.

Quant au lieu d'étude, la population a atteint environ 233 763 personnes avec une densité de population estimée à 42.50 personnes/km<sup>2</sup>. Cette population est répartie sur chacune des communes de Béchar (214 985 habitants), Kénadsa (16398 habitants), Boukais (1047 habitants), Mougheul (633 habitants) et Al-Meridja (700 habitants) (DPAT, Bechar, 2018), et est principalement composée de tribus Doui Menai et Ouled Djerir, concentrées pour l'essentiel dans les communes de Bechar et Kénadsa. Notons également les ksouris qui se concentrent au Nord de la zone d'étude (Mougheul, Boukais et Lahmar).

### **5.2. Situation socio-économique**

Le secteur tertiaire constitue le point névralgique de la structure économique de la wilaya de Bechar. En plus des secteurs de services et de l'administratif, le secteur du tourisme est une ressource importante pour la wilaya, en particulier pendant la saison touristique qui attire un grand nombre de touristes de l'extérieur de la wilaya ainsi que de l'étranger, venant profiter des zones touristiques comme Taghit, Kénadsa, Beni Abbes, etc.). Le tourisme est devenu un secteur de plus en plus important, particulièrement ces dernières années, grâce aux investissements faits par le gouvernement dans ce domaine et à la stabilité de la situation sécuritaire.

Le secteur agricole occupe le troisième rang en raison de la nature rurale de la région. Cependant, n'étant pas encore suffisamment productif en raison des facteurs climatiques difficiles et du manque de précipitation qui limite son développement, ce secteur n'est pas à l'heure actuelle en mesure de répondre aux besoins économiques de la population.

## 6. Conclusion

La région d'étude se situe dans la région Sud-ouest de la wilaya de Bechar et elle appartient à la zone du Grand erg occidental. Ce secteur s'étend sur trois dairas et quatre communes (Bechar, Kénadsa, Lahmar et Boukais ) avec une population totale de 347 385 Habitants.

D'un point de vue géomorphologique, la zone d'étude présente une diversité géomorphologique composée de djebel Béchar qui correspond à une succession des séries montagneuses de direction N – S ; du plateau d'Oum Sba qui est considérée comme un témoin plus célèbre qui indique aux reliefs (barga) et de Chabket Mennouna qui s'étend au Sud-ouest de Béchar et se compose de petites crêtes rectilignes monoclinales.

Le relief de la zone d'étude est drainé par un réseau hydrographique moyennement développé, à écoulement irrégulier et temporaire.

Pour ce qui est de l'occupation du sol, la classification des images satellites montre que le sol est majoritairement occupé par des terrains nus sur lesquels prolifèrent trois villes (Béchar, Kénadsa et Meridja). La couverture végétale répartie de manière éparse à travers le territoire est très modeste et se compose de touffes espacées d'alfas et d'autres plantes herbacés. Certaines espèces végétales sont également présentes dans les espaces irrigués à vocation agricole (Ouakda et Mougheul).

L'étude démographique de la zone d'étude montre que la population locale est en constante croissance (2,1%) et qu'elle se répartie sur les communes de Bechar, Kénadsa, Boukais, Moughel et Al-Meridja. L'activité économique de ces communes est concentrée principalement sur le secteur tertiaire (service et administratif), secondairement sur le secteur touristique grâce aux zones touristiques comme (Taghit, Kénadsa, Beni Abbes, etc.) et enfin sur le secteur agricole qui au vu des conditions climatiques de la région, reste très limité.

---

# **Chapitre II**

## Aperçu géologique

---

---

# Chapitre II

## Aperçu géologique

---

### 1. Introduction

La géologie est l'étude de la Terre, des matériaux dont elle est faite, de la structure de ces matériaux et des processus qui agissent sur eux. La science de la géologie est très recommandée dans les études d'analyse hydrogéologique, car elle donne d'une part une idée sur les zones qui peuvent être des aquifères et d'autre part, elle permet de faciliter la procédure de suivi en fonction de l'espace et du temps. La cartographie géologique de la zone d'étude est basée essentiellement sur les anciens travaux d'Idrotecnico 1976 et d'autres auteurs.

La région de Bechar est caractérisée par un caractère géologique diversifié et elle contient de multiples formes de terrain naturel, ce qui en fait une région vierge. Pour effectuer des études géologiques qui peuvent être prolongées de l'ère du précambrien à l'heure actuelle, de nombreux experts l'ont classée comme faisant partie de la zone de transition entre la plate-forme du Sahara et la zone de l'Atlas.

Nous essayons ici de faire une introduction géologique simplifiée de cette région à travers la mention des différentes caractéristiques pétrographiques mentionnées et des différentes configurations de base. Nous donnons ici un aperçu géologique de cette zone, volontairement conçu dans un esprit minimaliste, en commentant la carte géologique. Cet aperçu inclut un rappel des caractéristiques pétrographiques et structurales des différentes configurations, ce qui permet de définir et d'évaluer les potentiels en termes d'agrégats.

### 2. Cartes géologiques

Les cartes géologiques sont des documents d'information indispensables pour le professionnel, l'enseignant, l'étudiant ou l'amateur. Elles permettent de visualiser, de quantifier et d'évaluer un nombre considérable de données sur le sol et le sous-sol, telles que: l'exploitation des ressources minérales, la découverte et la gestion des eaux souterraines, la lutte contre les pollutions, la prévention des risques naturels et

l'implantation de l'urbanisme. Au vu de cette importance, nous exposons sommairement l'ensemble des cartes géologiques disponibles pour notre secteur de recherches :

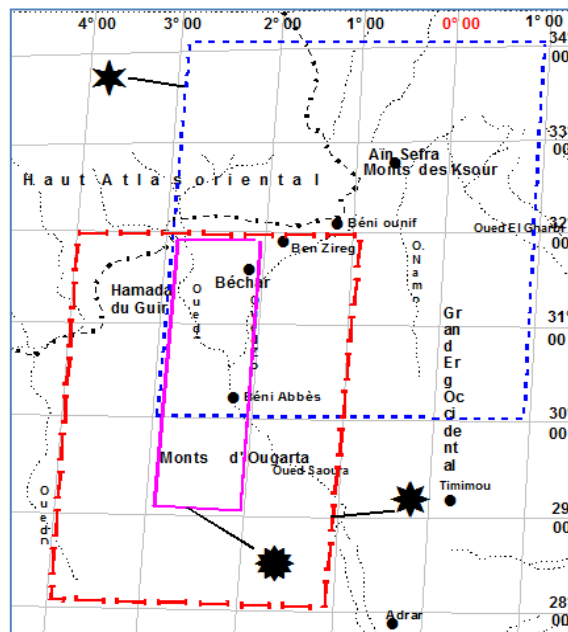
➤ **Les coupures spéciales au 1/500 000e**

On peut situer notre secteur de recherche sur des cartes au 1/500 000<sup>e</sup> en coupures spéciales (Fig. II.1). Le Nord de l'Algérie est couvert par ces coupures et comprend Constantine Nord, Constantine Sud, Alger Nord, Alger Sud, Oran Nord et Oran Sud. C'est précisément cette dernière qui nous sera utile dans le cadre de cette étude.

- **La carte Oran Sud (1)**: Elle englobe les monts des Ksour et le bassin de Béchar (Fig. II.1). Elle est dressée d'après les études personnelles de (Cornet. et al., 1951) du (Dresnay , 1975) , (Lucas, 1952). Elle est basée sur la première édition au 1/500 000<sup>e</sup> de (Menchikoff. 1930) et éditée par le Service Géologique de l'Algérie en 1951.

- **La carte de Hamada du Guir (2)** : éditée par le Service Géologique du Maroc en 1950. Elle couvre largement le territoire de notre intervention.

**La carte du Sahara Nord-occidental (3)** : levée par (Chavaillon ,1972) et éditée par le CNRS en 1964. Elle concerne le bassin de Béchar.

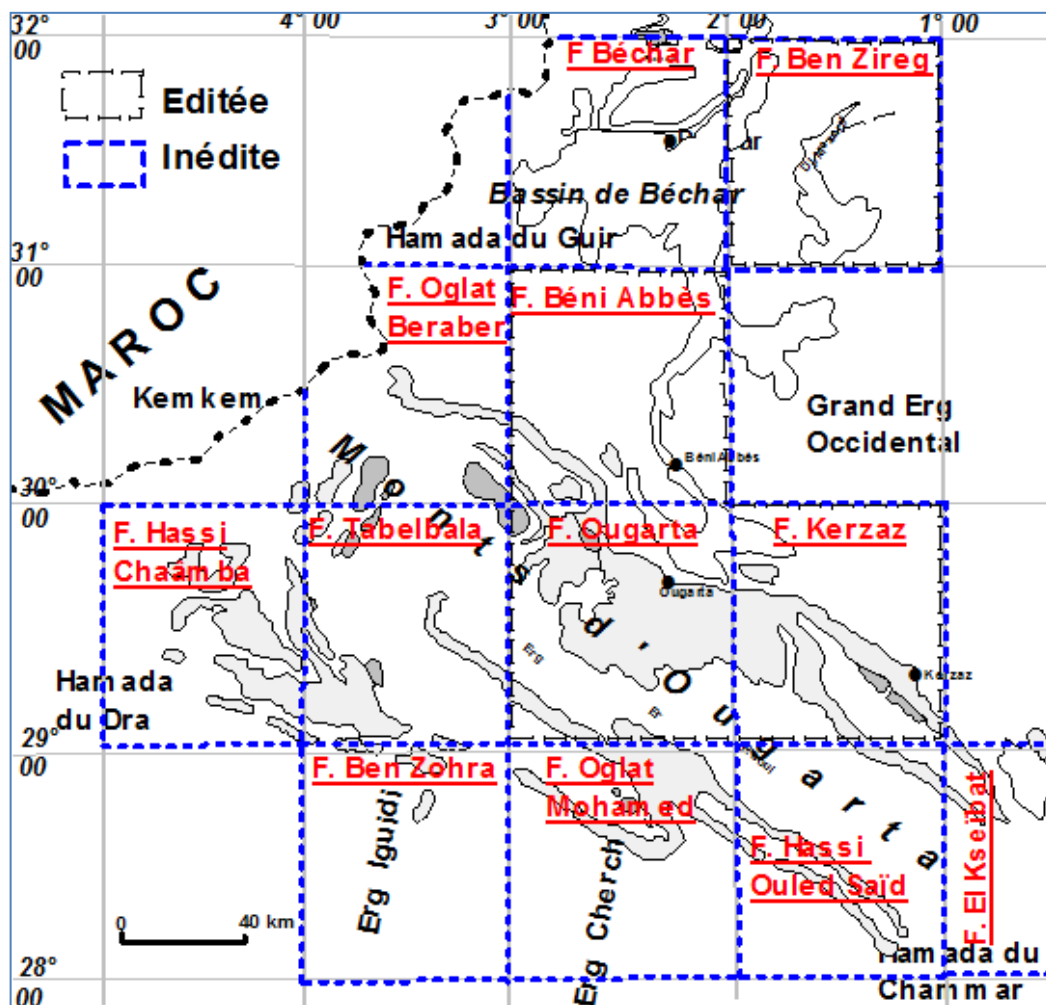


**Figure II.1** : Coupures spéciales des cartes géologiques au 1/500 000<sup>e</sup> du Nord-ouest



➤ **Les coupures régulières au 1/200 000e**

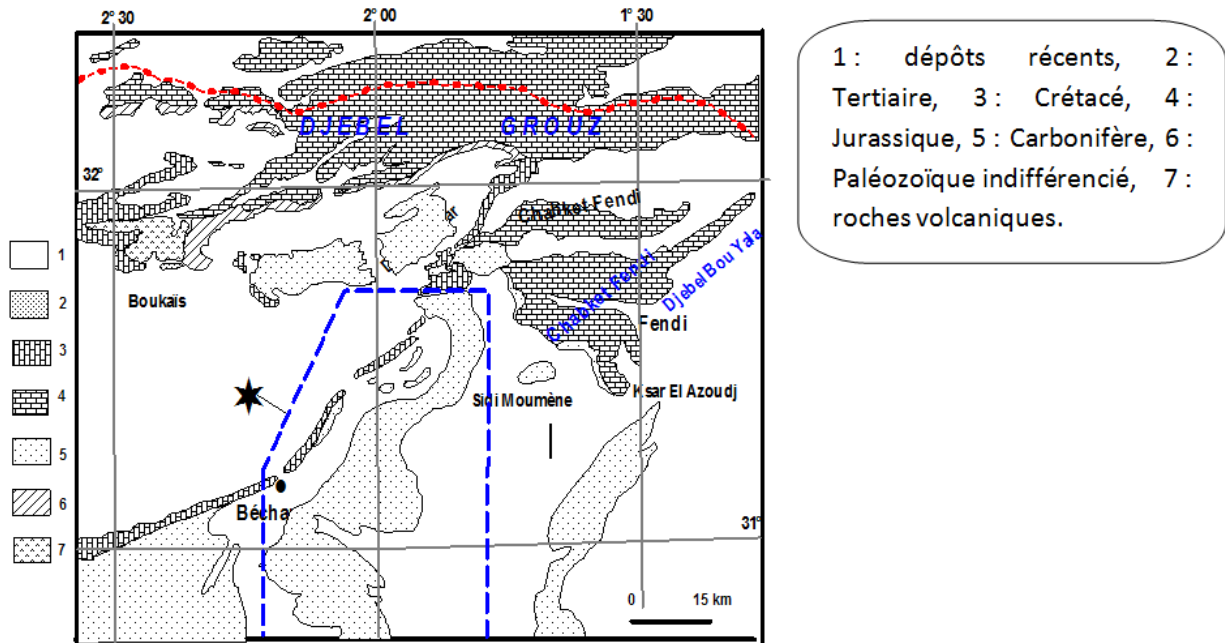
Lors d'un important projet de recherche systématique, l'Office National de la Recherche Minière (O.R.G.M) a entrepris des levées au 1/200 000e de l'ensemble du territoire Sud. Récemment, le service géologique d'Algérie (SGA) a édité certaines coupures, par contre d'autres demeurent encore inédites (Fig. II.2). En ce qui concerne notre secteur de recherche, les deux feuilles de Béchar et Ben Zireg ont été levées en 1976/78.



**Figure II.2 :** Coupures spéciales des cartes géologiques au 1/200 000e du Nord-ouest (O.R.G.M, 1976/1978)

➤ **Les coupures spéciales au 1/200 000e**

- **La carte des massifs carbonifères de Béchar :** il existe une carte couvrant le djebel Béchar, dressée par C. Pareyn et annexée à son mémoire, publié en 1961 par le CNRS (Fig. II.3).



**Figure II.3 :** Carte géologique du djebel Béchar (Pareyn, 1961).

➤ **Cartes géologiques au 1/100.000<sup>e</sup> en Coupures spéciales (inédites)**

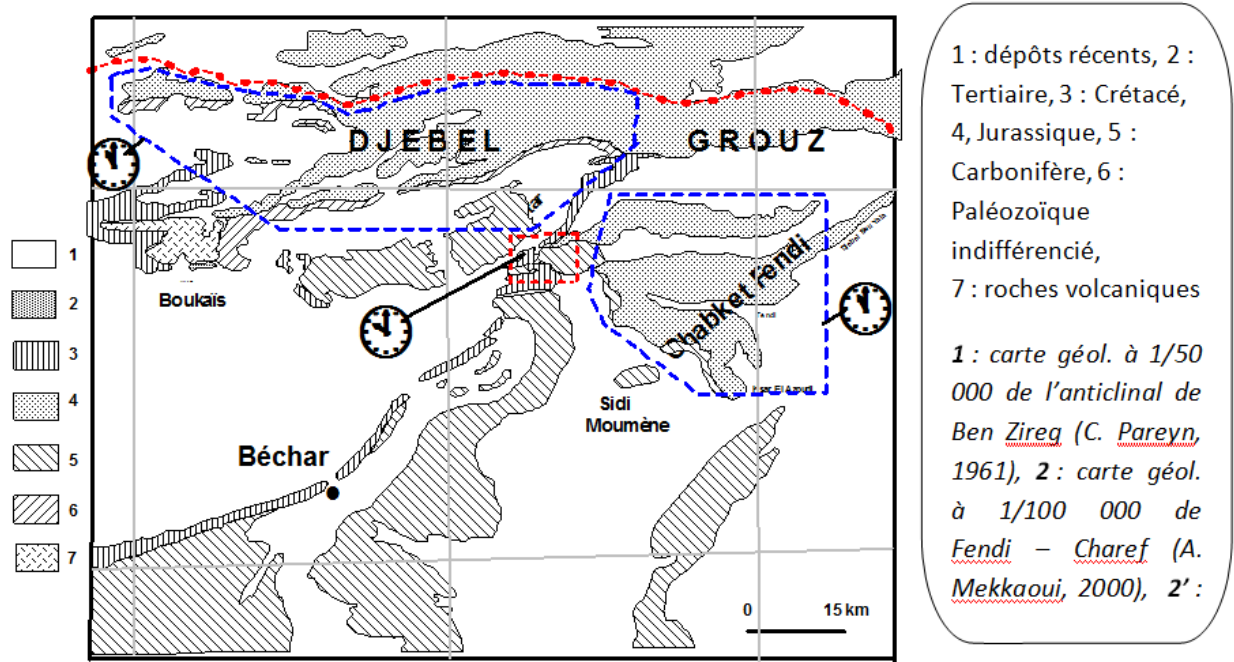
On peut localiser le secteur des travaux sur des cartes au 1/00 000<sup>e</sup> :

- **La carte géologique de Fendi - Charef (inédite) :** La chabket Charef – Fendi, portion du secteur de recherche, est levée dans le cadre d'un magister (Mekkaoui, 2000), intégrant des nouvelles données litho stratigraphiques (Fig. II.4).

➤ **La cartes géologiques au 1/ 50.000<sup>e</sup> en coupures spéciales (inédites) :**

- **La carte géologique de l'anticlinal de Ben Zireg (1) :** cette portion est également levée en 1961 par C. Pareyn, et jointe à son mémoire « massifs carbonifères de Béchar », publié par le CNRS en 1961 (Fig. II.4).

- **La carte géologique du Grouz méridional (2) :** situé à l'extrême Nord du secteur, est levée dans le cadre d'un magister, par A. Mekkaoui en 2000 (Fig. II.4).

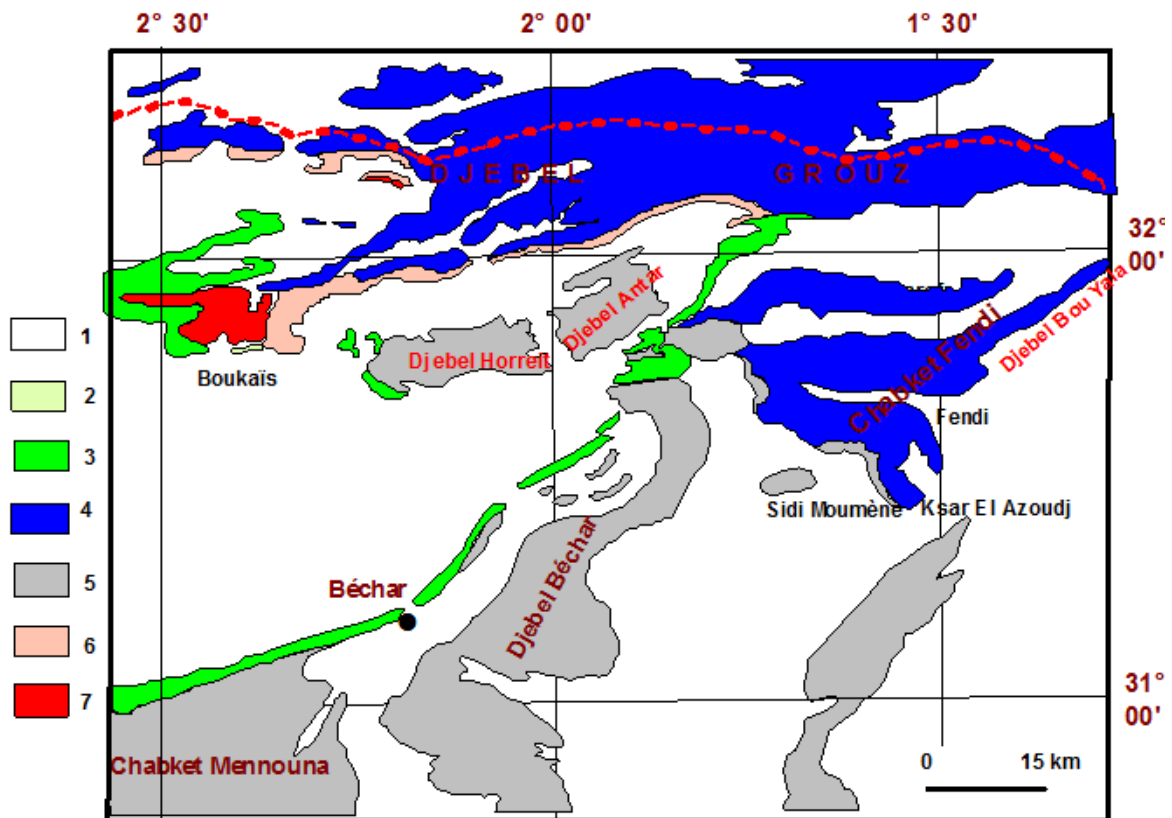


**Figure II.4 :** Cartes géologiques au 1/100 000<sup>e</sup> et 1/50 000<sup>e</sup>, en coupures spéciales (inédites).

### 3. Contexte géologique

La région de Béchar constitue un excellent laboratoire à ciel ouvert puisqu'elle dispose d'une grande richesse géologique. Elle offre une large gamme de terrains, allant du Précambrien à l'Actuel, sous des conditions d'affleurement optimales. Cette région s'inscrit dans une zone de transition entre la plate-forme saharienne et le domaine atlasique.

Nous présentons ici un aperçu géologique sommaire de cette région, à travers le commentaire de la carte géologique (Fig. II.5). Ce commentaire comprend un rappel des caractéristiques pétrographiques et structurales des différentes formations et permet de préciser et d'apprécier les potentialités en matière de granulats.



1: Quaternaire, 2 : Tertiaire, 3 : Crétacé, 4: jurassique, 5: Carbonifère  
6: Paléozoïque indifférencié, 7: Précambrien 'Roches volcaniques)

Figure II.5 : Carte géologique schématique de la région nord de Béchar (Mekkaoui, 2000)

### 3.1. Le Crétacé

Les terrains crétacés reposent tantôt en discordance angulaire sur le Carbonifère, tantôt, ils font suite au Jurassique. Ces terrains sont moins importants que ceux du Jurassique, ils forment des modestes reliefs, couronnés systématiquement par des barres de calcaires turoniens. Les principaux affleurements sont la cuesta de Ras Smar, située au Nord-ouest de la station de Bouayach et la cuesta de Bézazil El Kelba (BEK). Une troisième cuesta est majestueusement exposée le long de la route reliant la ville de Béchar au barrage de Djorf Torba, qu'on appelle usuellement la 1<sup>ère</sup> Barga. D'autres affleurements existent à Boukais et à Djebel Asfer, ainsi que d'autres lambeaux jalonnant la faille Sud qui passent par l'Antar - Horreit.

La coupe la plus complète de cette ère est retrouvée à Kénadsa et est expliquée comme suit (Fig. II.6) :

### 3.1.1. Le Crétacé inférieur (86 m)

#### ➤ L'Albien (50 m)

Il débute par endroits par un grès grossier, suivi par des marnes rouges à lamelles de gypse et des marnes bariolées discordants sur le Westphalien D.

#### ➤ Cénomano - Turonien (36 m)

Il commence par un niveau marneux à fossiles condensés, on y trouve en abondance des huîtres (*Exogyra flabellata* golf, E, *Olisiponensis* SCHARP), des ostéreas, accompagnées de divers autres lamellibranches et des gastéropodes à l'état de moules internes, des oursins (*Hétérodiadéma libycum* DESOR) et des néolobites *vibreyanus* D'ORB. Ces derniers ainsi que les ostréas confirment l'âge Cénomaniens ([P. Deleau, 1951](#)). Ce niveau fossilifère est surmonté par 2 à 3 m de marnes bariolées, puis des barres calcaires fossilifères dolomitiques. La partie inférieure de ces barres renferme des huîtres, des rudistes et des accidents siliceux dans la partie supérieure. Ces calcaires ont servi de matière première pour la fabrication de la chaux.

### 3.1.2. Crétacé supérieur :

Le Sénonien et le reste des étages du Crétacé supérieur : d'une épaisseur de 693 m il est composé de bas en haut de :

- Marnes rougeâtres et bleuâtres, suivies d'une alternance de marnes rougeâtres et des bancs d'anhydrites (51 m).
- Marnes bariolées à anhydrites entrecoupées de bancs massifs de sels gemme de chlorures de sodium (485 m).
- Marnes sableuses à gypse et à anhydrite, scellées de marnes sableuses roses (157 m).

Le Crétacé supérieur affleure à différents endroits la zone d'étude tels que :

- A Béchar où le Crétacé repose en discordance angulaire sur le Westphalien D. Les dépôts sont identiques à ceux de la coupe de Kénadsa, avec une diminution des épaisseurs.
- A Garet Keskes qui est une butte-témoin composée de terrains crétacés discordants sur une série grésoschisteuse du Westphalien A et B. Le détail de cette gara révèle la même succession lithologique avec une nette réduction des épaisseurs, qui indique la proximité du bord du bassin.
- Au djebel Esfer dont la coupe présente la lithologie du bord septentrional du bassin, identique à la coupe de référence.

- A Ras Smar qui présente une particularité car elle diffère à sa base des autres. En effet, cette coupe débute par une puissante série de grès (150 à 200 m) à stratification oblique et entrecroisée avec des niveaux conglomératiques suggérant un régime dynamique différent bien établi dans le domaine atlasique (complexe déltaiiue des Ksours). Ce complexe gréseux est attribué à l'Albien. A l'Est de la gare de Ben Zireg, on a vraisemblablement observé une discordance angulaire entre ce complexe gréseux et les couches jurassiques. Dans la région de Béni Ounif, le même complexe est observé à l'Est de cette dernière ; un itinéraire de reconnaissance a été effectué dans des affleurements crétacés bordant la piste de l'Oued Namous, qui bifurque de la nationale N° 6. On a constaté que ce complexe devient considérable et que certains niveaux contiennent des dents de Crocodiliens et probablement des os ainsi que des dents des Dinosauriens.

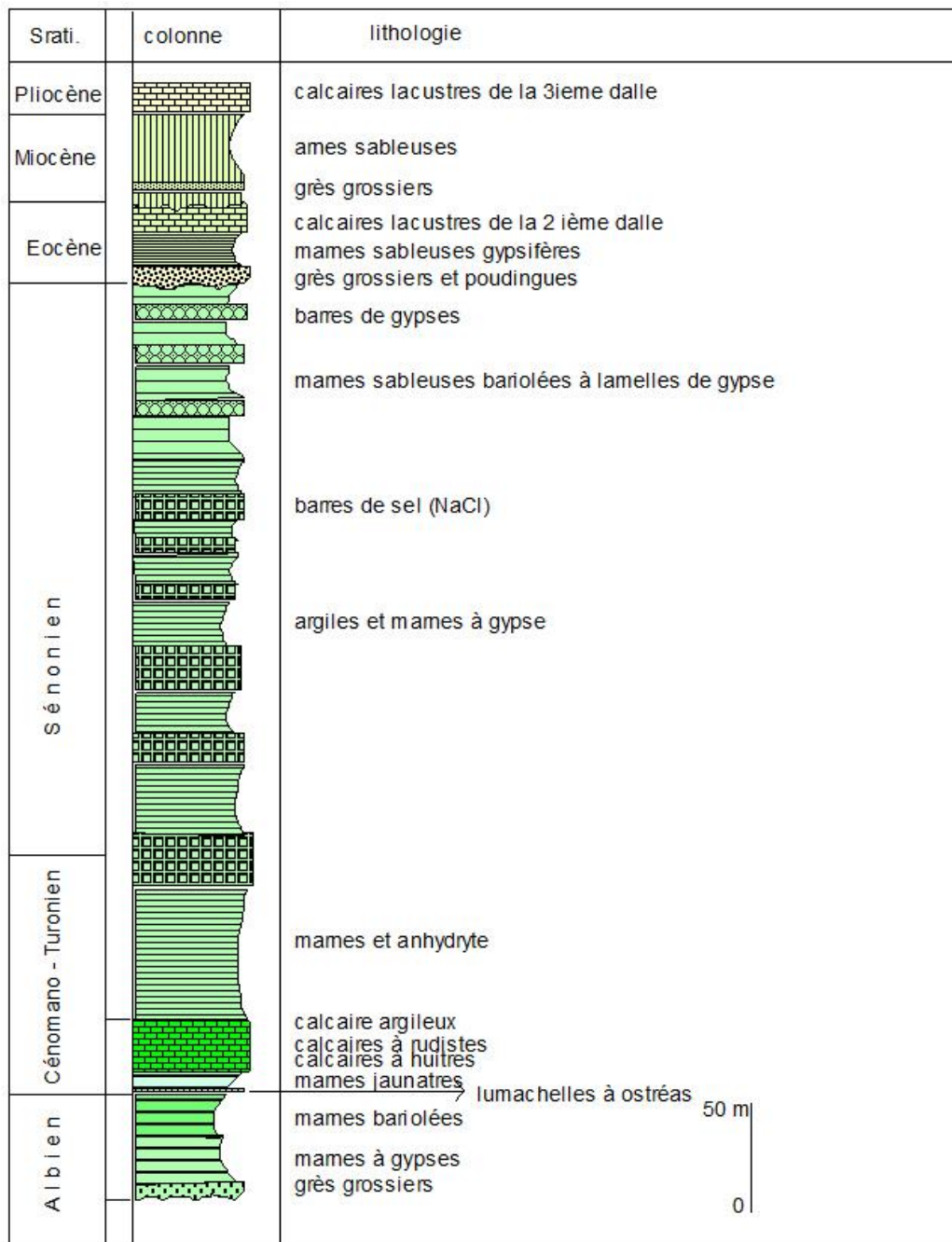


Figure II.6 : Coupe du Crétacé de Kénadsa (Mekkaoui, 2000)

### 3.2. Le Tertiaire

Ces terrains sont tabulaires et discordants et ravinent la série sous-jacente. Ils constituent les corniches de la 2<sup>ème</sup> Barga et le plateau d'Oum Es Seba, sur lequel se tiennent quelques buttes-témoins (Gour) dont celle d'Oum Es Seba, la plus célèbre (Fig. II.7). Le Tertiaire comprend :

➤ **L'Eocène (75 m)**

Il commence par un niveau de grès grossiers et de poudingues suivis de marnes sableuses et gypsifères (67,5 m). Les calcaires lacustres, coiffent l'ensemble et forment les corniches de la seconde Barga (7,5 m)

➤ **L'Oligocène (16 m)**

Il ravine les calcaires lacustres, composé de marnes roses sableuses et des grès calcaires avec quelques éléments grossiers.


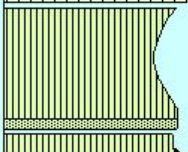
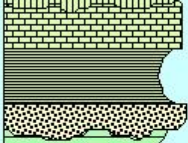
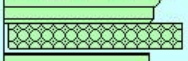
➤ **Le Miocènes (50 m)**

Il est composé de grès grossiers et de marnes sableuses avec des lentilles conglomératiques.

➤ **Le Pliocène (20 à 25 m)**

Il correspond à des calcaires lacustres dits troisième dalle calcaire couvrant la Gara Oum Es Seba.

Les mêmes terrains sont connus dans les gours environnants au niveau d'Abadla.

Srati.	colonne	lithologie
Pliocène		calcaires lacustres de la 3ième dalle
Miocène		marnes sableuses grès grossiers
Eocène		calcaires lacustres de la 2ième dalle marnes sableuses gypsifères grès grossiers et poudingues
		barres de gypses

**Figure. II.7 :** Coupe lithologique du Tertiaire (Mekkaoui, 2000).



### 3.3. Le Quaternaire

Les terrains quaternaires sont assez limités dans l'espace, ce sont principalement les alluvions des oueds, les évaporites des sebkhas et les dunes de sable.

Du point structural, la région de Béchar appartient au domaine de la plate-forme saharienne, déformée violemment par l'orogénèse hercynienne et reprise partiellement par l'alpin. Deux discordances majeures sont aisément reconnaissables sur le terrain : la première est hercynienne, et sépare le Primaire du Secondaire, la deuxième se situe entre le Crétacé et le Tertiaire. La région est structurée en une succession d'anticlinaux et synclinaux de direction Est – Ouest. Le djebel Béchar est affecté de nombreuses torsions, engendrant des pli-failles et des plans de chevauchement. En ce qui concerne la tectonique cassante, des failles E – W et ENE – WSW affectent essentiellement le Paléozoïque et sont mieux exprimées dans l'anticlinal de Mennouna.

En dehors des pierres de construction, la prédominance des roches carbonatées dans la structure du Djebel Béchar offre de bonnes perspectives en matière d'agrégats. D'ailleurs de nombreuses stations de concassage (SONATRO, *etc.*) se concentrent vers la sortie de Béchar Djedid et exploitent le banc calcaire de djeniène. Il s'agit de calcaire bleuâtre, en bancs de 0.5 à 0.8 m, totalisant une épaisseur de 4 à 8 m. Les oueds tapissés d'alluvions, fournissent des sables et des granulats alluvionnaires, dont les plus exploitées sont celles de l'oued Manouarar et de l'oued Béchar.

### 4. Conclusion

La région étudiée appartient au bassin crétacé de Béchar, également appelé «Bassin salin de Béchar». Ce bassin est délimité au Nord et à l'Ouest par la frontière Algéro-marocaine et les massifs carbonifères du Nord (Antar et Horriet), à l'Est par la structure de Ben Zireg et au Sud par la chebka Mennouna-Djihani. D'un point de vue géologique, c'est un bassin sédimentaire formé par affaissement, en réponse à l'élévation du Haut Atlas.

Le dépôt sédimentaire qui constitue la région étudiée est une succession de couches géologiques, qui comprend de bas en haut :

- Le Crétacé discordant sur le sous-sol Carbonifère et renferme l'Albien (20 m), le Cénomaniens (40 m) représenté par des marnes fossilifères, beiges à verdâtres,
- Le Tertiaire tabulaire et couché dans une discordance de ravin sur les argiles de Sénégalaise et qui comprend l'Éocène (25 m) avec son niveau de grès poudreux et grossiers, suivis de gypses sableux marnes et calcaires lacustres. Les ravines de l'Oligocène (16 m)

en calcaires lacustres, composées de marnes sableuses roses et de grès calcaires avec quelques éléments grossiers et le Miocène (50 m) composé de grès grossiers, de marnes sableuses à lentilles conglomératiques.

- Le Quaternaire (15 m à 60 m) composé de grès graveleux, de sable fin et de calcaire entrecoupés de marnes et d'argile.

La pile du Crétacé est structurée comme un synclinal asymétrique allongé Est-Ouest avec une ride anticlinal complexe; son flanc Nord est escarpé avec le passage de la faille Sud de l'Atlas et son flanc Sud est légèrement en pente; il est fragmenté par des failles Atlas orientées NE-SW.

---

# **Chapitre III**

## Aperçu Climatologique

---

---

# CHAPITRE III

## APERÇU CLIMATOLOGIQUE

---

### 1. Introduction

L'étude du climat constitue un volet essentiel nécessaire à la connaissance des caractéristiques hydroclimatologiques, indispensable pour évaluer l'alimentation des ressources hydriques et des réserves souterraines. En effet, une grande partie de l'alimentation des réserves se fait par la remarquable contribution des précipitations, ou plus précisément, les précipitations efficaces (PE), qui dépendent de plusieurs facteurs climatiques et hydrologiques. L'estimation des caractéristiques climatiques d'un bassin versant joue un rôle important dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau. Les paramètres les plus intéressants dans l'identification du régime d'écoulement sont les précipitations (P) et la température (T), deux paramètres qui conditionnent soit la sécheresse, soit l'humidification du milieu. Ces paramètres seront au cœur de l'analyse climatique effectuée plus bas.

Les paramètres climatiques utilisés pour cette étude sont issus de la base de données en ligne Worldclim (Hijmans *et al.* 2005). Celle-ci est un ensemble de données compilé des moyennes mensuelles du climat, mesurées au niveau des stations météorologiques à partir d'un grand nombre de sources mondiales, régionales, nationales et locales, principalement pour la période 1950-2000 (Hijmans *et al.* 2005). Après traitement et analyse, ces données ont été interpolées à l'aide de l'algorithme de spline de type plaque mince de lissage mis en œuvre dans ANUSPLIN (Hutchinson 2004) ; en créant des surfaces climatiques mondiales (zones terrestres uniquement, à l'exception de l'Antarctique) pour les précipitations mensuelles et les températures minimales, moyennes et maximales (Hijmans *et al.* 2005). Les données téléchargeables gratuitement sur le site <http://worldclim.org/version2> et spatialement Géo référencé se présentent sous forme de fichiers compressés contenant 12 fichiers GéoTiff, un pour chaque mois de l'année d'une résolution de 30 secondes (~1 km<sup>2</sup>).

La période d'étude consacrée à ce travail de recherche est de 1960–2018, recueillie au niveau des deux stations puisque la zone d'étude est comprise selon l'ONM de Bechar

entre deux régions bien distinctes (Station de Bechar et de Mougheul) ([Annexe 1](#)). Le tableau III.1 présente les coordonnées Lambert des deux stations climatiques utilisées :

**Tableau III.1.** : Les coordonnées Géographiques de la station de mesures [[ONM, Bechar](#)]

Station	Longitude	Latitude	Z	Code de la station
ONM Bechar	2°13'22.00"O	31°35'58.86"N	771	/
Mougheul	2°13'5.20"O	32° 1'21.05"N	1029	/

### 1.1. Continentalité pluviale moyenne

La continentalité pluviale permet de définir le type de climat continental. Elle s'exprime par le rapport (**R**) de la somme des coefficients pluviométriques relatifs mensuels des mois les plus chauds et la somme des mois les plus froids. On a alors la classification suivante ([Belloula , 2017](#))

Si :  $1 < R < 1.75$  Climat semi – continental

$R < 1$  Climat non continental

A partir des courbes Ombro-thermiques établies ([Fig. III.5 et III.6](#)), on constate que l'année est divisée en deux grandes saisons :

- Pour la station d'ONM Bechar :
  - la saison chaude qui va d'Avril à Septembre (6 mois).
  - la saison froide qui va d'Octobre à Mars (6 mois).
- Pour la station de Mougheul :
  - la saison chaude qui va de Mai à Septembre (5 mois).
  - la saison froide qui va d'Octobre à Avril (7 mois).

### 1.2. Calcul des coefficients pluviométriques

Cette méthode de calcul est également utilisée pour définir le type de climat de la région d'étude et repose sur le caractère pluvial du mois considéré par rapport à l'ensemble de l'année. Elle s'exprime comme suit ([Debbar , 2017](#))

$$C_p = 365 P_i / P_n \quad (\text{III.1})$$

Avec :

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

**P<sub>i</sub>** : Précipitation du mois de rang i (mm) ;

**n** : Nombre de jours dans le mois ;

**C<sub>p</sub>** : exprime le caractère plus au moins pluvial du mois considéré par rapport à l'ensemble de l'année (Debbar , 2017):

$$C_p = 365 / n_i \cdot P_i / P = k \cdot P_i / P \quad (\text{III.2})$$

Où **k** est un coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré :

Si **n<sub>i</sub>** = 31 jours    ➔     $k = 365/31 = 11.77$

Si **n<sub>i</sub>** = 30 jours    ➔     $k = 365/30 = 12.16$

Sur quatre années consécutives, le mois de Février comporte 28 jours pendant trois ans, et une fois 29 jours, d'où la formule :

$$K = 365 / (28 \times 3 + 29)^{1/4} = 12.92 \quad (\text{III.3})$$

- Pour la station de ONM Bechar on a **P = 85 mm**

- Pour la station de Mougheul on a **P = 147 mm**

1.2.1. Application numérique :

➤ Pour la région d'ONM Bechar :

Les résultats des calculs appliqués à la station ONM Bechar sont illustrés dans le tableau III.2 :

**Tableau III.2:** Coefficient pluviométrique de la région d'ONM Bechar.

Mois	Saison humide				Saison sèche						Saison humide	
	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.
K	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77	12.16
P <sub>i</sub>	19	8	10,4	13,4	17,4	23,2	26,6	30,9	30,3	12	18	20
C <sub>p</sub>	0,98	0,41	0,59	0,69	0,92	1,19	1,41	1,59	1,56	0,64	0,92	1,06

- Saison humide :  $C_p = (Sh) = 4.65$

- Saison sèche :  $C_p = (Ss) = 7.31$

$$R = C_p Ss / C_p Sh = 7.31 / 4.65 = 1.57 \quad (\text{III.4})$$

Donc  $1 < R < 1.75$  Climat semi-aride (semi continental)

➤ Pour la région de Mougheul :

Les résultats des calculs appliqués à la station de Mougheul sont présentés dans le tableau III.3 :

**Tableau III. 3:** Coefficient pluviométrique de la région de Mougheul.

Mois	Saison humide					Saison sèche					Saison humide	
	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.
K	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77	12.16
Pi	19	8	10,4	13,4	17,4	23,2	26,6	30,9	30,3	12	18	20
Cp	0,98	0,41	0,59	0,69	0,92	1,19	1,41	1,59	1,56	0,64	0,92	1,06

- Saison humide :  $C_p = (Sh) = 5.57$

- Saison sèche :  $C_p = (Ss) = 6.39$

$$R = C_p Ss / C_p Sh = 6.39 / 5.57 = 1.15 \quad (\text{III.5})$$

Donc  $R < 1$  Climat non continental

### 1.3. L'indice d'aridité de Martonne

Cet indice permet de classer le climat en prenant en considération les précipitations et les températures annuelles. L'équation prend la forme suivante (Chekhnaba, 2017):

$$I = p / T + 10 \quad (\text{III.6})$$

Avec :

**I** : Indice d'aridité ;

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

**T** : Température moyenne annuelle (C°)

Suivant les valeurs de **I** obtenues par Martonne (1923), le climat peut être classé comme :

- $I < 5$  = climat hyper aride
- $5 < I < 7.5$  = climat désertique
- $7.5 < I < 10$  = climat steppique
- $10 < I < 20$  = climat semi-aride
- $20 < I < 30$  = climat tempéré

#### 1.3.1. Application numérique

➤ Pour la région d'ONM Bechar :

$$P = 85 \text{ mm}, T = 22.97 \quad \Rightarrow \quad \text{Ce qui donne } I = 2.58$$

➤ Pour la région de Mougheul :

$$P = 147 \text{ mm}, T = 19 \quad \Rightarrow \quad \text{Ce qui donne } I = 5$$

La région d'ONM Bechar a  $I = 2.58$  et celle de Mougheul  $I = 5$ , par conséquent, la région d'étude est donc soumise à un climat hyper aride à désertique.

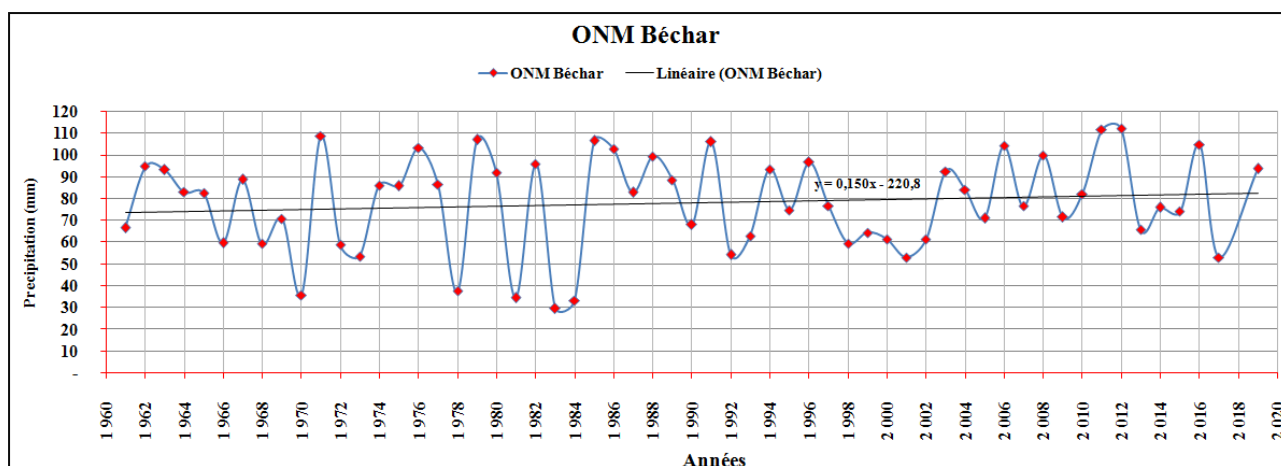
## 2. Étude des paramètres climatiques

### 2.1. Étude des précipitations

A partir des données Worldclim relatives aux stations d'ONM Bechar et de Mougheul, pour une période d'observation de 59 ans (1960-2018) (tableau III.4), nous avons pu établir les graphiques (Fig.III.1 à Fig.III.4) correspondants aux variations interannuelles.

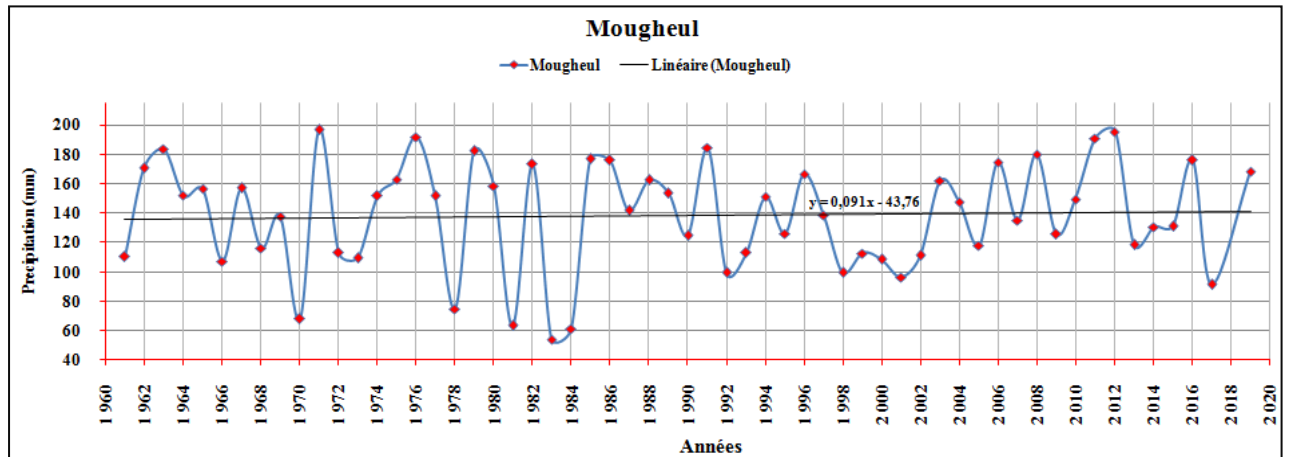
**Tableau III.4 :** Variation des précipitations moyennes mensuelles de la station d'ONM de Bechar et de Mougheul (1960-2018).

Mois	stations	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Aout
Pmoy. (mm)	ONM Bechar	7	12	13	10	9	7	8	7	5	3	1	3
Pmoy. (mm)	Mougheul	12	18	20	19	14	13	16	14	9	5	2	5

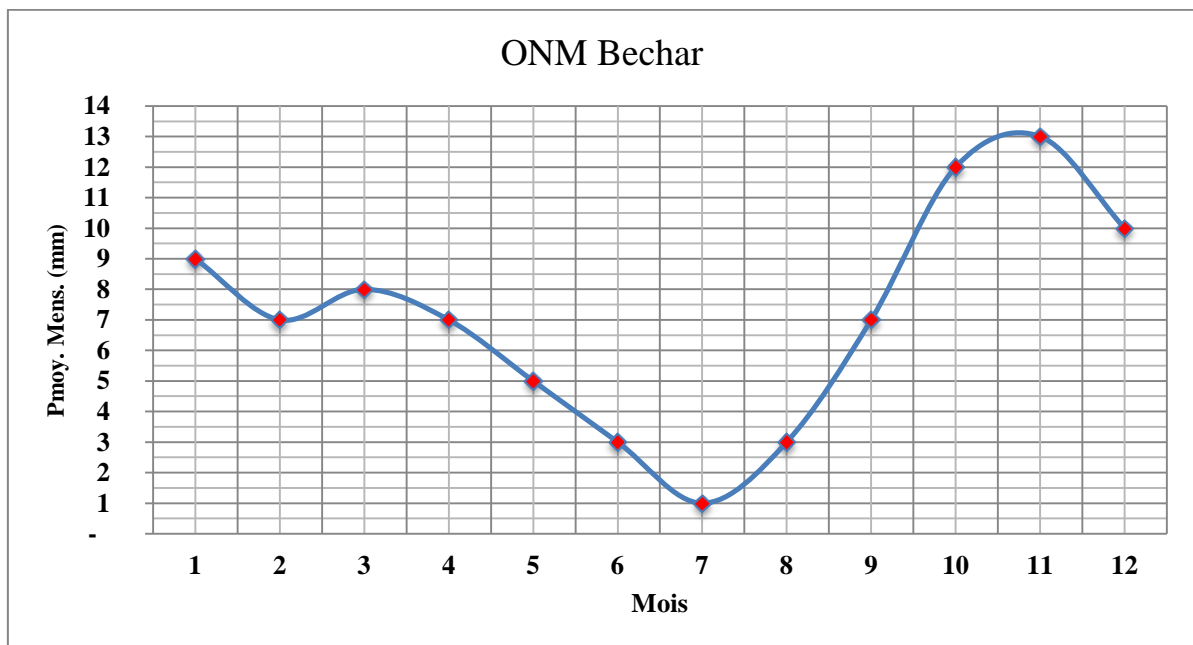


**Figure III.1:** Précipitations interannuelles de la station d'ONM de Bechar.

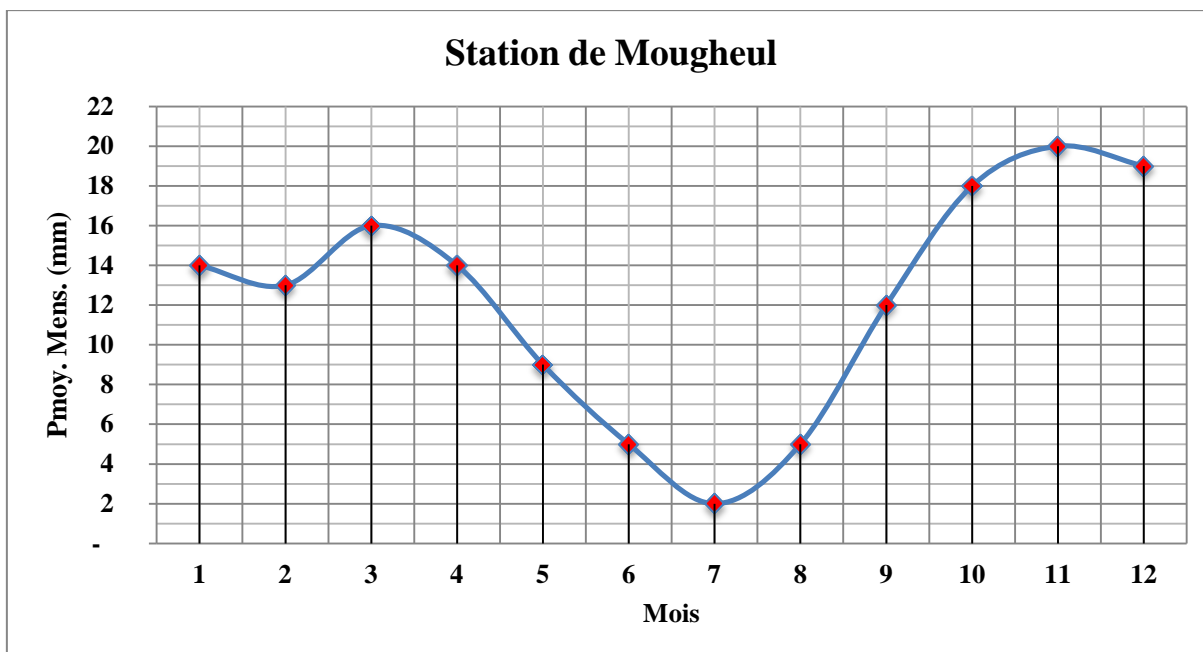




**Figure III.2:** Précipitations interannuelles de la station de Mougheul .



**Figure III.3:** Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région d'ONM Bechar.



**Figure III.4:** Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région de Mougheul.

A partir du tableau III et des figures III.1 à III. 4, nous avons pu constater une série d'observations qui sont :

- La mise en évidence de l'irrégularité pluviométrique d'une année à l'autre avec des écarts considérables par rapport à la normale.
- Le régime pluviométrique interannuel et mensuel est très irrégulier avec un écart respectif très important entre les années et les mois.
- Le cycle pluviométrique le plus arrosé correspond à l'année 2011 - 2012 avec un apport de 112.07 mm pour la station d'ONM Bechar et de 195.350 mm pour la station de Mougheul (Fig. III.1).
- Le cycle le plus sec correspond à l'année 1982 - 1983 avec un apport de 29.60 mm pour la station d'ONM Bechar et de 54.26 mm pour celle de Mougheul.
- Les mois les plus arrosés sont les mois d'Octobre, Novembre et Décembre, avec une valeur moyenne mensuelle maximale égale à 20 mm à Mougheul et de 13 mm à ONM Bechar, pour le mois de Novembre.
- Le mois le plus sec est celui de Juillet avec une valeur minimale moyenne mensuelle égale à 2 mm à mougheul et 1 mm à ONM Bechar.
- La moyenne interannuelle de la pluie est respectivement égale à 138 mm à Mougheul et 78.12 mm à ONM Bechar, et la moyenne mensuelle est de l'ordre de 12,25 mm à Mougheul et 7.08 mm à ONM Bechar.

## 2.2. Étude de la Température

La température est un facteur très important puisqu'elle régit le phénomène d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les données sur la température dont nous disposons sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles mesurées à la station Météorologique de ONM Bechar et Mougheul pour la période 1983 / 1984 – 2003 / 2004.

### 2.2.1. Températures moyennes mensuelles

Les constatations effectuées d'après le tableau des températures et de l'histogramme, montrent que le mois de Janvier est le mois le plus froid de l'année tandis que les mois les plus chauds sont Juillet et Août (tableau III.5).

**Tableau III.5 :** Variation des températures moyennes mensuelles (1983/1984 - 2003/2004)

Mois	stations	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Aout
T(C°)	Mougheul	25,3	19,1	12,8	8,4	8	10,4	13,4	17,4	23,2	26,6	30,9	30,3
	ONM Bechar	27,2	20,6	14	9,8	8,7	11,7	15,3	19,7	23,8	28,6	32,7	32

## 2.3. Diagrammes Ombro-thermiques

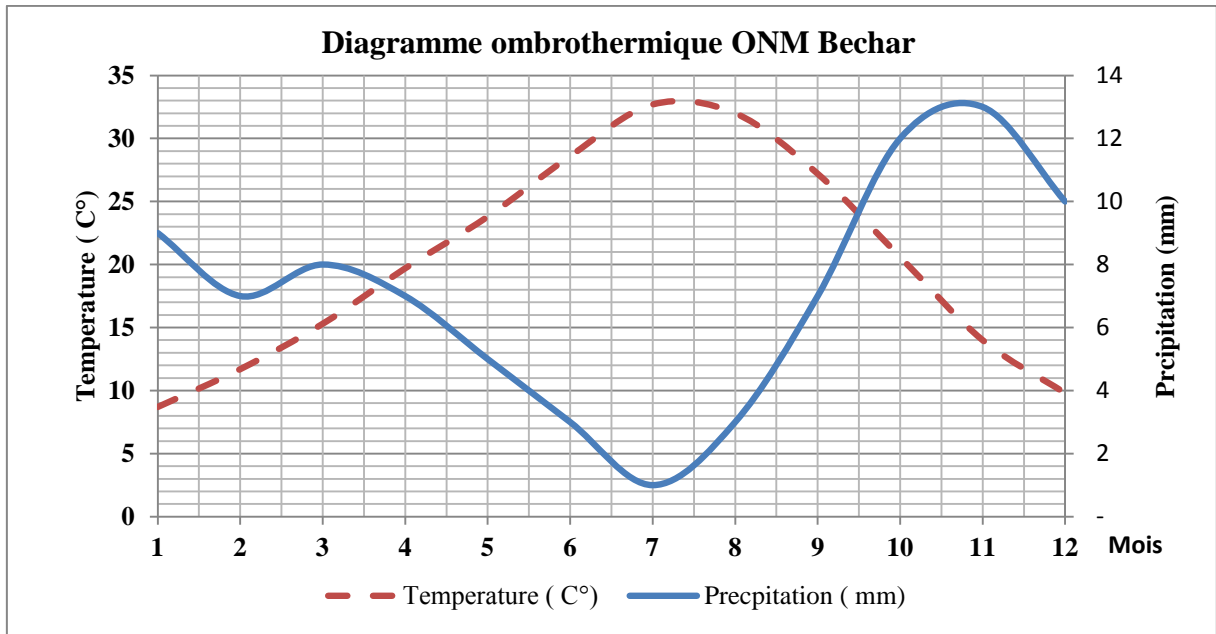
Ce diagramme est une synthèse climatique de la région d'étude qui permet de distinguer la période sèche de la période humide, à partir de la confrontation de données des précipitations et des températures pour une seule et même période d'observation, soit dans notre cas, une période de 59 ans (1960-2018) (Tab. III.6, Tab.III.7). Les résultats obtenus à partir de ce digramme pour les deux régions (Mougheul et ONM Bechar) ont permis de mettre en évidence une période de sécheresse de 7 mois qui s'étend du mois de Mai à celui de Novembre, alors que le reste des mois (5 mois) représente la période humide qui s'étale du mois de Décembre à celui d'Avril (Fig. III.5, Fig.III.6).

**Tableau III.6:** Données du diagramme Ombro-thermique de la station d'ONM Bechar (Moyennes de1960-2018)

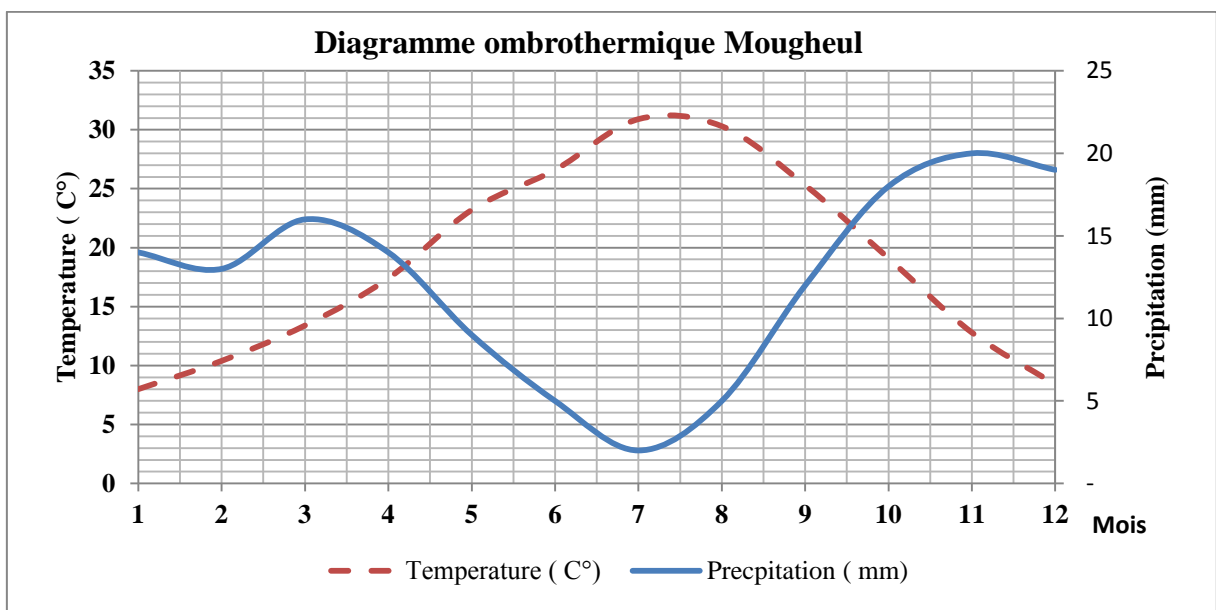
Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
P(mm)	7	12	13	10	9	7	8	7	5	3	1	3
T(C°)	27,2	20,6	14	9,8	8,7	11,7	15,3	19,7	23,8	28,6	32,7	32

**Tableau III.7:** Données du diagramme Ombro-thermique de la station de Mougheul (Moyennes de1960-2018)

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
P(mm)	12	18	20	19	14	13	16	14	9	5	2	5
T(C°)	25,3	19,1	12,8	8,4	8	10,4	13,4	17,4	23,2	26,6	30,9	30,3



**Figure III.5 :** Courbes Ombro-thermiques de la région de ONM Bechar.



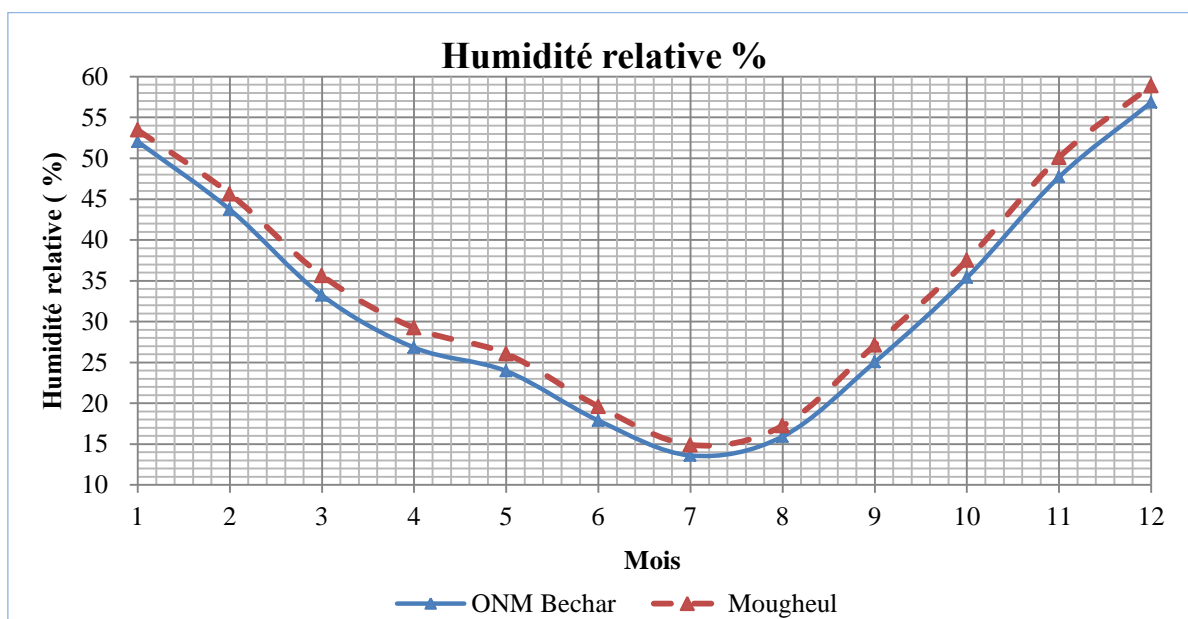
**Figure III.6 :** Courbes Ombro-thermiques de la région de Mougheul.

#### 2. 4. L'humidité

Ce que l'on entend par l'humidité, c'est la quantité d'eau dans l'air par rapport à la quantité maximale d'eau que peut contenir l'air à une température donnée. Pour ce paramètre, l'étude a eu recours à la base de données de Global weather data SWAT, le résultat est donné en figure III.7 qui représente la variation d'humidité relative moyenne mensuelle pour une période de mesure de 15 ans (2000- 2014) (Tab. III.8).

**Tableau III.8:** Données d'humidité relatives moyennes mensuelles des stations d'ONM Bechar et de Mougheul.

L'humidité relative en %												
stations	Janv.	Fév.	mars	Avr.	mai	juin	Juil.	août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
ONM Bechar	52,03	43,72	33,22	26,82	23,94	17,88	13,60	15,93	25,04	35,38	47,70	56,83
Mougheul	53,46	45,64	35,63	29,22	26,07	19,61	14,91	17,25	27,13	37,50	50,11	58,89



**Figure III.7 :** Variation d'humidité relative Moyenne mensuelle des stations d'ONM Bechar et de Mougheul.

D'après le tableau III.8 et la figure III.7, on constate que les deux stations ont la même courbe de variation au cours de l'année avec tout de même, une légère augmentation pour la station de Mougheul. Le mois de Décembre est le mois le plus humide avec une humidité relative de 58.89% pour la station de Mougheul et de 56.83 % pour celle de Béchar. Tandis que le mois le plus sec enregistré est le mois de Juillet, avec une humidité relative pour les stations de Mougheul et d'ONM Bechar et respectivement de 14.91% et de 13.60 %.

## 2.5. Les vents

Les vents se définissent par deux paramètres la vitesse et l'intensité. Dans la région d'étude, les vents dominants sont de direction Nord et Sud-ouest et parfois Nord / Nord-Ouest en été et en automne. Le tableau III.9, consigne la vitesse du vent de la station de Bechar et de Mougheul pour la période de mesure 1970 – 2000 extrait de la base de données Worldclim.

**Tableau III.9 :** Vitesses moyennes mensuelles du vent de la station de Béchar et de Mougheul.

Stations	Vitesse (m/s)											
	Janv.	Fév.	mars	Avr.	mai	juin	Juil.	août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Mougheul	3,2	3,4	3,9	5	4,9	4,2	3,5	3,5	3,8	3,1	2,7	3
ONM Bechar	2,8	3	3,8	4,9	4,9	3,9	3,3	3	3,3	2,8	2,4	2,8

## 2.6. L'évaporation

Selon les données recueillies de la station d'ONM Bechar, le mois de Juillet est le mois où l'évaporation est la plus intense avec une moyenne mensuelle de 318 mm. En revanche, le mois de Février est le mois où l'évaporation est minimale avec une moyenne mensuelle de 88.5 mm.

## 2.7. Les crues

D'après les enregistrements du service de mesure de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH), la ville de Béchar a connu des fortes crues, telle que celle notée en 2008, au cours de laquelle une quantité exceptionnelle de pluie a été enregistrée avec un débit de  $830 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $h_{\text{eau}} = 4 \text{ m}$ ,  $b = 200 \text{ m}$ ). Des inondations similaires ont également eu lieu en 2012 et 2014 (Bekhira *et al.* 2019). Ces informations soigneusement consignées, permettent une meilleure évaluation des caractéristiques des ouvrages d'art nécessaires pour faire face aux dégâts de ces crues.

## 3. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est un moyen de contrôler la cohérence des données évaluées de manière indépendante. Le bilan hydrique exprime donc le processus que peut suivre une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation avant de retourner dans l'atmosphère. Il permet le calcul de la répartition des précipitations reçues en surface selon trois paramètres:

**E** = l'évaporation ; **R** = le ruissellement ; **RFU** = la quantité d'eau stockée dans le sol (réserve facilement utilisable).

### 3.1. Evapotranspiration Potentielle (ETP)

#### 3.1.1. Définition

L'évapotranspiration peut être considérée comme étant la somme des deux termes que sont la transpiration végétale et l'évaporation du sol. L'intensité de l'évapotranspiration est fonction de la radiation solaire, de la température, de l'humidité

relative de l'air, de l'humidité du sol, du vent, de la couverture végétale, et enfin des travaux du sol. Elle est le terme le plus important après les précipitations (P). Elle est la somme des quantités d'eau évaporées à partir de la surface du sol et utilisées par les plantes. Elle est difficile à évaluer à cause de sa pluri dépendance aux facteurs tant biologiques que physiques. Elle correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques (cas des nappes phréatiques peu profondes).

### 3.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P)

L'évapotranspiration ETP peut être estimée par différents calculs ; pour cette étude, deux formules sont retenues :

#### 3.1.2.a. La Formule de Thornthwaite

Cette formule est basée sur l'analyse mensuelle des diverses composantes du bilan hydrique. On calcule, pour chaque mois, la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration, compte tenu de l'humidité du sol. La formule de Thornthwaite, établie en 1948, ne tient compte que de la température (Vittecoq *et al.* 2010 ; Mjeira 2016), la formule est la suivante :

$$ETP = 16 (10 T/I)^a . k \quad (III.7)$$

$$i = (T/5)^{1.514} \Leftrightarrow I = \sum_{1}^{12} i \quad (III.8)$$

$$a = [1.6 I/100] + 0.5 \quad (III.9)$$

Avec :

**ETP** : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm).

**T** : température moyenne mensuelle en °C.

**K** : coefficient de correction dépendant de la latitude du bassin versant et donc de l'insolation.

**a** : indice liée à la température.

**I** : indice thermique annuel obtenu à partir de la somme des valeurs mensuelles de température.

#### 3.1.2.b. La formule de Serra

Cette formule reprend les mêmes termes que ceux de la formule de Thornthwaite, elle s'écrit comme suit (Ichalal ,2013):

$$ETP = (1,6 \cdot 10T/I)^a \quad \text{(III.10)}$$

$$I = \Sigma i \text{ avec } i = 0.002 T^3 \quad \text{(III.11)}$$

$$a = 1.6 (I/100) + 0.5 \quad \text{(III.12)}$$

## 3.2. Evapotranspiration Réelle (ETR)

### 3.2.1. Définition

C'est une fraction de l'ETP qui dépend beaucoup plus de l'état des réserves en eau du sol, et donne des informations sur la quantité d'eau évaporée réellement.

### 3.2.2. Estimation de l'évapotranspiration Réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle annuelle moyenne est calculée par l'application des équations empiriques telles que celles de Turc et de Coutagne (Grusson, 2016) :

**3.2.2.a. Formule de Turc :** Cette formule est estimée à partir des précipitations annuelles moyennes (Pmm) et des températures annuelles moyennes T(°C) comme suit :

$$ETR = P/[0.9 + P^2/L^2]^{0.5} \quad \text{(III.13)}$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad \text{(III.14)}$$

### 3.2.2. b. Formule de Coutagne

Cette formule n'est valable que lorsque les précipitations de la région d'étude sont comprises entre :

$1/8\lambda < P < 1/2\lambda$  avec  $\lambda = 1/0.8 + 0.4 T$ , et T la température moyenne annuelle (°C).

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad \text{(III.15)}$$

## 3.3. Calcul des réserves facilement utilisables (RFU)

Elles sont données par la formule suivante:

$$RFU : 1/3 da. He. P \quad \text{(III.16)}$$

Avec :

**Da:** densité apparente du sol, (Hallaire, 1960) propose de prendre Da = 1.5);

**He:** capacité de rétention % (He = 5% pour un sol sablo-limoneux, He = 10% pour un sol limoneux; He = 20% pour un sol argilo-limoneux),

**P:** profondeur de la terre parcourue par la racine en mm (P= 0.5m).

Dans notre cas, la région est caractérisée par un sablo limoneux, on prend He= 5%.

Donc RFU =  $1/3 \cdot 1.5 \cdot 0.05 \cdot 500 = 0.0291 \text{m} = 12.5 \text{mm}$



### 3.4. Estimation du ruissellement et de l'infiltration

La formule donnant le bilan hydrologique est la suivante (Baahmed ,2015) :

$$P = R + I + ETR \quad \text{(III.17)}$$

Avec : **P**:Précipitation (mm) ;

**R** : Ruissellement (mm) ;

**I** : Infiltration (mm) ;

**ETR** : Evapotranspiration réelle (mm)

Etant donné que nous ne disposons pas du paramètre d'infiltration (I), la lame d'eau ruisselée sera donc estimée par la formule de Tixeront – Berkaloff qui s'écrit comme suit (Berrezoug, 2016) :

$$R = P^3 / 3(ETP)^2 \quad \text{(III.18)}$$

Avec :

**R** : Ruissellement annuel (mm) ;

**ETP** : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm) ;

**P** : Pluviométrie annuelle moyenne (mm)

Sur cette base, nous avons établi les bilans hydriques des deux stations de la région d'étude, représentés dans les tableaux III.10 et III.11 sur des périodes différentes :

**Tableau III.10:** Bilan hydrologique calculé à partir de la formule de Thornthwaite sur une période de 59 ans (1960-2018) pour la station de Mougheul.

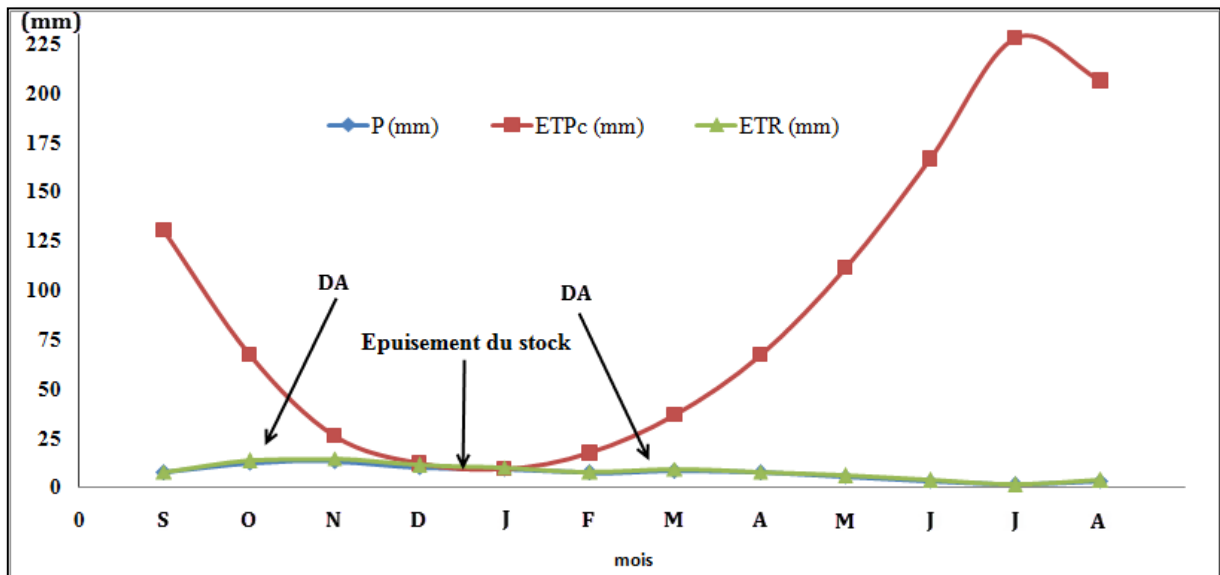
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T C°	25,3	19,1	12,8	8,4	8	10,4	13,4	17,4	23,2	26,6	30,9	30,3
i	11,64	7,61	4,15	2,19	2,04	3,03	4,45	6,61	10,21	12,56	15,76	15,30
I	95,55											
a	2,03											
P (mm)	12	18	20	19	14	13	16	14	9	5	2	5
ETP hC	115,37	65,22	28,96	12,32	11,16	19,00	31,78	53,98	96,77	127,71	173,08	166,33
K	1,03	0,98	0,89	0,88	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14
ETP C	118,83	63,92	25,77	10,84	10,04	16,53	32,73	58,30	114,19	150,70	207,70	189,62
RFU (mm)	0	0	0	6,68	2,84	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	13,23	19,65	21,56	20,32	15,11	14,11	17,37	15,32	9,93	5,54	2,22	5,54
DA (mm)	106,83	45,92	5,77	0	0	3,53	16,73	44,30	105,19	145,70	205,70	184,62
EXC (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R (mm)	0,04	0,48	4,02	19,46	9,07	2,68	1,27	0,27	0,02	0,00	0,00	0,00
Inf (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tableau III.11:** Bilan hydrologique calculé à partir de la formule de Thornthwaite sur une période de 59 ans (1960-2018) pour la station d'ONM Bechar.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T C°	27,2	20,6	14	9,8	8,7	11,7	15,3	19,7	23,8	28,6	32,7	32
i	12,99	8,53	4,75	2,77	2,31	3,62	5,44	7,97	10,61	14,02	17,17	16,62
I	106,81											
a	2,21											
P (mm)	7	12	13	10	9	7	8	7	5	3	1	3
ETP	126,1	68,2	29,0	13,2	10,1	19,5	35,3	61,8	93,92	140,9	189,4	180,6
hC	4	7	9	3	7	7	9	5		3	7	2
K	1,03	0,98	0,89	0,88	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,18	1,20	1,14
ETP C	129,9	66,9	25,8	11,6	9,15	17,0	36,4	66,8	110,8	166,3	227,3	205,9
	3	0	9	4		2	5	0	2	0	6	1
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	7,75	13,1	14,1	10,9	9,82	7,69	8,80	7,73	5,54	3,33	1,11	3,33
		9	8	1								
DA (mm)	122,9	54,9	12,8	1,64	0,15	10,0	28,4	59,8	105,8	163,3	226,3	202,9
	3	0	9			2	5	0	2	0	6	1
EXC (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R (mm)	0,01	0,13	1,09	2,46	2,90	0,39	0,13	0,03	0,00	0	0	0
Inf(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

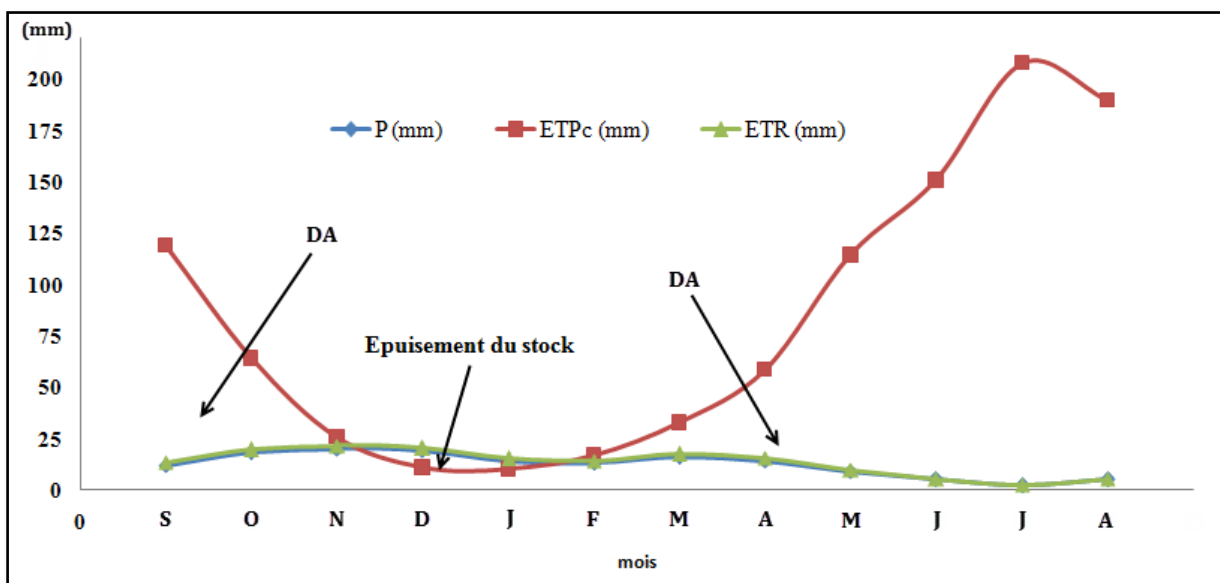
### 3.5. Interprétation du bilan hydrologique de Thornthwaite

Les résultats obtenus (Fig. III.8 et Tab. III.10) illustrent qu'au niveau de la station de Mougheul, les précipitations totales atteignent 147 mm/an. Nous notons que durant les mois de Décembre et Janvier, les précipitations sont supérieures à l'ETP. Le déficit agricole (DA) débute au mois de Février et se poursuit jusqu'au mois de Novembre.



**Figure III.8:** Représentation graphique du bilan hydrologique de Thornthwaite à la station de Mougheul.

Les résultats obtenus dans la figure III.9 et le tableau III.11, illustrent un déficit dans le bilan hydrologique de la région de Béchar causé par de faibles précipitations, de fortes températures et de fortes évapotranspirations. Les précipitations annuelles à Béchar sont de l'ordre de 85 mm/an. Nous constatons que durant toute l'année, l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations. Le déficit agricole annuel (DA) est de l'ordre de 989.17 mm.



**Figure III.9:** Représentation graphique du bilan hydrologique de Thornthwaite à la station d'ONM Bechar.

#### 4. Conclusion

La région d'étude est caractérisée par un climat semi aride (semi continental), avec un été chaud et sec et un hiver très froid. La moyenne interannuelle des précipitations tombées est de l'ordre de 138.65 mm à Mougheul et 78.12 mm à ONM Bechar. Ces pluies sont souvent sous forme orageuse.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 20.34°C à ONM Béchar et de 18.81 °C à Mougheul avec une valeur maximale respective égale à 32.7 °C et 30.9°C pour le mois de Juillet. La température minimale enregistrée pour le mois de Janvier est de 8.7°C pour ONM Bechar et 8°C pour Mougheul.

Pour ce qui est de la saison la plus humide, et qui s'étale d'Octobre à Avril, elle enregistre une valeur moyenne mensuelle maximale de 13 mm à ONM Bechar et 20 mm à Mougheul (en Novembre). Tandis que le mois le plus sec est celui de Juillet avec une valeur minimale moyenne mensuelle de 2 mm à mougheul et de 1 mm à ONM Bechar.

L'humidité relative moyenne annuelle pour les stations d'ONM Béchar et Mougheul sont respectivement de 32.673 % et 34.62 % avec des moyennes mensuelles variant entre 13.60 % en été (Juillet) et 56.83 % en hiver (Décembre) pour la station d'ONM Béchar. Elle varie également entre 14.91 % en été (Juillet) et 58.89 % en hiver (Décembre) pour la station de Mougheul.

Le suivi de la variation du vent à la station météorologique d'ONM Béchar a montré que la direction préférentielle du vent est Nord et Sud-ouest avec une vitesse moyenne annuelle égale à 3.40m/s. Ce type de vent est humide, alors que les vents de direction Nord-NW sont toujours secs.

Enfin, l'étude du bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornethwaite pour les deux stations, montre que celui-ci est toujours déficitaire dans notre région.

---

# **Chapitre IV**

## Etude hydrogéologique

---

---

# Chapitre IV

## Etude hydrogéologique

---

### 1. Introduction

La représentation cartographique des eaux souterraines vise à déterminer les propriétés des aquifères et à déterminer la structure et le modèle hydrodynamique du réservoir. Elle est effectuée au moyen de données obtenues au niveau du piézomètre, outils largement utilisés pour la réalisation des cartes piézométriques et qui renseignent sur la distribution spatiale des charges hydrauliques et des conditions aux limites hydrodynamiques, ainsi que sur le potentiel des aquifères à un temps et à une période donnés.

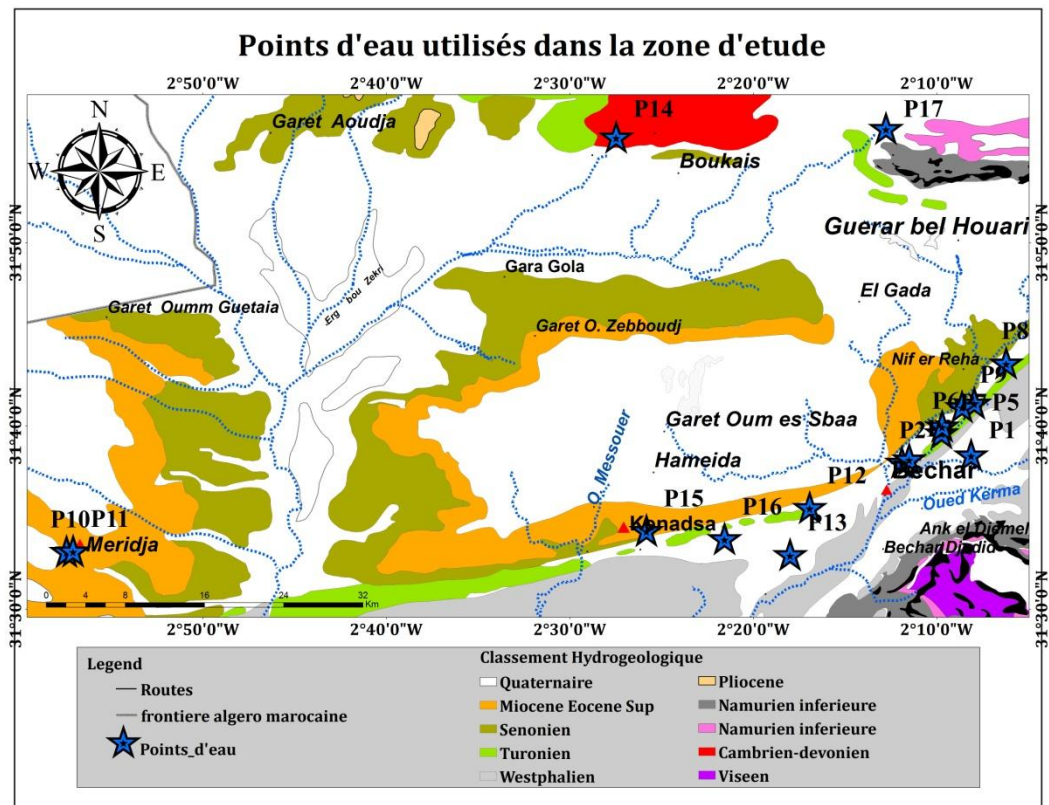
Cependant, l'équilibre naturel que constituent les systèmes d'eaux souterraines reste très sensible à toutes modifications extérieures, notamment celles engendrées par l'exploitation excessive des ressources en eau, tels que les puits et les forages ; ce qui conduit à un épuisement sévère des réserves d'eau. C'est dans cette optique que s'inscrit cette étude, qui vise à mener une étude hydrogéologique de l'aquifère Turonien de Béchar et de Kénadsa et qui permettrait de cerner les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de cette nappe.

### 2. Description lithologique de l'Aquifère des calcaires du Turonien

La nappe d'eau de Turonien de la région Béchar / Kénadsa appartient au bassin du Crétacé d'Er Rachidia-Béchar. Ce dernier est délimité au Nord par l'accident Sud-Atlasique, au Sud par la falaise Turonienne, à l'Est il se ferme entre le massif de Telzaza et le Djebel Béchar aux environ de Ben Zireg et à l'Ouest le bassin s'amincit en un étroit sillon qui atteint sa largeur minimum à Tinerhir ([Idrotecneco, 1976](#); [Mekideche D., Sai, N. et al., 1995](#)).

Sa structure lithologique se caractérise par une faible diversité, et se compose principalement de calcaire, de sable et de gravier. Les eaux souterraines de ce bassin sont réparties le long du secteur Nord-ouest de la zone d'étude Béchar / Kénadsa sur une superficie de (4000 km<sup>2</sup>) et qui représente le secteur oriental du grand aquifère Crétacé de Boudenib (800 km<sup>2</sup>). L'aquifère Crétacé d'Er Rachidia-Béchar est le plus grand bassin en termes d'exploitation qui garantit environ 20% des besoins en eau potable des habitants de la ville de Bechar qui compte 214 985 d'habitants ([D.P.A.T, 2018](#)).

Dans le cadre de cette recherche, la réalisation des différentes cartes pour le but d'établir un diagnostic de la nappe du Turonien, de caractériser la morphologie souterraine et de déterminer les conditions aux limites de cette nappe. Pour cela, nous avons utilisés deux campagnes d'échantillonnage des années 2013 et 2018 effectuée sur 16 points d'eau (Fig.IV.1).

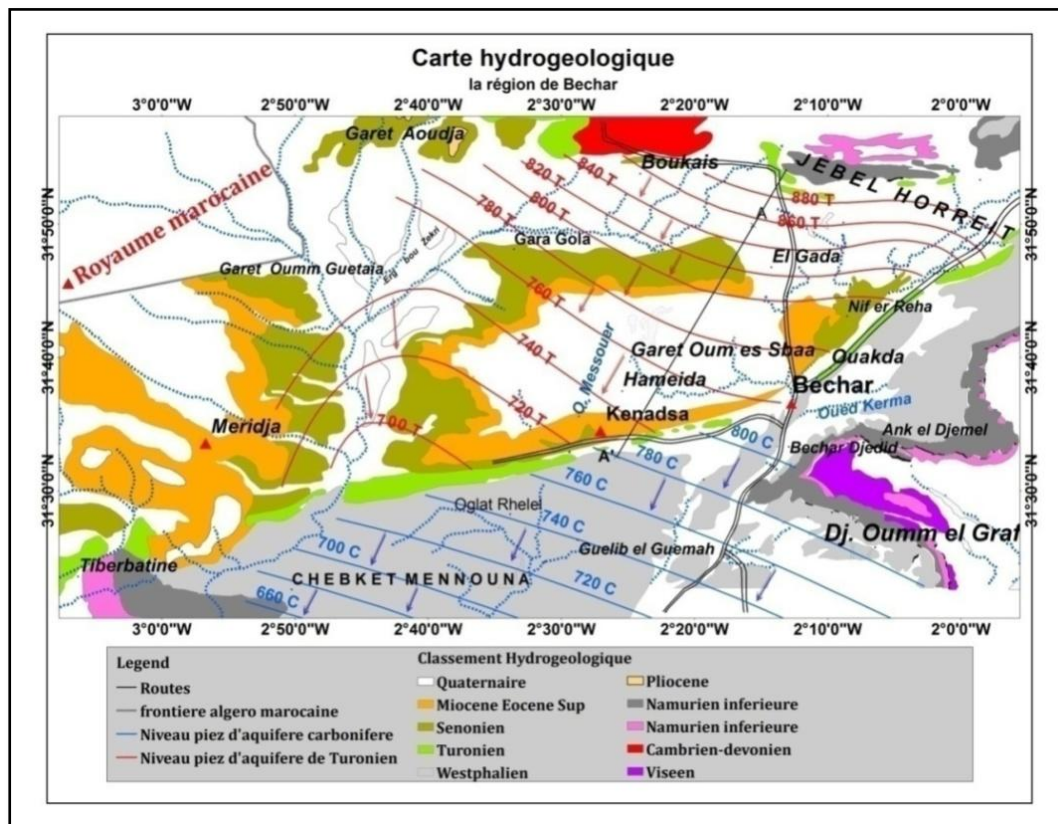


**Figure IV.1 :** Points d'eau utilisés dans l'étude calés sur la carte hydrogéologique de la region (IDROTECNICO, Région de Bechar, 1976).

### 3. Conditions aux limites

L'objectif principal de la création d'une carte des conditions aux limites est de connaître et de comprendre le comportement hydraulique des systèmes des eaux souterraines étudiés et la manière dont celles-ci sont affectées par les autres couches d'eau (Aghlmand *et al.* 2019). Pour réaliser cette carte, nous devons connaître la structure des formations géologiques qui entourent les bassins et caler les lignes piézométriques par rapport aux limites topographiques du bassin.

La figure IV.2 représente une copie de la carte des conditions aux limites de l'aquifère de la région Bechar –Kénadsa, établie en 1979 par le bureau d'étude IDROTECNICO (Idrotecneco, 1976).



**Figure IV.2 :** Carte des conditions aux limites de la région de Bechar, (IDROTECNICO, Région de Bechar, 1976)

Cette carte (Fig. IV.2) permet de déterminer les limites suivantes :

- La limite Nord : limite composée de calcaires récifaux Antar et Horreit du Namurien qui caractérise une limite à flux entrant (alimentation du système aquifère).
- La limite Sud : limite à flux sortant.
- La limite NE : limite à flux entrant, comme le révèle la carte piézométrique (voir figure IV.8 et IV.9).
- La limite Est : limite à flux entrant composée de massifs, dolomités au Djebel Bechar et les grès du Viséen.
- La limite Ouest : limite étanche composée de dépôts lacustres, de calcaires marneux parfois conglomératiques et d'éboulis.



#### 4. Étude des paramètres hydrodynamiques

Le système des aquifères de la région de Béchar est composé par l'un des aquifères les plus importants de la wilaya de Béchar. est considérée comme étant une source d'eau secondaire importante de la région après l'eau du barrage de Djorf Torba, destinée à l'alimentation en eau potable (AEP), à l'irrigation et à l'AEA. Ces nappes et plus particulièrement celle du Turonien (Ouakda) sont par ailleurs, depuis 1992, systématiquement prises en compte par les services de l'hydraulique de la wilaya de Bechar pour leur exploitation.

Actuellement, plus de 5 forages destinés à l'AEP sont effectués et captent la nappe du Turonien dont un volume de 2 799 360 m<sup>3</sup> /an (90 l/s) a déjà été extrait (Merzougui, 2007). (Tab. IV.1)

**Tableau IV.1 :** Débit exploité des cinq forages d'AEP.

Nom du Forage	Débit d'exploitation	
	l/s	m <sup>3</sup> / an
Puits =Hassi Houari (hassi 20)	14	435 456
Forage Hycobar III	12	373 248
Forage Ouakda III	22	684 288
Forage Ouakda V	22	684 288
Forage Ouakda II	12	373 248

Il existe quatre piézomètres au niveau de la zone de Ouakda. Ces derniers, nous ont permis de suivre l'évolution des réserves en eau de la nappe Turonienne (niveau dynamique, alimentation, rabattement, ...) en fonction du temps ainsi que les conditions climatiques de la région. Les valeurs de la transmissivité et de la perméabilité sont obtenues en utilisant des essais de pompages effectués dans les forages réalisés dans la zone d'étude.

##### 4.1. Essais de pompage

Pour caractériser le dynamisme de la nappe du Turonien, nous avons utilisé des données (essais de pompage) de 10 forages (Tab. IV.2) fournis par l'ANRH Béchar, et qui captent la nappe du Turonien.

Dans la littérature, on peut trouver plusieurs méthodes d'interprétation des essais de pompages. Toutes ces méthodes s'appuient sur un certain nombre d'hypothèses et de conditions bien définies. La méthode d'interprétation de pompage d'essais de Jacob (1947) et l'une de ces méthodes, dont ses formules sont énumérées ainsi :

- La transmissivité "T"

$$T = \frac{0,183 \times Q}{c} \quad (IV. 1)$$

- Le coefficient d'emmagasinement "s"

$$s = \frac{2,25 \times t_0 \times T}{x^2} \quad (IV. 2)$$

- La conductivité hydraulique "K"

La conductivité hydraulique "K" est le résultat de la division de la transmissivité hydraulique "T" par l'épaisseur "e" de l'aquifère étudié :

$$K = \frac{T}{e} \quad (IV. 3)$$

Où :

T : Transmissivité (m<sup>2</sup>/s)

Q : Débit de pompage (m<sup>3</sup>/s)

C : Rabattement équivalent (m) selon le module logarithmique

s : Coefficient d'emmagasinement

t<sub>0</sub> : Temps fictif à l'origine (sec)

X<sub>2</sub> : Distance entre le forage et le piézomètre d'observation (m)

K : Perméabilité (m/s)

e: Epaisseur de l'aquifère (m).

A travers les données de transmissivité, de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement, on peut garantir une bonne exploitation des eaux de la nappe étudiée. Ces données sont extraites à partir des essais de pompage de longues durées, en observant la variation du niveau de la nappe, en fonction du temps (t). Selon (Castany G ,1982), cette méthode est la plus favorable dans les travaux de recherche hydrogéologiques. Ci-dessous, nous mentionnons des exemples de données extraites des forages utilisés dans l'étude.

### **-Forage BEK**

Ce forage a été réalisé en 1983 par l'entreprise ETHAD, il s'est arrêté à une profondeur de 160m dans les marnes et c'est ce qui en fait un ouvrage parfait. Il a commencé par une mince couche de sable argileux, fins rouges, puis a traversé une succession des couches de grés, d'argiles et de graviers. L'aquifère proprement dit, débutant par des calcaires grés

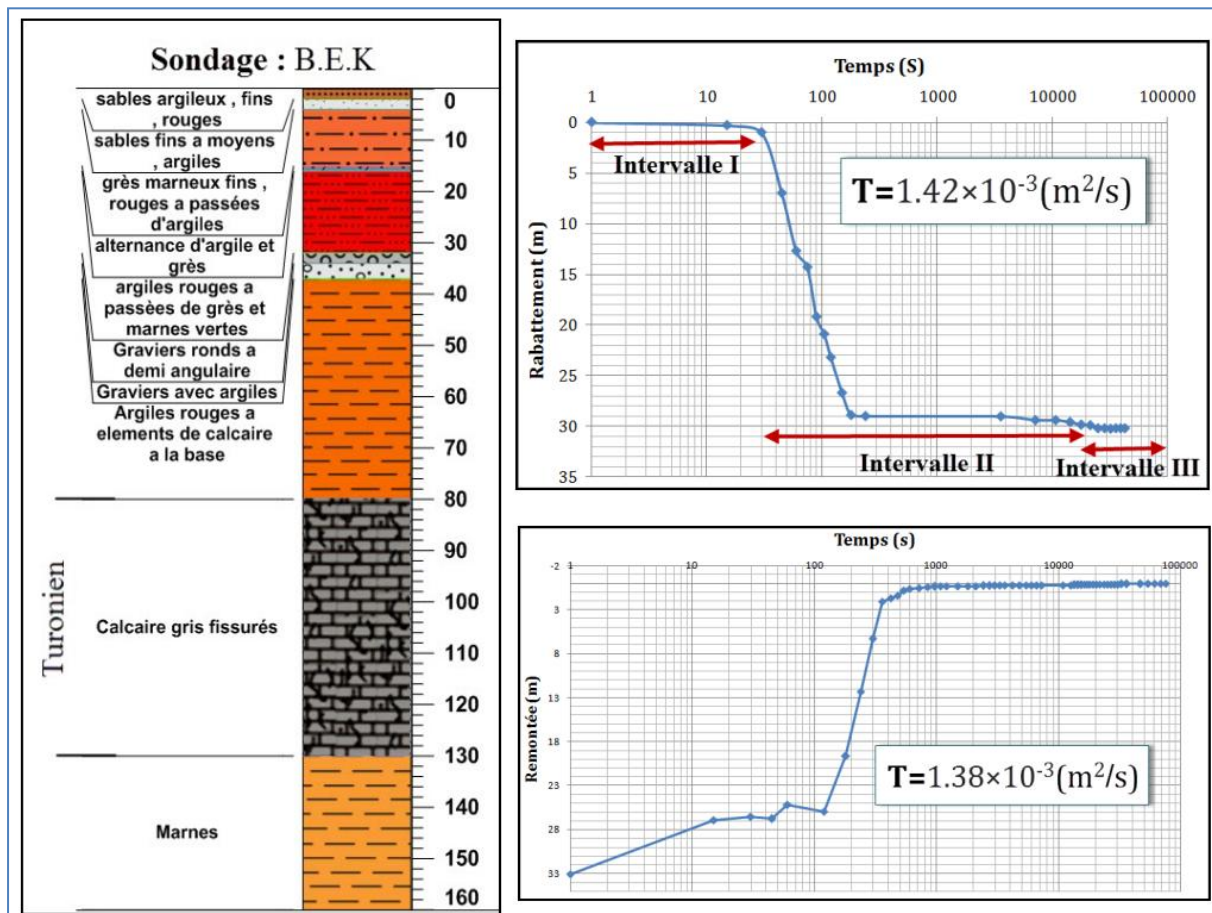
fissurées à une profondeur de 80 m. Son niveau statique était évalué à 34.5 m en 2013 (Fig.IV.3).

L'essai de pompage de longue durée a été mené sous un débit d'un pompage de 10 l/s dont la figure ci-dessous (Fig. IV.3) illustre la courbe de descente et permet de distinguer trois intervalles:

- Intervalle I**, de 0 à 30 secondes, correspond au temps de vidage
- Intervalle II**, de 30 à 2000 secondes, représente le régime transitoire
- Intervalle III**, au-delà de 2000 secondes jusqu'à la fin de pompage, le régime permanent s'est installé.

Le rabattement au cours de cette opération est de 30.2 m. L'application de la formule (IV.1) de JACOB, permet le calcul de la transmissivité "T" qui est de l'ordre de  $1.42 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s et la perméabilité "K" de l'ordre de  $2.94 \times 10^{-5}$  m/s

La remontée du niveau de la nappe est relativement rapide durant les 110 premières secondes. Le régime transitoire proprement dit s'est installé entre 110 à 1000 secondes, et a pris fin dans une pseudo-stabilisation vers la fin de la remontée.



**Figure IV.3:** Coupe de forage et courbe de rabattement et de remontée du forage B.E.K

**-Ouakda 4**

Ce forage a été exécuté en 1983 par la DHW. Il est foré à une profondeur de 150m et est achevé dans les calcaires blonds très fissurés. Les cuttings ont permis de reconstituer la coupe géologique qui comprend des calcaires marnes sableuses sur un intervalle de 24 m et des Marnes rouges gréseuses à tâches vertes, pour se prolonger dans les calcaires blonds sur un intervalle de 36 m et atteindre une couche de marnes grises. Ce forage est donc parfait (complet) (Fig. IV.4).

L'essai de pompage de longue durée à été entrepris sous un pompage de 6.5 l/s, dont la courbe de descente (Fig. IV.4), suggère trois (03) intervalles de temps :

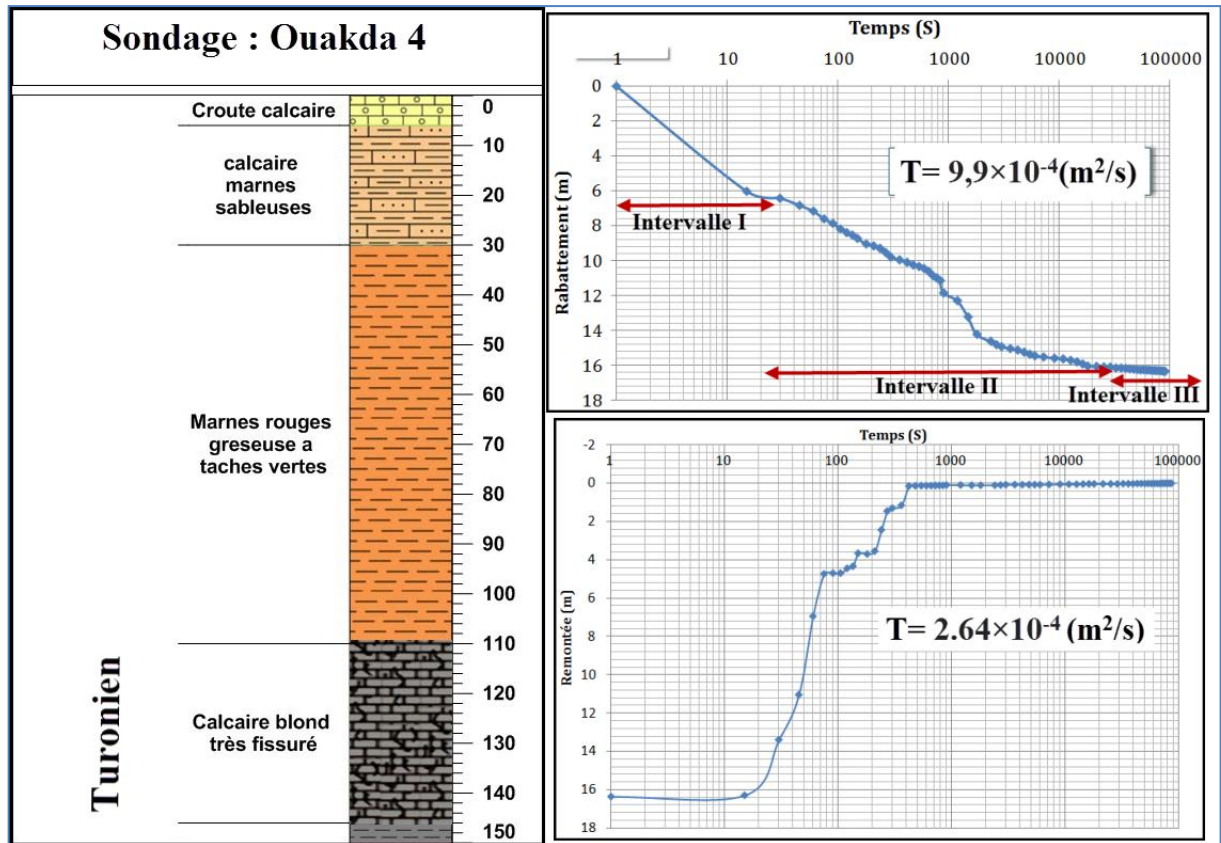
**-Intervalle I**, de 0 à 30 secondes, indique un rabattement rapide, qui s'explique par le vidage du trou.

**-Intervalle II**, de 30 à 30000 secondes, caractérise l'installation du régime transitoire.

**-Intervalle III** >30000 secondes, vers la fin de temps de pompage, on assiste à une pseudo stabilisation, c'est-à-dire le commencement d'un régime permanent.

La remontée du niveau de la nappe est relativement rapide durant les 70 premières secondes. Le régime transitoire proprement dit s'installe entre 70 à 400 secondes, et se termine dans une pseudo-stabilisation vers la fin de la remontée.

Le rabattement total est de 16.34m. Les résultats de descente et de remontée sont consignés ci-dessous (Fig. IV.4).



**Figure IV.4:** Coupe de forage et courbe de rabattement et de remontée du forage Ouakda 4

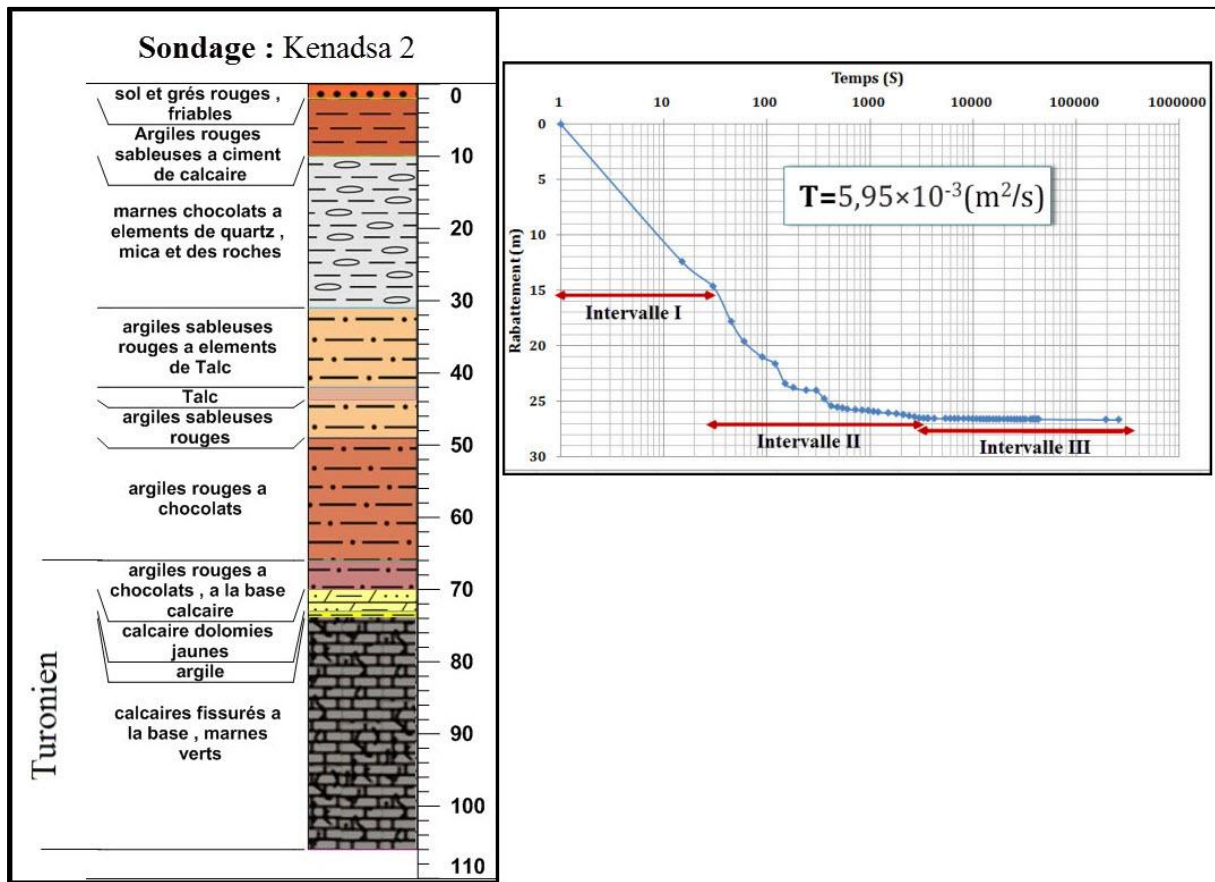
### -Kénadsa

En 2009, cet ouvrage a été exécuté par la DHW à une profondeur de 106 m, il a recoupé une mince couche de sol et grès rouges friables. Il se prolonge dans les argiles rouges, les marnes chocolatées et les argiles sableuses, pour se terminer dans les calcaires fissurés à la base, les marnes vertes et c'est ainsi qu'on peut qualifier ce forage comme étant un ouvrage parfait (Fig. IV.5). A l'état stationnaire, la profondeur de la nappe (N.S) est de 30.4 m en 2013.

Sous l'action d'un débit de pompage de 13 l/s, le rabattement est de 26.6 m. En effet, la descente comprend trois intervalles :

- Intervalle I**, période de vidage qui se prolonge jusqu'à 30 secondes,
- Intervalle II**, au-delà de 30 secondes, un régime transitoire s'installe jusqu'à 3000 secondes.
- Intervalle III**, au delà de ce temps, la courbe se stabilise, indiquant un régime permanent.

La transmissivité est obtenue par l'application de l'approximation de Jacob, elle est estimée à  $5.95 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et la perméabilité est de  $1,86 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (ANRH, 2007).



**Figure IV.5:** Coupe de forage et courbe de rabattement et de remontée du forage Kenadsa 2

### -Récapitulation

Pour l'étude hydrodynamique, nous avons utilisé les données de 10 forages qui ont été réalisés sur l'aquifère Turonien de crétacé Bechar, entre des profondeurs de 80 m à 170 m. L'étude des essais de pompage a permis de constater ce qui suit :

- Selon les courbes des essais de pompages des forages mentionnés ci-dessus, on constate dès l'arrêt du pompage que le plan d'eau, dans les trois forages (BEK, Ouakda 4, et Kénadsa) commence à remonter graduellement d'une façon relativement rapide. Selon les courbes de remontée de ces forages, on peut noter des pentes très fortes semblables à celles de rabattement, puis, on enregistre un régime transitoire qui évolue de plus en plus lentement vers un régime quasi-permanent, qui est celui de l'écoulement naturel de la nappe.

- Les valeurs de transmissivité varient entre  $9,9 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s (Ouakda 4) à  $1,0 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (B2P1). Le forage Ouakda 4 situé vers l'Est, enregistre la transmissivité et la perméabilité les plus basses, à cause d'une grande couche de marnes rouges gréseuse. Le forage (B2P1) indique la

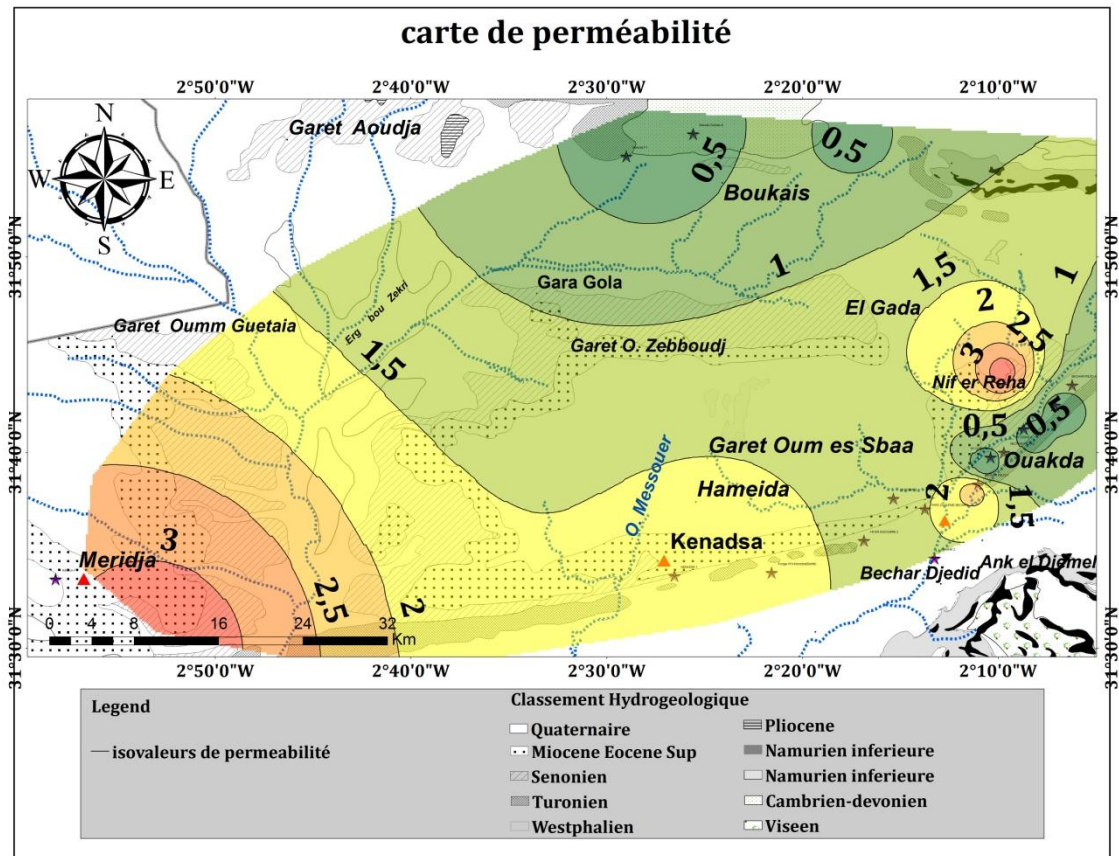
valeur maximale, due probablement à des grandes fractures de calcaire qui ont causé une grande perméabilité et une facilité d'écoulement souterrain (Fig. IV.6). Le tableau ci-dessous (Tab. IV.2) synthétise les résultats des essais de pompage

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du Turonien du bassin crétacé de Béchar.(ANRH Bechar)

	Désignation	Profondeur (m)	Débit de pompage Q (l/s)	T (m <sup>2</sup> /s) r	T (m <sup>2</sup> /s) d	K(m/s)	Coeff. emmagas. S
F1	El Houari	87	14,7		$2 \times 10^{-3}$	$4,69 \times 10^{-5}$	/
F2	BEK	160	8	$1,38 \times 10^{-3}$	$1,42 \times 10^{-3}$	$2,94 \times 10^{-5}$	/
F3	Hycobar 4	80	15	$1,48 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^{-3}$	$3,31 \times 10^{-5}$	/
F4	Ouakda 2	132	15	/	$1,3 \times 10^{-2}$	$3,33 \times 10^{-4}$	/
F5	Ouakda 3	83	35	/	$11,5 \times 10^{-3}$	$2,25 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$
F6	Ouakda 4	80	6,5	$2,64 \times 10^{-4}$	$9,9 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-5}$	/
F7	Kenadza 2	130	13	/	$5,95 \times 10^{-3}$	$1,86 \times 10^{-4}$	/
F8	B2 P1	160	3,3	/	$10^{-2}$	$3,22 \times 10^{-4}$	/
F9	Boukais Aquaculture	120	5	$3,96 \times 10^{-4}$	/	$2,32 \times 10^{-5}$	/
F10	Lahmar S <sub>2</sub>	170	7	$1,28 \times 10^{-3}$	/	$4,26 \times 10^{-5}$	/

#### 4.2. Carte de la perméabilité

La perméabilité est directement liée à la transmissivité. L'analyse de la carte réalisée témoigne d'une forte perméabilité au niveau de la zone de Ouakda (nappe Turonienne) où elle peut atteindre  $3.2 \times 10^{-4}$  m/s. Cette valeur diminue dans la partie Ouest et varie entre  $1.2$  et  $1.6 \times 10^{-4}$  m/s. Les faibles valeurs telles que  $0.8 \times 10^{-4}$  m/s sont enregistrées dans la partie Nord de la zone d'étude (Fig. IV.6).

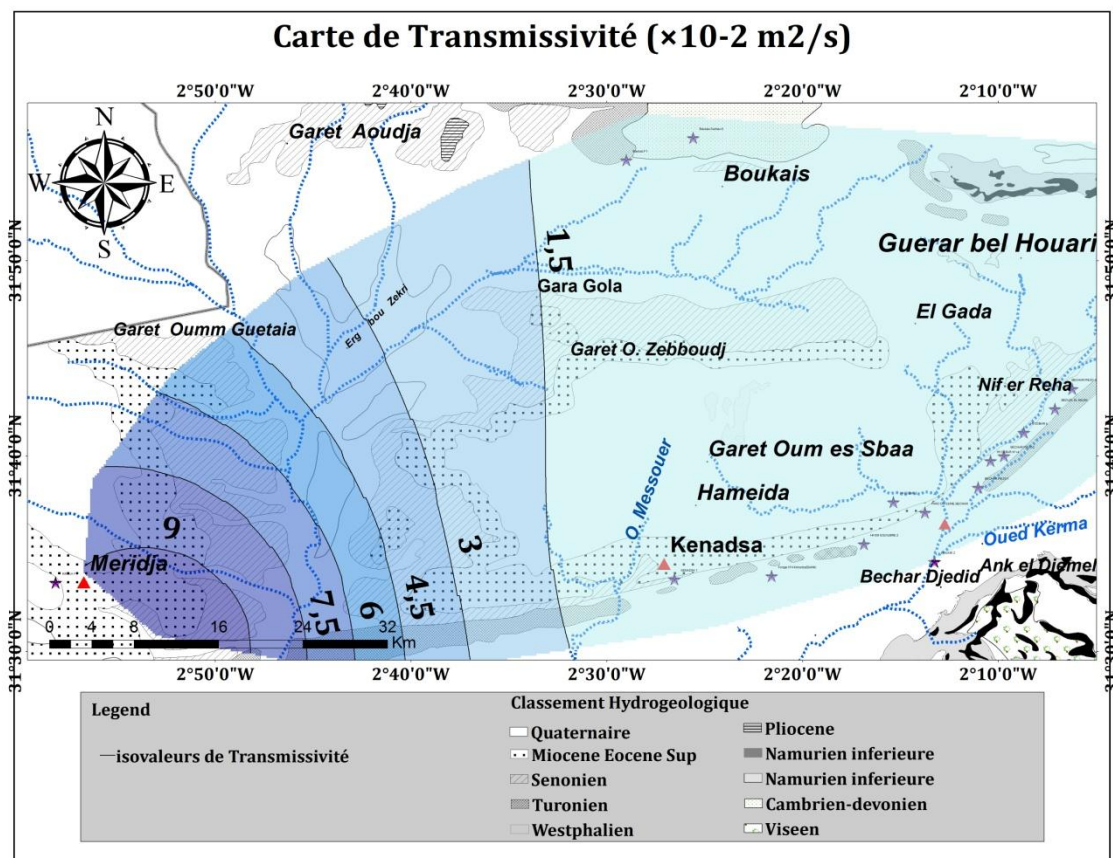


**Figure IV.6 :** Carte de perméabilité de la zone d'étude ( $\times 10^{-4}$  m/s).

### 4.3. Carte des transmissivité

L'analyse de la carte (Fig.IV.7) permet de remarquer certaines variations probablement dues à l'hétérogénéité de l'aquifère. Des zones de fortes transmissivité et de faibles transmissivité sont distinguées à travers l'ensemble du secteur de recherche. Dans la zone de Boukais – Nif el reha, les fortes valeurs sont enregistrées dans le Sud-est de la zone d'étude et sont de l'ordre de  $9 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s ; ce qui est également confirmé par l'étude géophysique puisqu'elle prouve l'existence de graviers et de cailloutis de calcaire. En revanche, à l'Est on observe des valeurs moyennes qui varient de 3 à  $6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, qui peuvent s'expliquer par l'existence d'argile et d'éléments plus fins qui dominent dans la région.





**Figure IV.7 :** Distribution de transmissivité dans la zone d'étude ( $\times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

#### 4.4. Interprétation des cartes piézométriques

Les eaux souterraines sont considérées comme un moyen de transport des substances minérales ou organiques (Sharma *et al.*, 2017), ce qui permet, grâce au sens d'écoulement des eaux souterraines obtenues à travers les lignes piézométriques, de déterminer les zones les plus sensibles à la contamination des polluants.

Les travaux d'exploitation et les expertises hydrogéologiques effectués sur la région de Béchar et antérieurs à notre étude, ont montré la présence d'un système aquifère Quaternaire, Eocène et Turonien, où les eaux souterraines prennent une direction générale NE-SW et qui occupe toute la surface de la région. Ce système de grande potentialité hydrique s'est caractérisé par une piézométrie quasi stable durant les années précédentes (1976).

Actuellement, l'allure des courbes piézométriques est quelque peu déviée vers certains forages avec une surexploitation pour quelques-uns d'entre eux.

L'analyse des cartes piézométriques, établies sur la base des données récentes de campagnes détermine deux campagnes piézométriques :

- **Campagne (février, 2013)** a été faite par les techniciens de l'ANRH.

- **Campagne (décembre ,2018)** est réalisée par nous-mêmes lors de la préparation de cette recherche.

En analysant les résultats de ces deux campagnes, nous avons pu extraire les résultats suivants :

- **Campagne (février, 2013)**

Les échantillons analysés dans cette campagne ont été prélevés des points d'eau mentionnés sur le tableau ci-dessous (Tab. IV.3). La figure (Fig. IV.8) représente la carte piézométrique de cette campagne, dont l'analyse montre un écoulement convergeant vers la zone Guelib al Aouda. Les niveaux piézométriques mesurés varient entre 766m à 734m .La direction générale de l'écoulement est NE-SW, montrant ainsi une alimentation de la région par les eaux descendant de la zone Nord-Est. Ces écoulements sont soumis à un gradient hydraulique de valeur moyenne de 2,75 % (Fig. IV.8).

La profondeur du niveau de la nappe varie de 34.5 m et a été enregistré dans la partie Est de la zone d'étude qui est reconnue par une exploitation élevée (AEP, L'irrigation) , pour atteindre au milieu une profondeur de 8.4 m.

Les niveaux piézométriques mesurés s'échelonnent entre 1015,92m à 1000m (Tab. IV.3).

**Tableau IV.3:** Ouvrages impliqués et gradients hydrauliques de la nappe Turonien (Campagne de février, 2013).

Campagne (février, 2013)					
Ouvrages	X	Y	N.S (m)	NPZ(m)	Gradient hydraulique
p1	Bechar piezo 4	-2,10	31,72	12,9	822,1
p2	Bechar piezo1	-2,18	31,64	24,75	779,01
p3	Bechar piezo2	-2,16	31,67	24,3	791,18
p4	Bezazil el kelba	-2,12	31,70	34,5	792,5
p5	Hassi équilibre 2	-2,28	31,59	8,4	773,48
p6	Houari 2	-2,22	31,58	19	734
p7	Hycobar 2	-2,26	31,63	21,82	783,66
p8	Hycobar 4	- 2,14	31,69	12,77	799,23
p9	Hycobar n°=4	-2,17	31,66	31,3	772,7
p10	Parc du genie Béchar	-2,23	31,62	26,15	764,63
p11	Boukais f1	- 2,48	31,92	8,35	831,65
p12	Boukais secteur ii	- 2,43	31,94	19	866
p13	kenadsa(bakhti)	- 2,36	31,56	13,6	746,06
p14	Kenadsa 1	- 2,44	31,56	30,4	744,6
p15	Meridja f1	-2,97	31,56	10	785,2

Formule :  
 $i = \frac{H_2 - H_1}{L}$

\* P11 – P14  
 $i = \frac{831.65 - 744.6}{3983.6}$   
 $i = 0,021 = 2,6\%$

\* P12 – P14  
 $i = \frac{866 - 744.6}{4179}$   
 $i = 0,029 = 2,9\%$

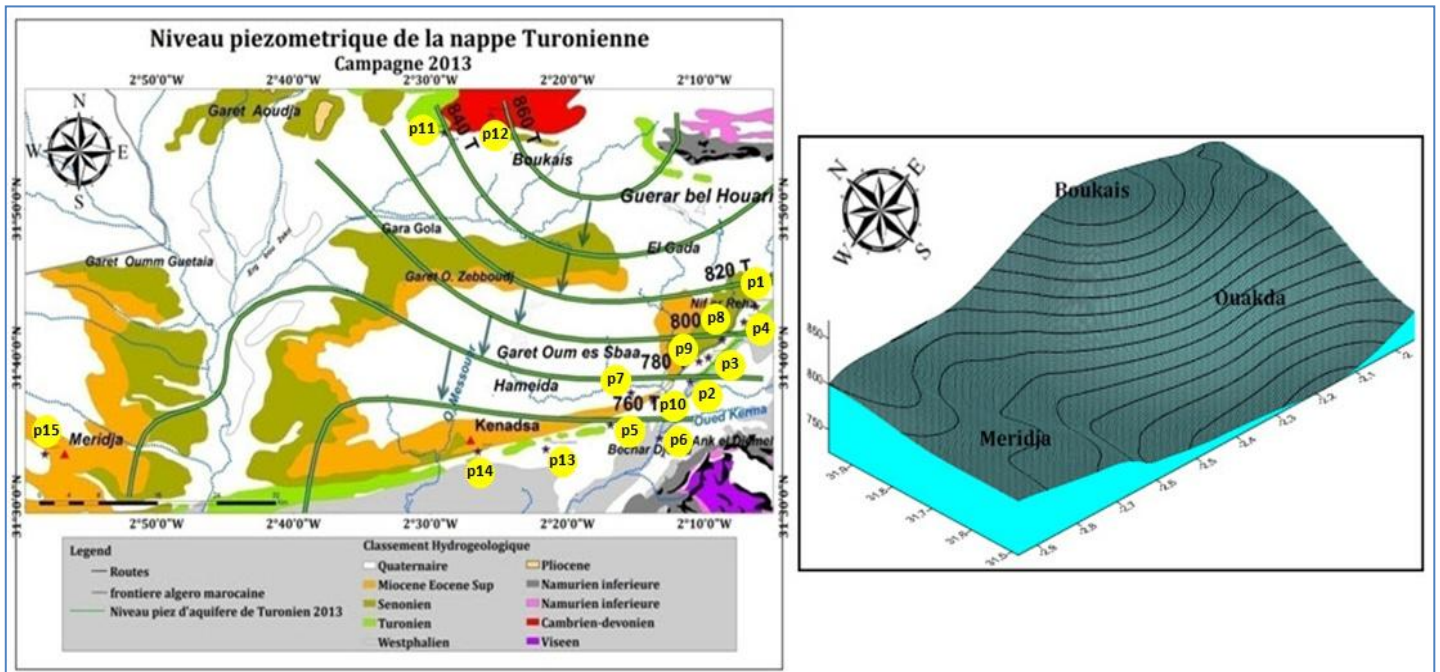


Figure IV.8: Carte piézométrique pour l'année 2013.

- **Campagne (Décembre, 2018)**

La carte piézométrique établie d'après la nouvelle campagne d'échantillonnage pour la période de décembre, 2018 (Fig. IV.9), a illustré qu'il existait un léger changement dans la direction principale d'écoulement, divisé en deux, (NE-SW) et la seconde (NE-SE) vers le champ captant d'Ouakda. Ce changement de direction peut être dû à la consommation récente élevée dans cette région, en particulier après la baisse de la dépendance vis-à-vis des eaux du barrage de Djorf-Torba. Le gradient hydraulique moyen est de 2,15%.

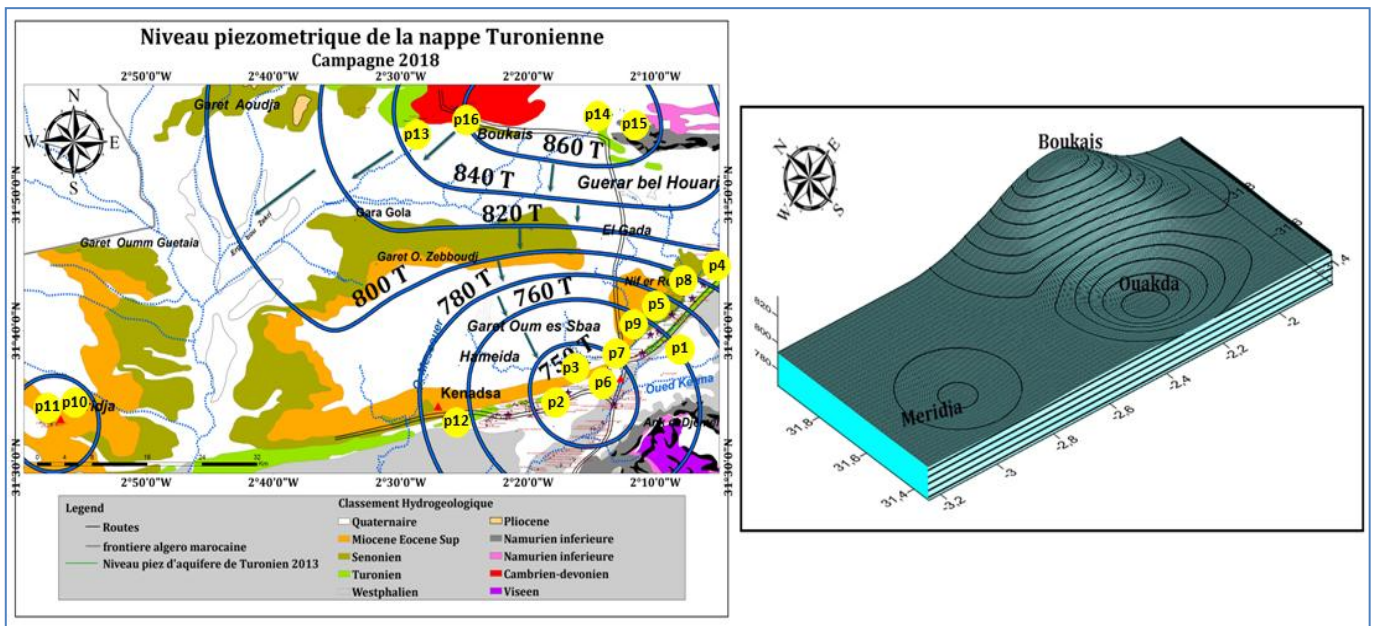
Les niveaux piézométriques ont variés entre 858.8 m enregistrés au nord de la nappe et de 750.35 m au centre de la nappe enregistrés dans l'ouvrage 'hassi equilibre 2'

La profondeur du niveau statique de la nappe devient de 34m au niveau de forage (F11) à la proximité des reliefs septentrionaux. Le gradient hydraulique moyen est de 2,15% (Tab. IV.4)

**Tableau IV.4:** Ouvrages impliqués et gradients hydrauliques de la nappe de Turonien (Campagne de février, 2018).

Campagne (Décembre, 2018)						
Ouvrages	X	Y	N.S (m)	NPZ(m)	Gradient hydraulique	
p1	Piezo 1 ouakda	-2,14	31,64	34,78	767,22	Formule : $i = \frac{H_2 - H_1}{L}$  * P13 – P2 $I = \frac{840,24 - 767,61}{4100.1}$ $i = 0,017 = 1,7\%$  * P15 – P2 $i = \frac{856,12 - 767,61}{3348.8}$ $i = 0,026 = 2,6\%$
p2	MOSQUE ELHODA P	- 2,20	31,63	16,39	767,61	
p3	BECHAR F5	-2,19	31,64	13,90	769,10	
p4	Forage 20 km	- 2,07	31,75	15,83	807,17	
p5	PZ 03	- 2,13	31,69	23,37	786,63	
p6	Ouakda hycobar 3	- 2,16	31,66	30,62	776,38	
p7	PZ 02	-2,16	31,67	33,53	779,47	
p8	PZ 04	-2,10	31,72	18,31	801,69	
p9	Forage 14 km	-2,14	31,68	23,73	785,27	
p10	Mebarki el hassan	-2,96	31,55	12,14	780,86	
p11	MERIJA P3	-2,95	31,55	4,17	779,83	
p12	hassi equilibre 2	- 2,28	31,59	13,65	750,35	
p13	boukais 2	-2,46	31,93	11,76	840,24	
p14	p 1 Laameur	-2,24	31,95	11,43	858,57	
p15	P4 SAFSSIFA	-2,21	31,94	6,88	856,12	
p16	p 1 Boukais	-2,43	31,94	9,12	848,88	

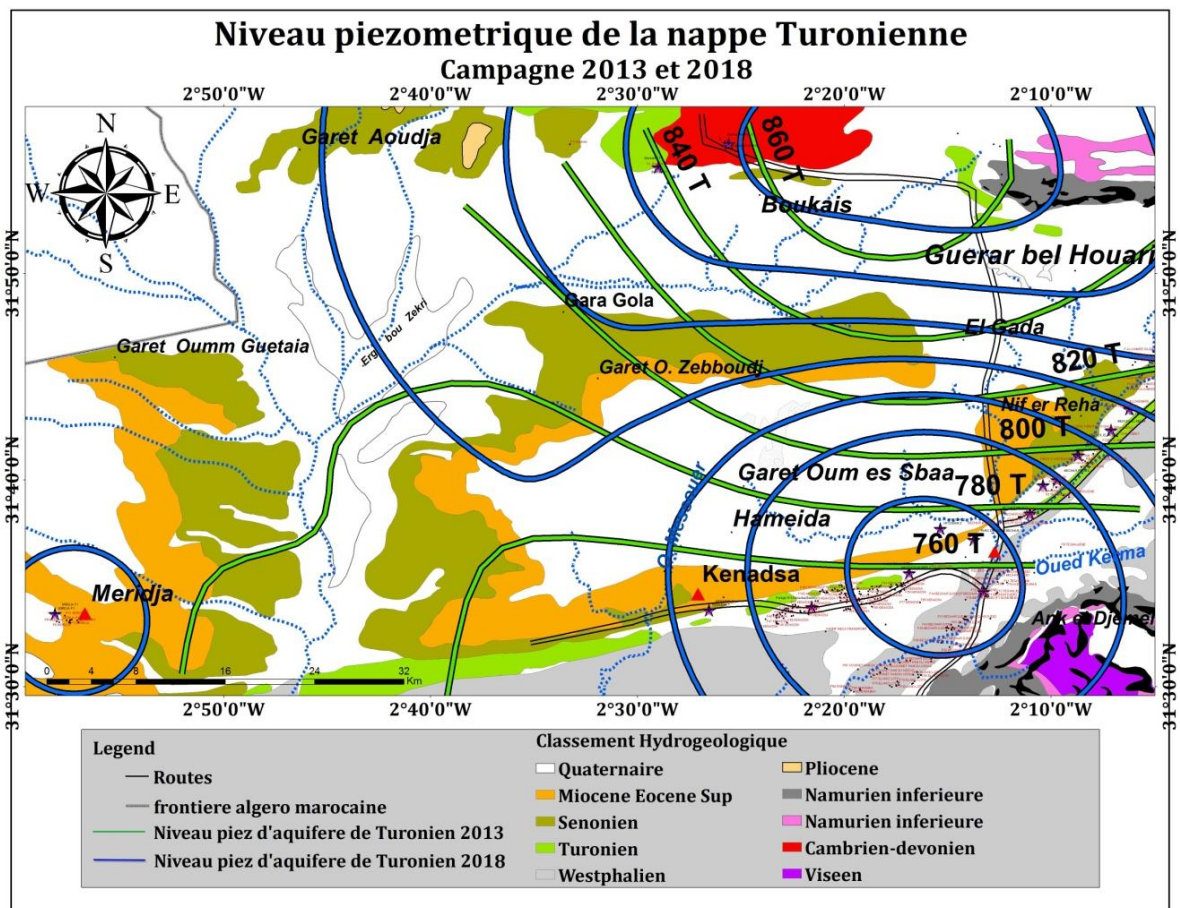
La grille 3D des isohypses, illustre l'apparition des dépressions au niveau des champs captant de Ouakda et une autre plus légère près de la ville de Meridja, dues au pompage excessif au niveau de certains ouvrages dans ces deux zones (Fig. IV.9).



**Figure IV.9:** Carte piézométrique pour l'année 2018.

Afin de déterminer le dynamisme et l'évolution de cette nappe en fonction du temps, on a élaboré une comparaison des deux cartes piézométriques de deux campagnes (2013 et 2018) (Fig. IV.10) ; cette comparaison a montré une diminution apparente des niveaux piézométriques. Cette observation est argumentée par une réduction du gradient hydraulique, qui passe de 2.75% en 2013 à 2.15 % en 2018. Cette baisse du niveau de pression pourrait s'expliquer par :

- la faible pluviométrie de ces dernières années, qui a empêché la recharge de cette nappe.
- La deuxième raison est la consommation accrue d'eau souterraine pour l'approvisionnement en eau potable, ainsi que pour l'irrigation, en particulier dans le champ captant d'Ouakda



**Figure IV.10:** Cartes piézométriques de comparaison (Campagnes, 2013 & Décembre, 2018).

## 5. Étude de la variation du niveau statique en fonction des précipitations

Pour étudier l'effet de l'intensité des précipitations sur le niveau statique de l'aquifère du Turonien, les données de l'évolution du niveau statique des deux piézomètres 1 et 2 ont été utilisées puisqu'elles sont spécifiquement dédiés à la surveillance du niveau des eaux souterraines au niveau du champ captant de Ouakda ; considéré comme la partie la plus exploitée du bassin de l'aquifère du Turonien. Ces données en question, ont été obtenues auprès des services de l'ANRH de Béchar et dont leurs caractéristiques figurent ci-dessous (Tab. IV.5).

**Tableau IV.5:** Caractéristiques des piézomètres de contrôle dans le champ captant d'Ouakda.

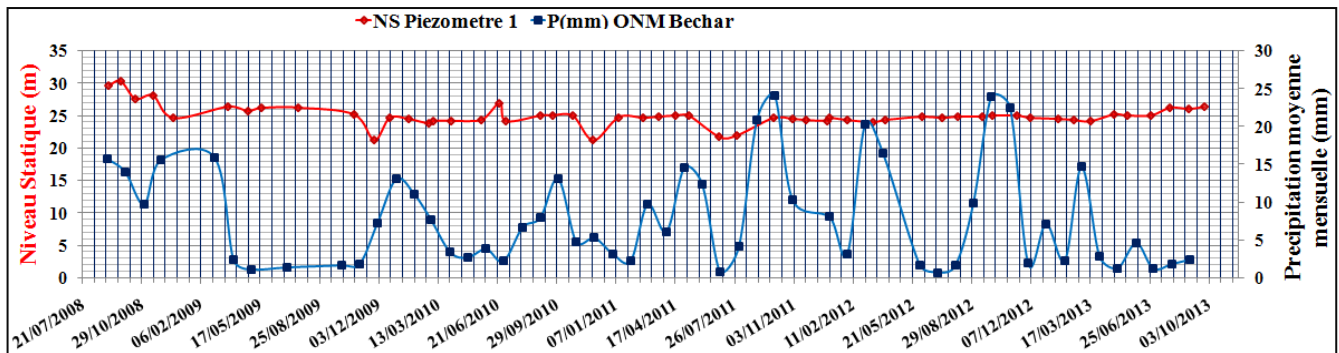
N°	Ouvrage	Coordonnées			Profondeur (m)	Aquifère
		X	Y	Z		
01	PZ1	- 2,14	31,64	802	80	Turonien
02	PZ2	- 2,16	31,67	813	80	Turonien

Afin de suivre et surveiller les changements intervenus au niveau de la nappe d'eau Turonien, l'Agence nationale des bassins hydrographiques a commencé à enregistrer l'évolution des niveaux sur les deux piézomètres et la série que nous avons obtenue s'étend de 2008 à 2013. Les résultats des enregistrements et de représentation de données sont présentés dans le tableau (Tab. IV.6) et les figures IV.11 et IV.12.

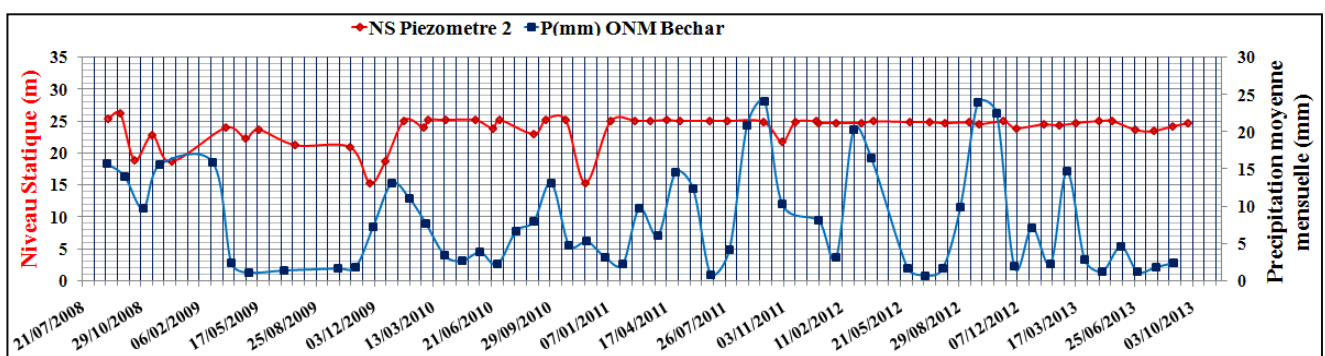
**Tableau IV.6:** enregistrements piézométriques et pluviométriques (2008-2013) (ANRH, 2013).

Date	pluie (mm)	P1	P2	Date	pluie (mm)	P1	P2
01/09/2008	15,74	29,7	25,4	01/05/2011	14,58	25	25,1
01/10/2008	14,02	30,4	26,2	01/06/2011	12,36	21,8	25,05
01/11/2008	9,71	27,72	18,9	01/07/2011	0,86	22	25,1
01/12/2008	15,59	28,2	22,84	01/08/2011	4,16	24,68	24,98
01/03/2009	15,93	24,7	18,7	01/09/2011	20,92	24,6	21,9
01/04/2009	2,53	26,4	24,1	01/10/2011	24,12	24,4	24,9
01/05/2009	1,19	25,75	22,35	01/11/2011	10,29	24,3	25
01/07/2009	1,44	26,2	23,8	01/01/2012	8,10	24,7	24,8
01/10/2009	1,69	26,3	21,3	01/02/2012	3,25	24,4	24,8
01/11/2009	1,88	25,3	21	01/03/2012	20,39	24,1	24,8
01/12/2009	7,29	21,3	15,4	01/04/2012	16,50	24,4	25
01/01/2010	13,14	24,7	18,7	01/06/2012	1,79	24,85	24,95
01/02/2010	11,05	24,5	25,15	01/07/2012	0,76	24,7	24,9
01/03/2010	7,67	23,9	24	01/08/2012	1,69	24,95	24,8
01/04/2010	3,43	24,28	25,22	01/09/2012	9,97	24,99	24,85
01/05/2010	2,74	24,28	25,22	01/10/2012	24,03	25	24,56
01/06/2010	3,88	24,45	25,25	01/11/2012	22,59	25,1	25,05
01/07/2010	2,25	27	23,9	01/12/2012	2,00	24,76	23,9
01/08/2010	6,75	24,28	25,22	01/01/2013	7,18	24,55	24,5
01/09/2010	8,05	25,08	23,04	01/02/2013	2,33	24,45	24,4
01/10/2010	13,14	25,08	25,3	01/03/2013	14,70	24,2	24,8

01/11/2010	4,78	25	25,22	01/04/2013	2,96	25,2	25
01/12/2010	5,33	21,27	15,33	01/05/2013	1,31	25,05	25,1
01/01/2011	3,24	24,8	25	01/06/2013	4,61	25,05	23,7
01/02/2011	2,27	24,7	25,1	01/07/2013	1,23	26,3	23,5
01/03/2011	9,76	24,9	25,1	01/08/2013	1,90	26,1	24,3
01/04/2011	6,17	25	25,2	01/09/2013	2,41	26,4	24,7



**Figure IV.11:** Variation du niveau piézométrique du champ captant Ouakda en fonction des précipitations mensuelles (Piézomètre 1).



**Figure IV.12:** Variation du niveau piézométrique du champ captant Ouakda en fonction des précipitations mensuelles (Piézomètre 2).

Les figures IV.11 et IV.12 illustrent deux courbes de variation piézométrique des deux piézomètres (1 et 2) en fonction de précipitations moyennes mensuelles de la station pluviométrique d'ONM Béchar. A travers ces courbes, on remarque que le niveau statique des deux piézomètres est clairement affecté par le changement de la hauteur des précipitations au niveau de la région. On constate que le niveau statique moyen du bassin est de près de 25 m mais ce niveau a augmenté d'environ 30 m en Octobre 2008 puis a commencé à baisser en raison d'une diminution des précipitations pour augmenter à nouveau en Février 2009, due à l'augmentation des valeurs de précipitations à la même date. On note également que le niveau le plus bas (proche de 15 m) a été enregistré en Janvier 2011 et qui semble être lié à la pression exercée par la consommation des eaux souterraines, compte tenu de la rareté des

pluies durant cette période. En revanche, est observée à partir de Février 2012, une relative stabilité du niveau statique des eaux souterraines du champ (25 m), liée cette fois-ci à l'infiltration des eaux de pluie en raison de fortes précipitations enregistrées entre Août et Décembre 2012.

## 6. Géométrie des aquifères et conditions aux limites

Afin d'identifier les caractéristiques géométriques de l'aquifère du turonien, nous avons tenté d'obtenir et d'exploiter les données relatives aux forages qui ont été réalisés dans cet aquifère ; malgré la rareté de ces données dans cette zone, pour cet objectif, nous avons utilisé les corrélations transversales et longitudinales des forages dont nous disposons.

### 6.1. Corrélations des coupes

#### 6.1.1. Corrélation transversale

Cette corrélation dépend des coupes géologiques des forages (Hassi el houari, BEK, Ouakda 4, Keandsa 2 et B2p1), qui s'étendent d'Est en ouest près de la ville de Meridja, de sorte que cette corrélation montre quatre formations géologiques, qui sont (Quaternaire, Senonien, Turonien et Cénomaniens) du haut jusqu'en bas. A travers la figure IV.13 on remarque un léger changement dans l'épaisseur de l'aquifère qui devient ensuite moins épais du côté ouest de l'aquifère.

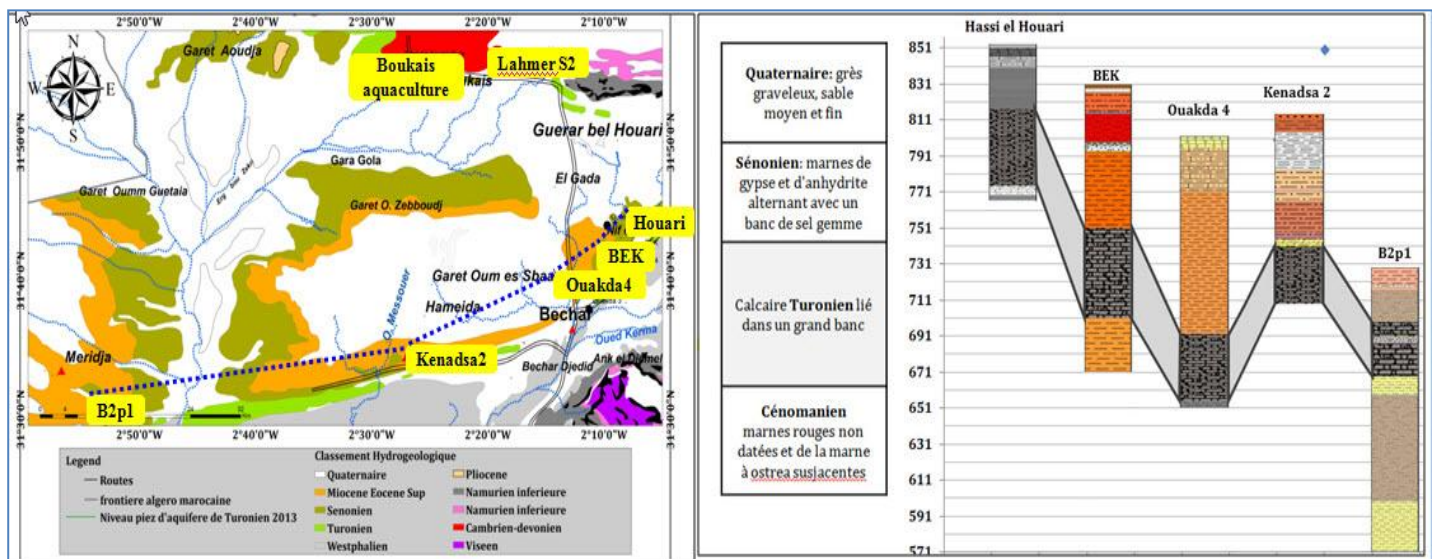
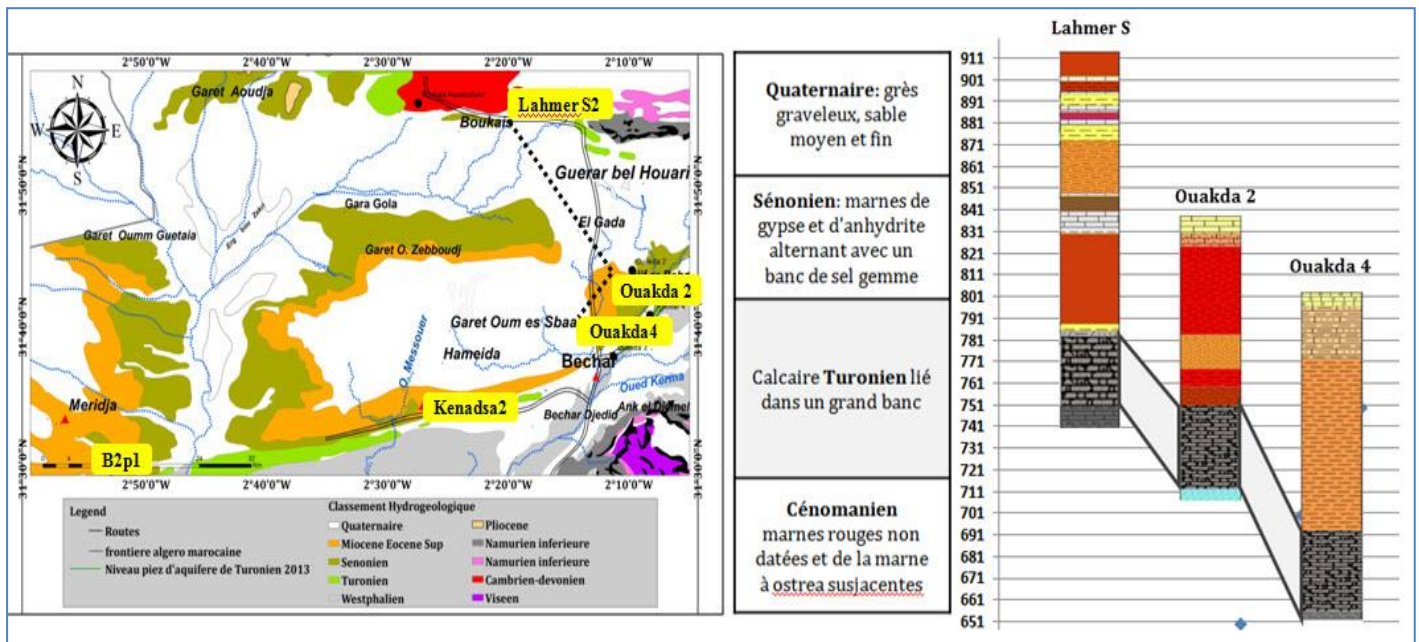


Figure IV.13: Corrélation transversale de l'Est vers l'Ouest.



### 6.1.2. Corrélation longitudinale

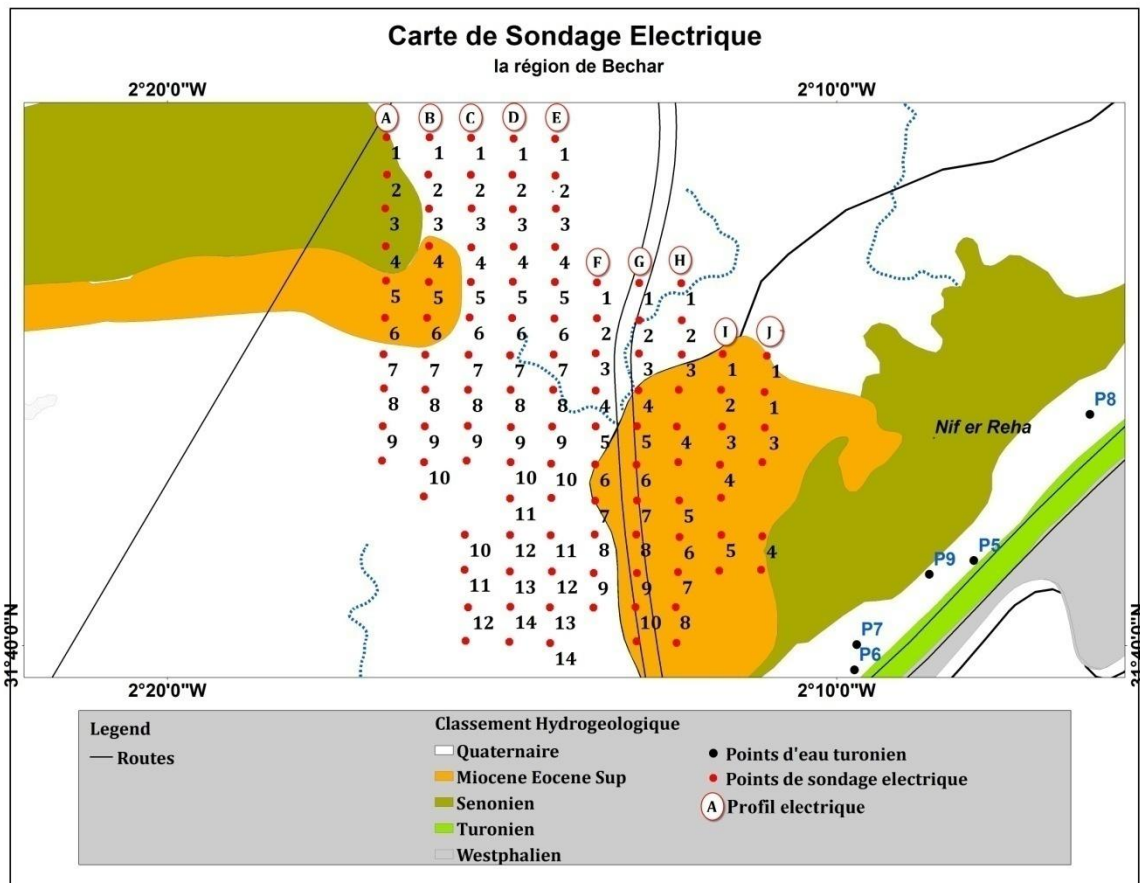
Pour la corrélation longitudinale, nous avons utilisé les coupes des forages de (lahmer S, Ouakda 2 et Ouakda 4) qui s'étendent du nord vers le sud du bassin. Cette corrélation comprenait les mêmes formations géologiques que celles observées dans la coupe transversales, mais différait dans la stabilité de l'épaisseur de l'aquifère le long de la coupe. (Fig. IV.14).



**Figure IV.14:** Corrélation longitudinale du Nord vers le Sud.

## 6. 2. Géophysique

En 2011, le Bureau d'études (BETA- Consults) a mené une étude géophysique à Oum Sebaa, dans le but d'explorer l'aquifère de crétacé de Béchar (Fig. IV.15). Ce processus visait principalement à déterminer les caractéristiques géométriques du bassin du Crétacé, ainsi qu'à identifier les formations géologiques les plus importantes qui composent ce bassin.



**Figure IV. 15:** Carte des sondages électriques de la région d'Oum Sebaa (BETAConsults, 2011).

- **Méthodologie et dispositifs**

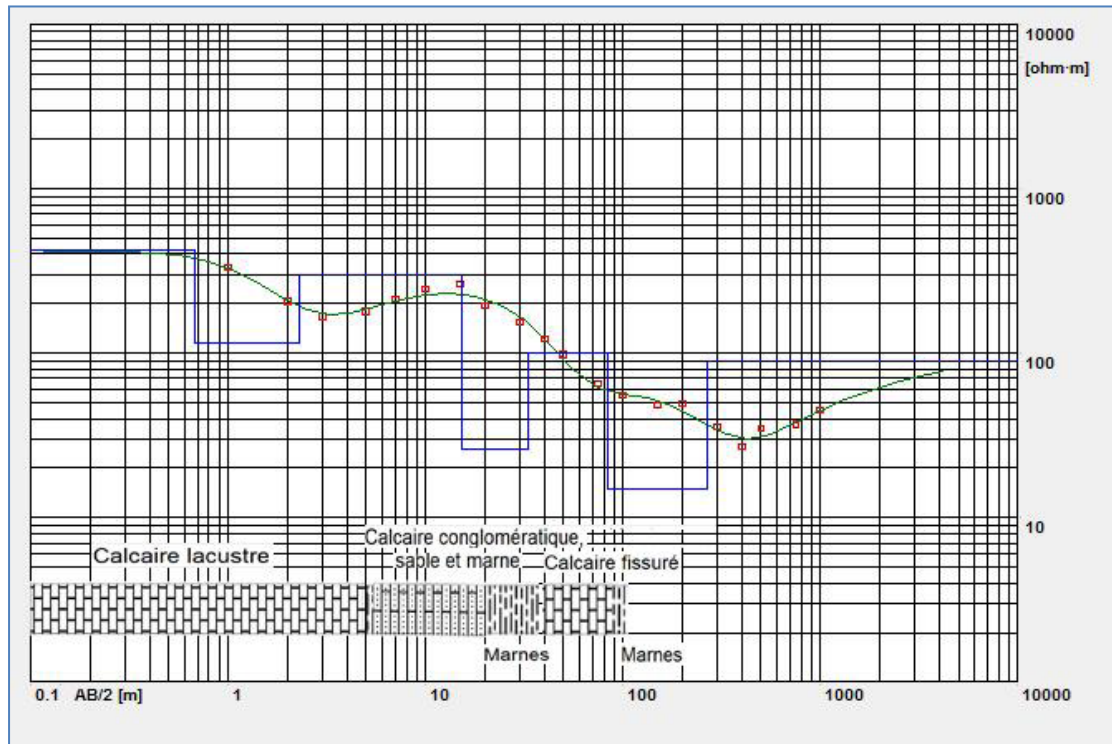
La technique utilisée sur le terrain est celle des sondages électriques verticaux (S.E.V). Elle consiste à injecter dans le sol un courant électrique continu par l'intermédiaire de deux électrodes d'acier et de mesurer la différence de potentiel créée aux bornes de deux autres électrodes en cuivre. L'ensemble des quatre électrodes constitue ce que l'on appelle un quadripôle (Tab. IV.7).

**Tableau IV. 7:** caractéristiques de dispositif de mesure

Appareillage	AB	MN
<b>Résistivimètre</b>	1000 à 6000 m	0.5
(AB) : électrodes d'émission de courant ; (MN) : électrodes de mesure et un galvanomètre		

- **Etalonnage**

Chaque processus de mesure géophysique nécessite une opération d'étalonnage, pour cela, les techniciens du bureau d'étude ont achevé cette opération sur des formations cénomano-turonniennes en se basant sur un forage J1-153 (Fig. IV.16).



**Figure IV. 16:** Courbe d'étalonnage de forage **J1-153** (BETA-Consults, 2011).

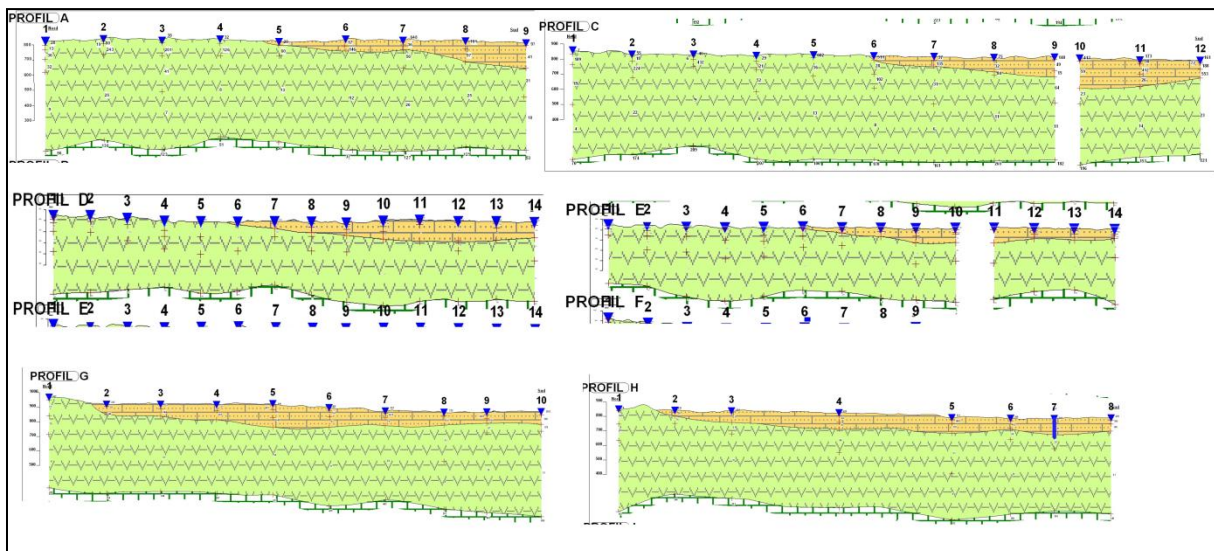
### -Résultats

Les résultats de l'étude géophysique sont mentionnés ci-dessous (Tab. IV.8) :

**Tableau IV. 8:** formations trouvées d'après les études géophysiques.

stratigraphie	lithologie	Résistivité (Ohm.m)
Eocène sup-Quaternaire	Graviers, sables, marnes, conglomérats et calcaires lacustres	6 à 3590
Sénonien	- sel gemme avec intercalation de marnes et anhydrites - Marnes et argiles	- 36 à 1816 -3 à 30
Cénomano-Turonien	Calcaires et marno-calcaires	37 à 693

Dans le but d'identifier la structure géométrique de l'aquifère de Turonien, nous avons sélectionné 06 coupes géo-électriques (A, C, D, E, H, L), d'orientation nord-sud, qui montrent les différentes formations géologiques (Fig. IV.17). Selon ces coupes, on peut remarquer que l'épaisseur de l'aquifère de Turonien est comprise entre 35 et 47 m avec des valeurs de résistivités moyennes comprises entre 18  $\Omega$ . m à 131  $\Omega$ .



**Figure IV. 17:** Coupes géo-électriques de la région d'Oum Sebaa (BETAConsults, 2011).

### 6. 2.1. Coupes géo-électriques A, C et D

Les coupes géo-électriques A, C et D (Fig. IV.17) d'orientation Nord-sud réalisées dans la partie Ouest du secteur étudié montrent une structure monoclinale représentée par des formations Méso-Cénozoïques, admettant une forte subsidence dans la partie Sud du bassin.

- Les terrains Mésozoïques sont représentés de la base au sommet par (ANRH / BETA Consults, 2011) :

**a-** Un Turonien carbonaté dont l'épaisseur ne dépasse pas les 100 mètres, les résistivités varient entre 37 Ohm.m au sondage A6 à 272 Ohm.m au sondage B10. Les faibles valeurs correspondraient aux calcaires et marnes-calcaires minéralisées.

**b-** Un puissant dépôt Sénonien attestant d'une forte subsidence vers le Sud, constitué de marnes gréseuses alternées de sels gemmes et anhydrites ayant des résistivités comprises entre 4 Ohm.m au sondage C1 et 602 Ohm.m au sondage C5.

**c-** Le Tertiaire constitue un recouvrement comparable à la couverture Hamadien, représenté par des argiles sableuses, grés et poudingues d'une résistivité allant de 40 à 500 Ohm.m. Une assise calcaire repose sur les grés, poudingues et argiles gréseuses dont la résistivité peut atteindre 1617 Ohm.m au sondage B8.

### 6. 2.2. Coupes géo-électriques E, H et L

Ces coupes géo-électriques (Fig. IV.17) présentent exactement la même structure lithologique que celles des coupes précédentes, et sont caractérisées par (ANRH / BETA Consults, 2013) :

- une continuité litho-stratigraphique vers la dépression formant le bassin subsident ;
- le Sénonien subsident très épais reposant toujours sur le Turonien carbonaté compact dont les résistivités varient de 143 Ohm.m au sondage D10 à 401 Ohm.m au sondage F8 ;
- il est à noter qu'au niveau du sondage E10, le Turonien est plus marneux avec une résistivité de 78 Ohm.m.

Toutefois, il est à signaler que les sondages électriques n'ont pas traversé la totalité des formations Cénomano-Turoniennes.

### 6.3. Linéaments

Le linéament se définit comme des éléments linéaires dans un paysage identifié sur des images satellites et des photographies aériennes, qui ont très probablement une origine géologique. Généralement, les linéaments reposent sur une zone structurelle, une zone fracturée, une série de failles ou une zone de collines alignées sur des plis d'altération localisée et une zone de perméabilité et de porosité accrues.

La Distribution de linéaments pour la zone de Kénadsa-Béchar a été préparée à l'aide de l'image de Landsat 8 Thematic Mapper (TM). Les images se composent de onze bandes spectrales avec une taille de cellule (30×30 m)., la taille de la scène est de 196 km au nord-sud sur 190 km d'est en ouest et remonte au (2021/02/15). La figure IV.18 illustre l'image Landsat TM pour le bassin d'étude avec la distribution des linéaments extraits.

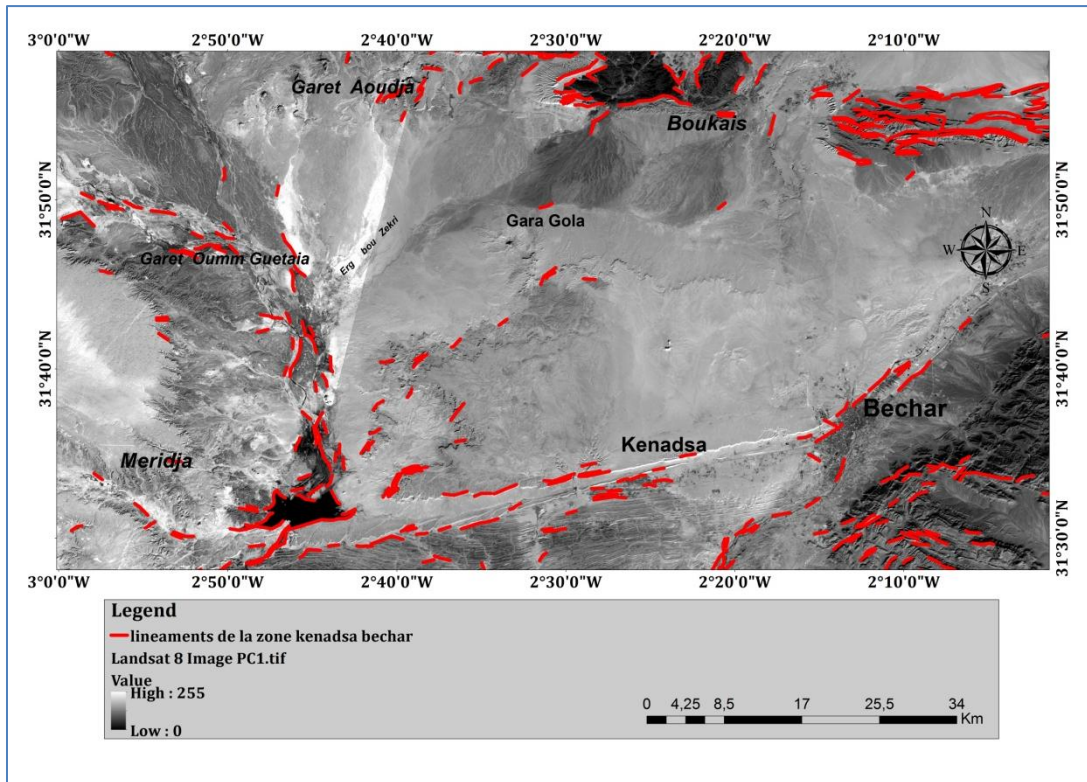


Figure IV. 18: Image Landsat 8 de la zone d'étude (15/02/2021)

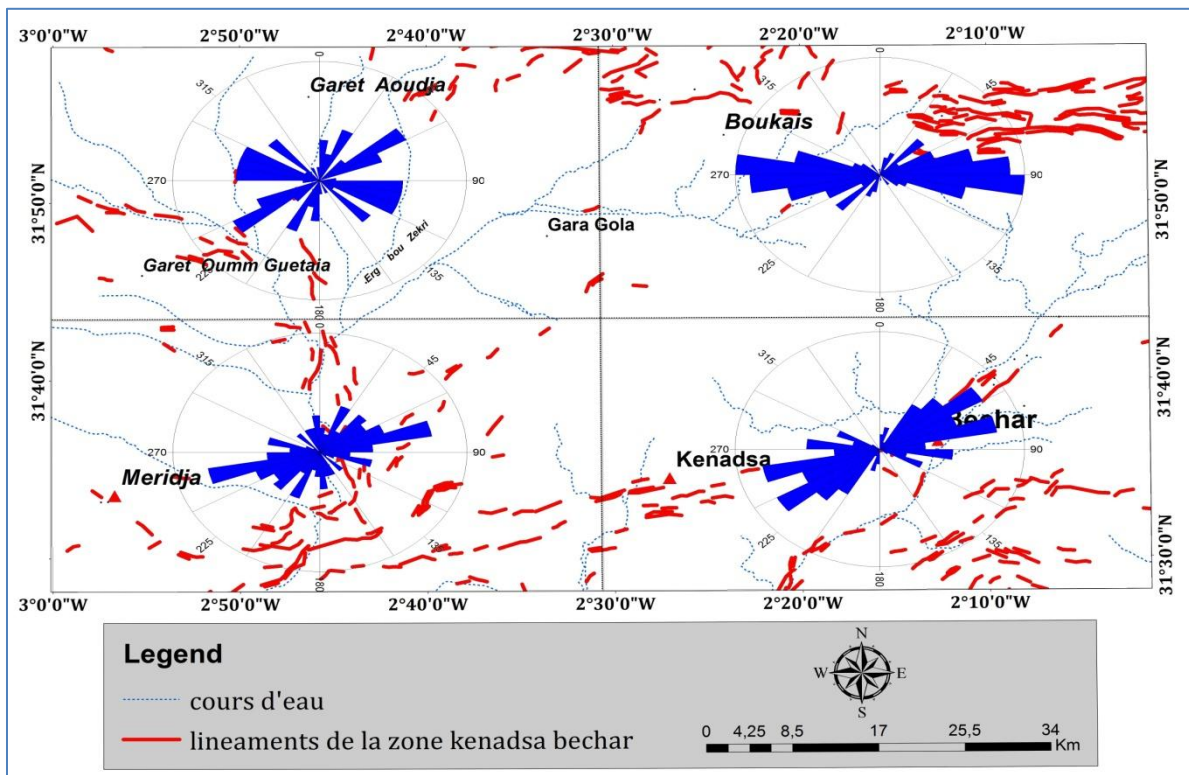
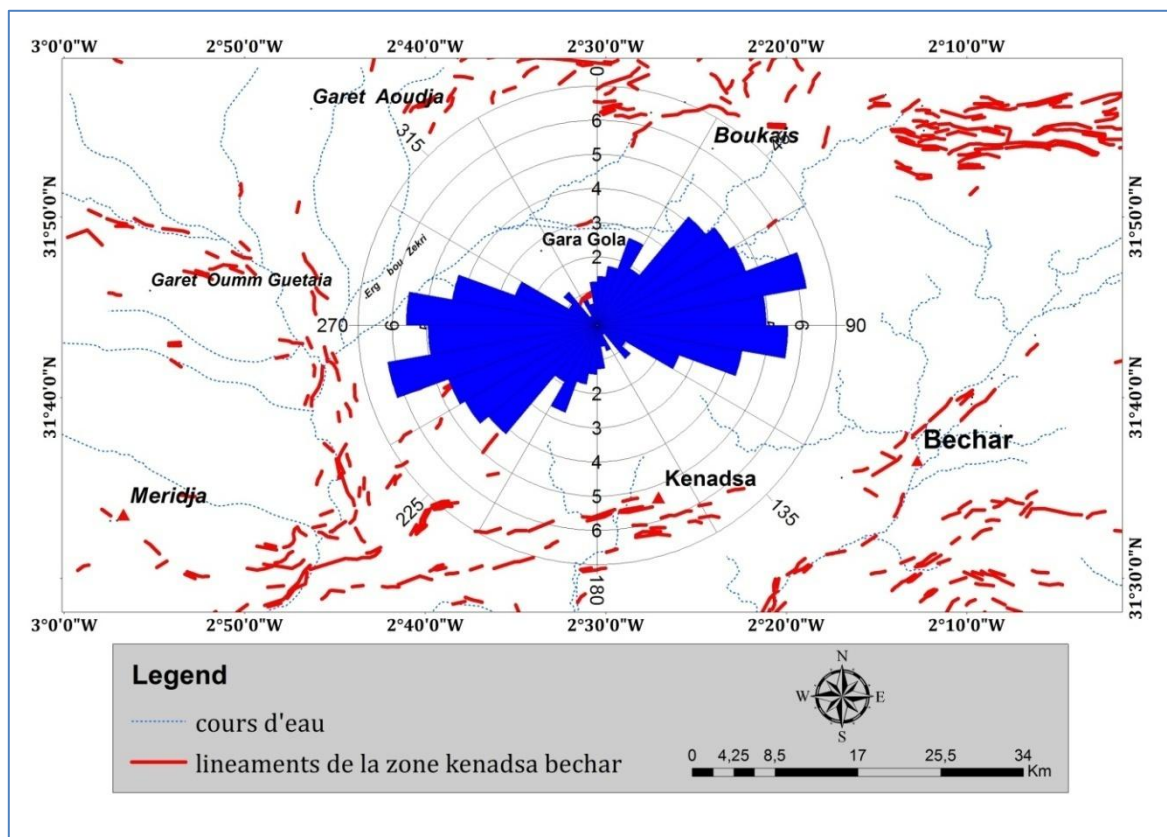


Figure IV. 19 : Carte des Diagrammes de Rose de la zone Kénadsa- Béchar

La carte de linéaments (Fig. IV.18), montrant toutes les directions de frappe peut être extraite des données de télédétection SRTM. Dans ce travail, la zone d'étude a été subdivisée en quatre sous-zones associées au diagramme en rose de l'orientation des linéaments (Fig. IV.19).

L'interprétation de tous les linéaments a permis d'enregistrer 313 linéaments, l'orientation NE – SW comme direction de linéament principale de la zone d'étude (Fig. IV.20). L'analyse partielle des quatre zones a permis de distinguer trois orientations : la zone supérieure à gauche est caractérisée par une dominance d'orientation NW – SE, cette partie contient un rapport de 14 % de l'ensemble des fractures ; La présence d'une dominance d'un système de fractures orienté W-E est identifié dans la zone en haut à droite où se localisent les deux massifs montagneux les plus importants dans la région (Antar et Dj, Horeit) avec un rapport des fractures (31 %) ; dans les deux zones inférieures à celle de l'étude en cours (à droite et à gauche) sont dominées par une orientation NE – SW , cette partie représente 55% de l'ensemble des linéaments détectés dans la zone d'étude ,en raison de la croûte des calcaires près de la cuvette du barrage de Djorf-Torba, de sorte que cette zone est considérée comme l'une des meilleures zones pour adopter la solution de la recharge artificielle de la nappe d'eau souterraine .



**Figure IV. 20 :** Carte synthétique de toutes les directions des linéaments.

## 7. Conclusion

La nappe d'eau du Turonien de la région Béchar / Kénadsa appartient au bassin du Crétacé d'Er Rachidia – Béchar et est considérée comme étant le plus grand bassin en termes d'exploitation et qui garantit environ 20% des besoins en eau potable des habitants de la ville de Bechar. A ce jour, 2 799 360 m<sup>3</sup> /an (90 l/s) de volume d'eau y ont déjà été prélevés.

En raison de son importance, cette étude a voulu réaliser un diagnostic de la nappe qui permettrait de mieux comprendre ses caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques. Pour atteindre cet objectif, des cartes piézométriques de la région ont été établies.

L'analyse des cartes piézométriques montre que les courbes isohypses présentent une irrégularité piézométrique avec un sens d'écoulement des eaux Sud-ouest qui indique une alimentation de la région par les eaux descendant de la zone Nord-est.

Le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,0021 à 0,0026 au niveau de la partie S et au SW de la zone de Guelib el Aouda qui témoigne d'une exploitation intensive tandis qu'au alentours de la région de Béchar Djedid et Djebel Oum el Graf forages, le gradient hydraulique est de l'ordre de 24 %.

Les caractéristiques de la nappe ont également nécessité la réalisation de cartes de perméabilité. L'étude de cette dernière a démontré qu'il existait une zone de forte perméabilité au niveau d'Ouakda (nappe Turonienne) qui peut atteindre  $3.2 \times 10^{-4}$  m/s mais qui toutefois diminue dans la partie Ouest et varie entre  $1.2$  et  $1.6 \times 10^{-4}$  m/s. Les faibles valeurs de perméabilité sont quant à elles observées dans la partie Nord de la zone d'étude avec  $0.8 \times 10^{-4}$  m/s.

L'étude s'est également penchée sur la variation du niveau statique en fonction des précipitations. Le résultat du traitement des données établit que le niveau statique des deux piézomètres est clairement affecté par le changement d'intensité des précipitations au niveau de la région. Le niveau (30 m) augmente en Octobre 2008 en raison de l'augmentation des précipitations à la même date, puis diminue (15 m) en Janvier 2011 à cause du manque de précipitations et de la consommation des eaux souterraines, entraînée par la pénurie d'eau ; pour finir par augmenter et se stabiliser (25 m) en Février 2012, notamment grâce à l'infiltration des eaux de pluie abondantes à cette période.



---

# **Chapitre V**

## Étude de la qualité hydro chimique des eaux

---

---

# CHAPITRE V

## ÉTUDE DE LA QUALITE HYDROCHIMIQUE DES EAUX

---

### 1. Introduction

La croissance démographique rapide pose un réel défi aux responsables et aux gestionnaires du secteur des ressources en eau, en particulier dans les pays en développement, qui nécessitent, en plus du recours aux technologies modernes, de s'armer de mesures judiciaires strictes et contraignantes pour la protection des ressources en eau de surface et souterraine.

La qualité des eaux souterraines est principalement mesurée par la concentration des propriétés physiques et chimiques de l'eau, ce qui constitue un outil efficace permettant d'aider le gestionnaire à déterminer l'utilisation de cette eau, que ce soit pour la consommation humaine et / ou animal, l'agriculture, l'industrie, *etc.* (Winter et al., 1998). En dehors des polluants anthropiques et d'une manière générale, il existe deux sources naturelles qui peuvent altérer la qualité des eaux souterraines ; ce sont le processus biologiques dans le milieu aquatique et la lithologie du réservoir (khatri et al., 2014), ce qui est le but de la recherche de ce chapitre. Ainsi l'objectif de cette partie est de fournir les propriétés physiques et chimiques de l'eau du réservoir du Turonien en utilisant les données disponibles.

### 2. Obtention de la base des données

Afin de caractériser la qualité des eaux souterraines de la wilaya de Béchar, l'antenne de l'Agence National des Ressources Hydriques de Béchar a effectué plusieurs campagnes d'échantillonnage des eaux souterraines. Pour notre étude, nous avons obtenu les données de la dernière campagne (2013); les résultats des analyses sont présentés dans le tableau V.1:

**Tableau V.1 :** Paramètres physico-chimiques des forages (campagne 2013)

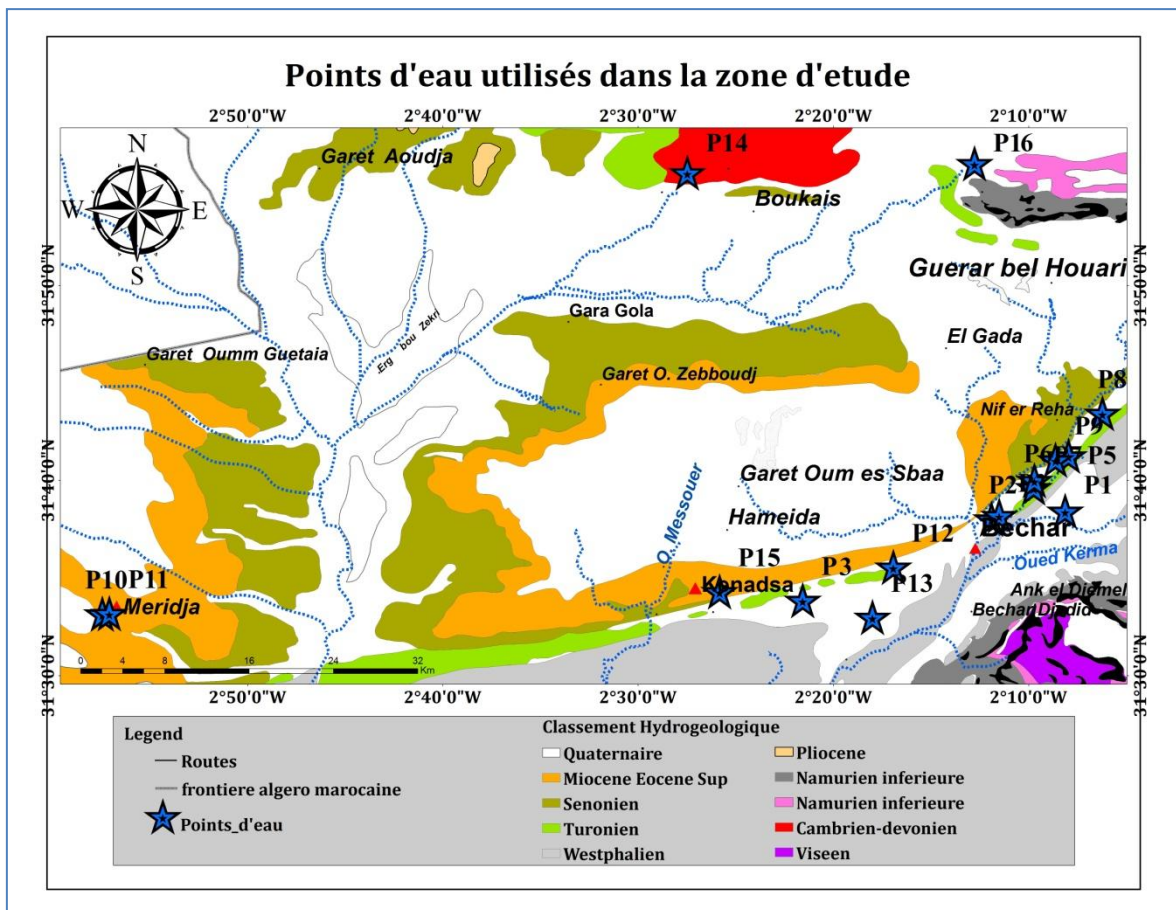
Nom	Temp.	pH	Cond. ( $\mu S/cm$ )	RS	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Balance %
Meridja P3	11	7,55	2,83	1780	82	116	310	1,4	430	595	207	23	2,07
Meridja P2	9,25	7,57	1,666	1040	62	77	160	1,1	315	205	156	25	0,90
Meridja P1	9,8	7,48	2,2	1380	87	88	230	1,3	470	240	201	20	0,62
Mosquée Elhouda P	10,7	7,55	2,08	1300	103	101	157,5	1,1	240	440	226	50	0,29
Bechar F5	19,05	7,38	1,04	660	70	41	80	1	145	100	253	15	0,91
Bechar F2	12,7	7,46	1,024	650	70	39	80	0,9	155	60	244	25	0,89
PZ 01	13,03	7,55	1,62	1080	74	103	130	4,4	210	380	186	41	1,08
Ouakda hycobar 3	17,71	7,68	0,98	680	78	41	77	2,9	120	150	223	20	0,96
PZ 02	13,81	7,55	35,83	20000	20	663	5797,5	47,5	7800	4200	61	26	0,07
Forage 14 km	16,93	7,56	1,36	860	58	57	140	1,9	280	100	201	34	0,40
Ouakda hycobar 4	14,59	7,06	0,99	630	57	33	90	2,2	130	130	171	12	0,84
PZ 4 Ancien hycobar	17,89	7,06	0,99	630	57	33	90	2,2	130	130	171	12	0,84
PZ 03	14,67	7,74	1,09	690	48	48	100	2,4	150	120	192	19	2,71
PZ 04	15,15	7,63	1,08	690	82	28	91	2,5	155	98	217	27	0,06
Forage 20 km	18,37	7,2	1,037	660	62	41	88	2,1	140	130	186	7	2,62

Afin de mener à bien cette étude, une actualisation des données recueillies auprès des services de l'ANRH fût indispensable. Pour cela, une campagne d'échantillonnage a été réalisée en 2018 et a permis de caractériser l'évolution hydro-chimique des eaux souterraines de la nappe Turonienne.

### 3. Méthodologie de travail

#### 3.1. Prélèvements

Des échantillons d'eau souterraine ont été recueillis à partir de 16 points d'échantillonnage présélectionnés dans la région Béchar - Kénadsa (Fig. V.1). L'emplacement géographique de chaque point d'eau a été déterminé à l'aide d'un système de positionnement global (GPS) portable (Fig. V.1). Les échantillons ont été prélevés de manière aléatoire dans les points d'eau sélectionnés, à des profondeurs variant de 11 à 200 m. Chaque puits fût pompé jusqu'à obtenir un pH stable et une conductivité électrique. Les échantillons ont été prélevés et stockés dans des bouteilles en polypropylène haute densité prélavée (PEHD) de volume d'1 litre, selon la méthode standard internationale recommandée (Barcelona, 1985), puis conservées dans une glacière et transférées au laboratoire de l'algérienne des eaux de Bechar (ADE).



**Figure V.1** : localisation des points d'échantillonnage

### 3.2. Mesures in situ

A partir d'un dispositif de mesures multi-paramètres, quatre paramètres physico-chimiques à savoir la température ( $C^{\circ}$ ), les solides dissous totaux (TDS), le pH et la conductivité électrique (CE), ont été mesurés in situ directement après la procédure d'échantillonnage.

### 3.3. Analyses des éléments chimiques

La plupart des analyses chimiques des échantillons telles que les cations et les anions c'est-à-dire sodium ( $Na^{+}$ ), potassium ( $K^{+}$ ), calcium ( $Ca^{2+}$ ), magnésium ( $Mg^{2+}$ ), chlorure ( $Cl^{-}$ ), sulfate ( $SO_4^{2-}$ ), bicarbonate ( $HCO_3^{-}$ ), phosphate ( $PO_4^{3-}$ ) et nitrate ( $NO_3^{-}$ ), ont été effectuées par chromatographie ionique (Metrohm 850 Professional IC) au niveau du laboratoire d'analyse chimique de l'ADE de Bechar. L'alcalinité en tant que  $HCO_3^{-}$  du titre alcalimétrique (TA, TAC) a été mesurée en utilisant la méthode de titrage et la précision analytique de la mesure des ions est déterminée en calculant l'erreur absolue à l'équilibre ionique, qui ne dépasse pas dans tous les échantillons la limite standard ( $\pm 5\%$ ). Les teneurs en TDS ont été estimées sur la base des mesures de conductivité et de la somme du total des solutés dissous analysés. Les résultats des analyses de la campagne 2018 sont présentés dans le tableau V.2:

**Tableau V.2 :** Paramètres physico-chimiques des forages (campagne 2018)

Nom	Temp.	pH	Cond. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	RS	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>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Balance %
Piezo 1 ouakda	14,94	7,51	1 442	1 166	90	90	118	3	202	312	166	39	4,84
MOSQUE ELHODA P	12,10	7,3	1 851	1 404	126	88	143	1	230	361	201	48	4,41
BECHAR F5	19,26	7,34	926	713	85	36	73	1	139	82	225	14	4,14
Forage 20 km	18,18	7,52	923	713	72	36	80	2	134	120	176	7	3,98
PZ 03	15,48	7,66	970	745	54	42	91	2	144	103	171	18	4,11
Ouakda hycobar 3	17,64	7,37	872	734	87	36	70	2	115	133	207	19	3,27
PZ 02	16,02	5,55	31 889	21 600	24	577	528	3	753	367	54	25	2,05
PZ 04	16,56	7,37	961	745	93	24	83	2	149	80	193	26	4,26
Forage 14 km	17,10	7,54	1 210	929	71	50	127	1	269	82	179	33	1,67
Mebarki el hassan	11,50	7,47	2 519	1 922	100	101	282	1	413	488	184	22	0,78
MERIJA P3	11,20	7,65	1 483	1 123	76	67	146	1	302	168	139	24	3,09
hassi equilibre 2	13,50	7,8	3 978	2 700	135	117	472	7	833	1 020	134	15	3,86
boukais 2	18,72	7,37	1 463	971	97	63	9	1	231	210	252	3	4,20
p 1 Laameur	13,70	8,22	1 051	677	70	56	15	2	84	183	83	39	3,61
P4 SAFSSIFA	14,40	7,13	854	571	71	61	19	5	58	88	274	42	4,66
p 1 Boukais	12,90	7,71	1 113	743	92	53	15	1	114	162	305	15	2,03

### 3.4. Définition d'une norme

Les normes contiennent des spécifications techniques ou d'autres critères précis conçus pour être utilisés de manière cohérente en tant que règle, ligne directrice ou définition. Elles contribuent à simplifier la vie et à accroître la fiabilité et l'efficacité de nombreux produits et services que nous utilisons (Hoffamn *et al.*, 2014).

Selon l'OMS, qu'elle soit utilisée à des fins de consommation, de production alimentaire, d'irrigation ou d'utilité domestique, l'eau a un impact important sur la santé. C'est pour cela que l'OMS et d'autres organisations internationales et nationales dont l'Algérie (Décret exécutif n°11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine) ont établi des normes relatives à la qualité de l'eau (Tab. V.3).

**Tableau V.3** : Normes algériennes et normes de l'OMS (OMS ,2011).

Paramètre	Unités	Normes algériennes 2011	Normes OMS 2011
<b>Ph</b>	-	6,5-8,5	6,5-8,5
<b>conductivité</b>	µS/cm	2800	1400
<b>salinité</b>	PPT	-	100
<b>TDS</b>	mg/l	1500	1500
<b>turbidité</b>	NTU	5	5
<b>TA</b>	mg/l	-	-
<b>TAC</b>	mg/l	500	500
<b>TH (dureté totale)</b>	mg/l	200	500
<b>Na<sup>++</sup></b>	mg/l	200	200 - 400
<b>Ca<sup>++</sup></b>	mg/l	200	75 -200
<b>Mg<sup>++</sup></b>	mg/l	150	30 -150
<b>K<sup>+</sup></b>	mg/l	12	12
<b>Cl<sup>-</sup></b>	mg/l	500	200 - 600
<b>CO3</b>	mg/l	-	-
<b>HCO3</b>	mg/l	-	150-350
<b>CACo3</b>	mg/l	500	200
<b>Nitrites(NO2)</b>	mg/l	0,1	1
<b>Ammonium NH4</b>	mg/l	0,5	1,5-35
<b>Phosphores P</b>	mg/l	5	5
<b>Fer</b>	mg/l	0,3	1
<b>Sulfates SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	mg/l	400	200-400
<b>Nitrates NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	mg/l	50	50
<b>températures</b>	°C	25	
<b>résidu sec RS</b>	mg/l	1500	

#### 4. Étude des résultats des analyses chimiques

Les résultats de l'analyse physico-chimiques des eaux de la nappe du Turonien et l'étude de la base de données collectées ont révélé une hétérogénéité des concentrations des paramètres chimiques. Pour mieux comprendre l'origine et les facteurs qui influencent cette hétérogénéité, deux traitements de données ont été réalisés :

- un traitement statistique, présentant les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types, comparés aux normes de potabilité et d'irrigation,
- une projection cartographique des paramètres chimiques étudiés.

##### 4.1. Étude statistique

###### 4.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux (mesure *in situ*)

A partir de la campagne d'échantillonnage, nous avons constaté que la majorité des forages et des puits de la zone d'étude sont destinés à l'alimentation en eau potable et à

l'irrigation. Durant la phase d'échantillonnage, nous avons réalisé des mesures in situ de la température, de la conductivité électrique et du potentiel d'hydrogène (PH). Les autres paramètres ont été mesurés au laboratoire de l'ADE de Bechar.

#### a. La température de l'eau

La température de l'eau est un des paramètres environnementaux essentiels lors de l'évaluation de la qualité de l'eau (Sarda *et al.*, 2014) puisqu'elle permet de déterminer si une masse d'eau est propre à la consommation et à l'utilisation humaine, en raison de son influence sur l'altération des caractéristiques de l'eau telle que les propriétés chimiques, biologiques et physiques et leurs répercussions sur la santé.

**Tableau V.4 :** variation de la température pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max	12,70	19,05	13,70	19,26
	Min	9,25	13,81	11,20	14,40
	Moy.	10,69	16,46	12,48	16,83
	Ecart type	1,32	1,92	1,04	1,63
	normes	25 °C			

Selon le tableau V.4, on constate que les températures de la majorité des eaux souterraines de moyenne à forte profondeur (puits et forages) sont inférieures à la norme de potabilité (25°C). La température des eaux profondes la plus basse est de 13.81°C enregistrée en 2013 tandis que la plus forte est de 19,26°C pour 2018. Pour la moyenne profondeur, la température la plus basse est de 12,70°C (2013) tandis que la plus forte est de 13,70°C (2018). Les points d'eau de moyenne profondeur de la nappe Turonienne (entre 28 et 45 m au niveau des puits contrôlés), montrent une fluctuation entre les deux campagnes d'échantillonnage (2013 et 2018) avec une augmentation constante des températures au fil des deux années enregistrées, qui peut s'expliquer par l'augmentation proportionnelle des températures atmosphériques qui affecte directement les eaux souterraines de moyenne profondeur. Le tableau V.4 montre également que l'écart type varie pour les deux campagnes de 1.32°C (2013) et 1.63 °C (2018). En revanche, nous notons que pour les deux campagnes, les eaux de moyenne profondeur sont davantage influencées par la fluctuation et l'augmentation des températures atmosphériques ; et l'écart type varie respectivement de 1.32 et 1.04°C pour 2013 et 2018.

### b. La conductivité électrique

C'est un indicateur important pour l'évaluation de la qualité de l'eau parce qu'elle est directement influencée par la composition des sels minéraux dissouts dans les eaux souterraines (Aldahaan *et al.*, 2016). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant

**:Tableau V.5 :** variation de la conductivité pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	2 830,00	35 830,00	3 978,00	31 888,70
	Min.	1 024,00	980,00	1 051,20	854,00
	Moy.	1 960,00	4 933,00	1 999,14	4 150,99
	Ecart type	669,22	11 586,95	1 109,79	9 748,67
	normes	< 2800 $\mu\text{S/cm}$ ( Norme Algérienne ) / < 1400 $\mu\text{S/cm}$ ( OMS, 2011 )			

Selon les résultats obtenus (Tab.V.5), on relève des valeurs moyennes de conductivité (1960,00 et 1999,14  $\mu\text{S/cm}$ ) des points d'eau de moyenne profondeur pour les campagnes (2013 et 2018) respectivement inférieures aux normes algériennes (2800  $\mu\text{S/cm}$ ) relatives aux eaux destinées à l'AEP. En revanche, les valeurs maximales enregistrées au niveau des points d'eau de grande profondeur (35 830.00 et 31 888.70  $\mu\text{S/cm}$ ) excèdent largement les normes, ce qui indique un enrichissement de l'eau par les sels. La valeur de la conductivité électrique peut être un indice approximatif de la teneur totale en substance dissoute dans l'eau. Cela dépend de la température, de la concentration et des types d'ions présents. Mais les valeurs moyennes des eaux de grandes profondeurs sont inférieures aux valeurs moyennes des points d'eau de moyennes profondeurs.

### c. La minéralisation totale de l'eau

La dissolution d'un minéral dans l'eau peut être décrite par un état d'équilibre : quand l'eau est en contact avec un minéral, la concentration de la solution augmente pour atteindre un maximum pour des conditions physico-chimiques données (Ghalib *et al.*, 2016). La minéralisation des eaux souterraines de la nappe du Turonien a été calculée sur la base de la conductivité électrique mesurée. Les résultats et leurs traitements statistiques figurent dans le tableau suivant (Tab. V.6):



**Tableau V.6 :** variation de la minéralisation pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	1 755,00	5 225,00	2 513,00	5 264,02
	Min.	635,00	615,00	682,00	516,00
	Moy.	1 215,40	1 182,44	1 339,36	1 198,76
	Ecart type	415,01	1 517,54	708,75	1 436,09
	normes	< 2800 µS/cm ( Norme Algérienne ) / < 1400 µS/cm ( OMS ,2011 )			

La classification des eaux souterraines se fait en 5 classes selon leur utilisation préférentielle :

- eau très peu minéralisée (< 250 mg/l), utile pour la fabrication de vapeur mais ne pouvant convenir à la distribution publique sans un apport de sel dissous ;
- eau peu minéralisée (250 à 500 mg/l), utilisée par l'industrie et pouvant servir à la distribution publique d'eau potable (AEP) ;
- eau normalement minéralisée (500 mg/l à 1 g/l), correspondant aux normes des eaux potables ;
- eau non conforme aux normes de potabilité (1 à 2 g/l) mais pouvant être utilisée pour l'irrigation et l'abreuvement des animaux ;
- eau très salée (>2 g/l) impropre en dehors d'un usage thermal.

Dans le cas de notre zone d'étude, nous avons appliqué cette classification ; le tableau V.7 résume les résultats des deux campagnes :

**Tableau V.7 :** Classement de la minéralisation des eaux de la nappe Turonienne pendant le suivi (2013 et 2018)

Classes (g/l)	Les eaux souterraines			
	Campagne 2013		Campagne 2018	
0.0 à 0.25	0	0 %	0	0 %
0.25 à 0.5	0	0 %	0	0 %
0.5 à 1.00	9	60 %	10	62,5 %
1.00 à 2	5	33 %	4	25 %
>2	1	7 %	2	12,5 %
<b>totale</b>	15	100 %	16	100 %

Le tableau montre que près de 7 % des eaux souterraines de la campagne 2013 sont caractérisés par une minéralisation supérieure à 2 g/l et 60 % des eaux sont normalement minéralisés (0.5 a 1g/l). Pour la campagne 2018, plus de 62 % des eaux sont normalement minéralisés et une augmentation légère des eaux très salées (12.5 %)

**d.Salinité, TDS (Total Dissolved Sels)**

La salinité est la concentration totale de tous les sels dissous dans l'eau. Ces électrolytes forment des particules ioniques en se dissolvant, chacune avec une charge positive et négative. En tant que telle, la salinité contribue fortement à la conductivité (Yalçınkaya *et al.*, 2016). Bien que la salinité puisse être mesurée par une analyse chimique complète, les solides dissous totaux (TDS) combinent la somme de toutes les particules ioniques qui sont inférieures à 2 microns (0,0002 cm). Cela comprend tous les électrolytes dissociés qui constituent les concentrations de salinité, ainsi que d'autres composés tels que la matière organique dissoute. Dans l'eau «propre», le TDS est approximativement égal à la salinité. Dans les eaux usées ou les zones polluées, le TDS peut inclure des solutés organiques (tels que les hydrocarbures et l'urée) en plus des ions sel (Corwin *et al.*, 2017), alors que les mesures du TDS sont dérivées de la conductivité. Les deux paramètres (salinité et TDS) sont directement liés à la minéralisation des eaux. Les tableaux qui suivent présentent les résultats des eaux souterraines de la zone d'étude :

**Tableau V.8 :** variation de la salinité pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	1,97	1,86	1,99	2,84
	Min.	0,67	0,63	0,63	0,60
	Moy.	1,27	0,83	1,30	1,04
	Ecart type	0,48	0,39	0,56	0,66
	normes				

**Tableau V.9 :** Variation de TDS pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	1 782,00	1 720,00	2 755,00	1 962,00
	Min.	701,00	642,00	553,00	651,00
	Moy.	1 236,80	949,67	1 329,17	969,00
	Ecart type	404,86	475,27	785,12	383,83
	normes	< 1500 mg/l ( Norme algérienne ) / < 1500 mg/l ( OMS,2011 )			

La salinité des eaux de la zone d'étude (Tab.V.8) augmente au fil des années, les plus fortes concentrations ont été enregistrées dans les points d'eau de moyenne profondeur avec un maximum de 1.99 g/l enregistré en 2018. Les eaux de grande profondeur sont plus douces.

Dans le tableau V.9, on observe que les valeurs de TDS varient d'un point de vue temporel selon les mêmes tendances que la salinité. Les valeurs moyennes de TDS pour les eaux de moyenne profondeur sont respectivement de 1236.80 et 1329.17 mg/l, Par contre, les valeurs moyennes pour les eaux de grande profondeur diminuent et sont caractérisées par de faibles teneurs par rapport aux normes en vigueur.

#### *e. Le potentiel hydrogène de l'eau (pH)*

Le pH est une unité de mesure qui décrit le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une solution. Il est mesuré sur une échelle de 0 à 14. Le terme pH est dérivé de «p», le symbole mathématique pour le logarithme négatif, est «H», le symbole chimique pour l'hydrogène. La définition formelle du pH est: le logarithme négatif de l'activité des ions hydrogène\_(Pye *et al.*, 2020).

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

La valeur du pH d'une substance est directement liée au rapport des concentrations d'ions hydrogène  $[\text{H}^+]$  et d'ions hydroxyle  $[\text{OH}^-]$ . Si la concentration en  $\text{H}^+$  est supérieure à l' $\text{OH}^-$ , le matériau est acide; c'est-à-dire que la valeur du pH est inférieure à 7. Si la concentration en  $\text{OH}^-$  est supérieure à son  $\text{H}^+$ , le matériau est basique, avec une valeur de pH supérieure à 7. Si un nombre égal d'ions  $\text{H}^+$  et  $\text{OH}^-$  est présent, le matériau est neutre, avec un pH de 7.

Les valeurs du pH mesurées dans la zone d'étude pour les deux campagnes, sont illustrées dans le tableau suivant :

**Tableau V.10 :** variation de PH pendant le suivi (2013 et 2018 )

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	7,57	7,74	8,22	7,66
	Min.	7,46	4,55	7,30	5,55
	Moy.	7,52	7,10	7,69	7,24
	Ecart type	0,05	0,99	0,31	0,61
	normes	6,5-8,5( Norme Algérienne ) / 6,5-8,5 ( OMS,2011 )			

Selon les résultats illustrés dans le tableau V.10, on remarque que la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude sont compris dans l'intervalle de potabilité recommandé par la norme algérienne ainsi que de celle de l'OMS (2011).

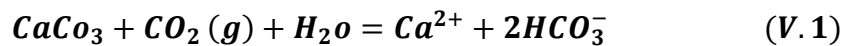
On constate aussi que le PH varie entre les eaux des points de moyenne et de grandes profondeurs qui sont caractérisés par des valeurs inférieures aux points de moyenne profondeur due à la couverture alluvionnaire (sableuse et argileuse) qui forme une isolation contre d'éventuels polluants.

#### 4.1.2. Sels dissous

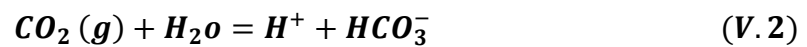
##### 4.1.2.1. Les éléments majeurs

###### a. Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

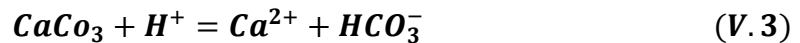
L'ion  $\text{Ca}^{2+}$  est dérivé de l'altération de minéraux contenant dans de nombreux types de roches différents, y compris la plupart des roches sédimentaires, et même certaines roches ignées et métamorphiques, la chimie des carbonates est pertinente pour l'évolution de la plupart des eaux souterraines. Le mécanisme de dissolution principale de la calcite est représenté par l'équation suivante (Ng et al., 2001):



Cette réaction comprend l'étape suivante:



Qui représente la réaction du dioxyde de carbone avec l'eau, pour produire les ions hydrogène (conditions acides) qui favorisent la dissolution de la calcite par la réaction suivante:



Les valeurs de calcium  $\text{Ca}^{2+}$  obtenus pendant les deux campagnes d'échantillonnage sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau V.11** : variation de  $\text{Ca}^{2+}$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	103,00	82,00	135,00	97,00
	Min.	62,00	20,00	69,60	24,40
	Moy.	80,80	59,11	99,66	74,44
	Ecart type	15,83	18,27	26,32	22,01
	normes	200 (Norme Algérienne) / 75- 200 ( OMS,2011 )			

A partir de ce tableau (Tab.V.11), on constate que tous les points d'eau de la zone d'étude présentent des concentrations maximales de calcium  $\text{Ca}^{2+}$  inférieurs à la norme algérienne relative aux eaux potables. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les points d'eau de moyenne profondeur (103 et 135mg/l) due à la dissolution des lentilles gypseuses existant dans le réservoir aquifère. En revanche, les forages de grandes profondeurs sont caractérisés par une faible concentration en calcium causée par la faible influence de la dissolution des formations carbonatées et gypseuses.

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

Le Magnésium dans les eaux souterraines dérive de la décomposition de la dolomite, des minéraux ferromagnésiens comme l'olivine, le pyroxène, les amphiboles et les micas de

couleur foncée. Dans les roches métamorphiques, le magnésium se trouve dans la structure du chlorite, de la montmorillonite et de la serpentine (Nag et al., 2009). La réaction impliquant une solution de magnésium est influencée par la quantité de CO<sub>2</sub> dans les eaux souterraines à l'état dissous.

Les valeurs de magnésium  $Mg^{+2}$  obtenus pendant les deux campagnes d'échantillonnage sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau V.12 :** variation de  $Mg^{2+}$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	663,00	116,00	576,81	117,00
	Min.	28,00	39,00	24,36	53,00
	Moy.	109,44	84,20	101,33	80,31
	Ecart type	207,76	29,17	168,12	25,84
	normes	150 (Norme Algérienne) / 30 - 150 (OMS,2011)			

La majorité des points d'eau ont enregistré des concentrations en magnésium inférieurs à la norme de potabilité (Tab. V.12). On observe également des valeurs plus faibles en magnésium enregistrées pour les points de grande profondeur avec des moyennes égales à (84.20 et 80.31 mg/l) pour les deux campagnes respectives. La valeur maximale entre les deux campagnes est de 663 mg/l enregistrée durant l'année 2013.

### c. sodium ( $Na^+$ )

Le sodium dans les eaux souterraines peut provenir de l'altération des minérales halites et silicate comme le feldspath. Les sous-produits agricoles pourraient être les autres sources de teneur en sodium des eaux souterraines dans la zone d'étude (Hem, 1989). les valeurs de sodium ( $Na^+$ ) dans la zone d'étude sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau V.13 :** variation de  $Na^+$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	310,00	579,75	472,00	527,50
	Min.	80,00	77,00	14,80	9,10
	Moy.	187,50	148,42	178,81	119,77
	Ecart type	86,64	162,79	174,77	148,04
	normes	200 (Norme Algérienne) / 200 - 400 (OMS ,2011)			

Les résultats du tableau ci-dessus (Tab. V.13) montrent que toutes les moyennes des points d'eau ne dépassent pas la norme de potabilité en  $Na^+$  (200 mg/l), sauf pour quelques points d'eau qui enregistrent des valeurs hors normes, particulièrement pour les points de

grande profondeur (579.75 et 527.50mg/l) et qui pourrait être dû à la dissolution rapide des formations évaporitiques riches en halite.

#### d. Potassium ( $K^+$ )

Le potassium résulte de la décomposition chimique de la sylvite (KCl) et des silicates, en particulier des minéraux argileux (Santos *et al.*, 2016). Le potassium peut être ajouté aux eaux souterraines par l'utilisation d'engrais et la dégradation des produits animaux ou des déchets (Kolahchi *et al.*, 2007). Les résultats de sodium ( $K^+$ ) dans la zone d'étude sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.14 :** Variation de  $K^+$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	7,10	5,50	7,09	5,42
	Min.	0,90	1,00	0,79	0,72
	Moy.	2,36	2,19	2,64	2,18
	Ecart type	2,66	1,36	2,31	1,42
	normes	12(Norme Algérienne) / 12 (OMS, 2011)			

A partir de tableau V.14, on constate que toutes les concentrations moyennes et maximales en potassium ( $K^+$ ) des deux campagnes ne dépassent pas la norme algérienne de potabilité (2.36 et 2.64 mg/l). La concentration maximale enregistrée pour 2013 est de 7.10 mg/l, tandis que la teneur minimale en  $K^+$  est de 0.72 mg/L enregistrée en 2018.

#### e. Chlorides ( $Cl^-$ )

Les chlorures se trouvent dans l'eau naturelle en raison du lessivage des roches contenant du chlorure et des rejets des sols d'effluents des industries chimiques, de l'évacuation des eaux usées et du drainage d'irrigation. Une concentration plus élevée de chlorure est nocive pour le cœur et les reins des personnes, l'indigestion, le goût, l'appétence et la corrosion sont également affectés (Saghravani *et al.*, 2014). Les valeurs de chlorides ( $Cl^-$ ) dans la zone d'étude sont résumées dans le tableau V.15:

**Tableau V.15 :** variation de  $Cl^-$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	470,00	780,00	833,00	753,30
	Min.	155,00	120,00	84,10	58,20
	Moy.	322,00	225,56	329,45	219,45
	Ecart type	130,60	213,39	274,83	196,95
	normes	500 (Norme Algérienne) / 200 (OMS, 2011)			

### f. Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

La présence de sulfate dans les eaux souterraines résulte de l'oxydation du soufre des roches ignées et de la dissolution des autres minéraux soufrés. Les roches sédimentaires, comme le schiste organique, peuvent jouer un rôle clé à cet égard par l'oxydation de la marcasite et de la pyrite (Matthess, 1982). Les concentrations de Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans la zone d'étude sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau V.16** : variation de  $\text{SO}_4^{2-}$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	595,00	420,00	1 020,00	367,40
	Min.	60,00	98,00	161,50	80,36
	Moy.	308,00	153,11	396,88	157,76
	Ecart type	210,08	101,62	332,07	104,18
	normes	400 (Norme Algérienne) / 200-400 (OMS, 2011)			

La majorité des valeurs maximales des points d'eau dépassent la norme maximale de potabilité pour les sulfates qui est 400 mg/l recommandé par la norme nationale ainsi que la norme internationale (OMS 2011) (Tab.V.16). Cette forte concentration peut être liée à la dissolution des formations gypseuses qui se trouvent au pied des montagnes Antar et Horreit dans le Nord de la zone d'étude, tandis que la valeur moyenne de concentration de sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) reste inférieure à la norme de potabilité pour les deux campagnes.

### g. Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

Les sources possibles de bicarbonate comprennent la présence de matière organique dans l'aquifère qui est oxydée pour produire du dioxyde de carbone, ce qui favorise la dissolution des minéraux (Khashogji et al., 2013). Le carbone fossile de la calcite et de la dolomite dans l'aquifère fournirait la moitié des ions bicarbonate. Cette altération enrichit les eaux souterraines en ions calcium, magnésium et bicarbonate. Les ions bicarbonate peuvent résulter de l'altération des minéraux silicatés (Gastmans et al., 2010). Les concentrations de Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans la zone d'étude sont résumées dans le tableau V.17:

**Tableau V.17** : variation de  $\text{HCO}_3^-$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	244,00	253,00	304,70	273,70
	Min.	156,00	61,00	83,10	54,29
	Moy.	206,80	186,11	174,34	189,66
	Ecart type	33,04	53,80	76,19	59,73
	normes	-( Norme Algérienne ) / 150-350 (OMS,2011 )			

Les résultats ci-dessus montrent que tous les points d'eau enregistrent des concentrations en bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$  dans l'intervalle de potabilité. Les valeurs maximales sont observées dans les points d'eau de moyenne profondeur, beaucoup plus influencée par les minéraux proches de la surface. On observe aussi une augmentation des concentrations moyennes au fil des années sauf pour la valeur moyenne des points de faible profondeur enregistrée en 2018, où on remarque une diminution des concentrations en bicarbonates qui s'expliquerait par l'insuffisance de la dissolution des minéraux.

#### h. Nitrates $\text{NO}_3^-$

Le nitrate est soluble, très mobile et peut être lessivé de la zone non saturée aux eaux souterraines (Green et al. 2008). L'augmentation excessive de l'utilisation d'engrais azotés (engrais azotés synthétiques et fumier organique) au cours des dernières décennies a entraîné une augmentation de la lixiviation des nitrates, qui menacent la qualité de l'eau, en particulier dans les zones agricoles. De plus, il a été démontré que les sources ponctuelles d'azote, telles que les rejets d'assainissement le long des cours d'eau et fosses septiques, contribuent à la pollution par les nitrates des eaux souterraines (Mac Quarrie et al.2011). Les concentrations des nitrates  $\text{NO}_3^-$  dans la zone d'étude sont résumés dans le tableau V.18:

**Tableau V.18** : variation de  $\text{NO}_3^-$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	50,00	34,00	48,00	42,10
	Min.	20,00	7,00	14,70	3,10
	Moy.	28,60	19,11	27,15	22,66
	Ecart type	12,14	8,64	13,53	12,95
	normes	50 (Norme Algérienne) / 50 ( OMS,2011 )			



Les eaux souterraines de la zone d'étude sont caractérisées par des concentrations moyennes inférieures aux seuils nationaux et internationaux recommandés. Les teneurs maximales des nitrates sont enregistrées dans les points de moyenne profondeur à cause de la faible distance entre la surface et les points de grande profondeur.

#### i. Les nitrites $\text{NO}_2^-$

Le nitrite est un produit intermédiaire de l'oxydation de l'ammoniac en nitrate. Les nitrites sont toxiques, la toxicité des nitrites augmente avec le pH et diminue avec la salinité. Un taux élevé de nitrite perturbe le transport de l'oxygène, réduit la croissance, supprime la réponse immunitaire et augmente la mortalité (Ciji *et al.*, 2019). Le nitrite devrait être proche de 0 mg/l. L'analyse de la campagne 2018 montre que les valeurs de nitrites dans la zone d'étude varient entre 2.1 mg/l dans le point d'eau « Ouakda hycobar3 » et 0.003 mg/l à « Hassi équilibre » situé au centre de la zone d'étude. La valeur moyenne de nitrite (0.032 mg/l) est inférieure à la norme nationale de potabilité.

#### j. L'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )

Le cation ammonium est un cation polyatomique chargé positivement avec la formule chimique  $\text{NH}_4^+$ . Il est formé par la protonation de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) (Nakai *et al.*, 2000). Les valeurs d'ammonium dans la zone d'étude varient de 0.02 mg/l dans le point d'eau « Ouakda hycobar 3 » à 0.003 mg/l à « hassi équilibre ».

#### 4.1.2.2.Éléments mineurs naturels

a. **Silicium ( $\text{Si}^{+2}$ )** : La silice dans les eaux souterraines provient exclusivement de l'interaction eau-roche. L'eau souterraine en circulation dissout la silice issue de l'altération chimique des minéraux silicatés (argiles, formations métamorphiques) dans les roches et les sédiments (Dobrzynski *et al.*, 2005). Les concentrations de silicium  $\text{Si}^{+2}$  dans la zone d'étude sont résumées dans le tableau V.19 :

**Tableau V.19** : variation de  $\text{Si}^{+2}$  pendant le suivi (2013 et 2018)

		Les eaux souterraines			
		Campagne 2013		Campagne 2018	
		Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)	Puits de moyenne profondeur	Forages de grandes Profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max.	17,00	18,00	18,86	30,86
	Min.	8,50	1,50	9,88	2,57
	Moy.	11,11	9,77	14,40	15,78
	Ecart type	3,42	4,52	3,24	7,40
	normes	50 (Norme Algérienne) / 50 (OMS,2011)			

Les concentrations de silicium ( $\text{Si}^{+2}$ ) évoluent au fil du temps ; en 2013, on constate que les fortes concentrations sont enregistrées dans les eaux de moyenne profondeur avec une valeur moyenne égale à 11.11 mg/l contrairement à 9.77 mg/l pour les eaux de grande profondeur. En 2018, le silicium change, on enregistre de fortes concentrations dans les eaux de grande profondeur avec une valeur moyenne de 15.78 mg/l, qui correspond à l'abaissement des niveaux souterrains ; ce qui peut avoir contribué à la dissolution des couches d'origine carbonatés (calcaire).

#### b. Phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Le phosphore est un produit chimique couramment trouvé dans le sol, les roches et les plantes. C'est un nutriment essentiel pour la croissance des plantes et un engrais important dans la production agricole, de plus, il est largement utilisé en milieu urbain (Malhotra *et al*, 2018) et retrouvé dans les déchets humains et animaux, dans les boues et dans les détergents. Par conséquent, les concentrations dans de nombreux sols sont donc susceptibles d'être considérablement plus élevées que dans des conditions naturelles.

Selon la dernière campagne d'échantillonnage 2018, on peut constater que les concentrations en phosphate figurent au dessous de la norme, les valeurs varient de 0.01 mg/l à (3.72 mg/l) enregistrées respectivement à « Bechar mosquée El-Houda » et le piézomètre 03 de Ouakda et la valeur moyenne dans la zone d'étude est de 0.52 mg/l.

### 4.2- Faciès chimique

Le tableau V.20 reporte le type des faciès chimiques retrouvés dans la zone d'étude en fonction des campagnes :

#### 4.2.1- Eaux des forages

**Tableau V.20 :** les types des faciès chimiques dans la zone d'étude en fonction des campagnes

Campagne	Chlorurée sodique (%)	Chlorurée calcique (%)	Chlorurée magnésienne (%)	Sulfaté sodique (%)	Sulfaté magnésienne (%)	Bicarbonatée sodique (%)	Bicarbonatée calcique (%)	Bicarbonatée magnésienne (%)
2013	66,67	6,67	/	/	13,33	/	13,33	/
2018	31,25	18,75	12,5	/	18,75	/	12,5	6,25

#### 4.2.1.1. Interprétation des données chimiques

##### a. Formule ionique

Afin d'établir un diagnostic de la qualité de l'eau, nous avons effectué une comparaison entre les différents résultats ioniques des échantillons réalisés au cours de la campagne, en utilisant les valeurs des cations et des anions dans la composition chimique

de ces échantillons et qui sont notés en mg/l pour chaque élément. Les résultats ont été convertis en milliéquivalents par litre pour calculer, par la suite, le pourcentage d'élément par rapport à la somme de l'échantillon. Pendant le processus de comparaison des ions, nous avons classé les quantités en pourcentage présenté à gauche et les ions et les cations à droite. Le tableau V.21 montre les résultats obtenus au cours du processus de comparaison pour la campagne de (2013), ce qui permet d'identifier des faciès chimiques pour tous les échantillons :

***Faciès chimiques pur la campagne 2013***

- Les forages PZ 02, Forage 14 km, Ouakda hycobar 4, PZ 4 Ancien hycobar, PZ03, PZ 04 et Forage 20 km Meridja P3, Meridja P2 et Meridja P1: faciès chlorurée sodique,
- Les forages Bechar F2 : faciès chlorurée calcique,
- Les forages Mosquée Elhouda P et PZ 01: faciès sulfatée magnésienne
- Les forages Bechar F5 et Ouakda hycobar 3: faciès bicarbonatée calcique

**Tableau V.21 :** Faciès chimiques des eaux des forages (campagne 2013).

forages	Quantité en réaction en (%)		Faciès chimiques
	anions	cations	
MERIJA P3	r Cl> r SO4 > r HCO3	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
MERIJA P2	r Cl> r SO4 > r HCO3	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
MERIJA P1	r Cl> r SO4 > r HCO3	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
MOSQUE ELHODA P	r SO4 > r Cl> r HCO3	r Mg > r ( Na + K ) > r Ca	Eau sulfatée magnésienne
BECHAR F5	r HCO3 > r Cl> r SO4	r Ca > r ( Na + K ) > r Mg	Eau bicarbonatée calcique
BECHAR F2	r Cl> r HCO3> r SO4	r Ca > r ( Na + K ) > r Mg	Eau chlorurée calcique
PZ 01	r SO4 > r Cl> r HCO3	r Mg > r ( Na + K ) > r Ca	Eau sulfatée magnésienne
Ouakda hycobar 3	r HCO3 > r Cl> r SO4	r Ca > r ( Na + K ) > r Mg	Eau bicarbonatée calcique
PZ 02	r Cl> r SO4 > r HCO3	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
Forage 14 km	r Cl> r HCO3> r SO4	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
Ouakda hycobar 4	r Cl> r HCO3> r SO4	r ( Na + K ) > r Ca > r Mg	Eau chlorurée sodique
PIEZO 4 ANCIEN HYCOBAR	r Cl> r HCO3> r SO4	r ( Na + K ) > r Ca > r Mg	Eau chlorurée sodique
PZ 03	r Cl> r HCO3> r SO4	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
PZ 04	r Cl> r HCO3> r SO4	r ( Na + K ) > r Ca > r Mg	Eau chlorurée sodique
Forage 20 km	r Cl> r HCO3> r SO4	r ( Na + K ) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique

Selon les résultats obtenus dans le tableau V.21, on peut distinguer quatre types d'eau: chlorurée calcique, chlorurée sodique, sulfatée magnésienne et bicarbonatée calcique.

➤ **Facies chimiques pour la campagne 2018**

- Les forages PZ 03, Forage 14 km, Mebarki el hassan, Meridja P3 hassi equilibre 2: faciès chlorurée sodique.
- Les forages Bechar F5, forage 20 km et PZ04 : faciès chlorurée calcique.
- Les forages Mosquée Elhouda P, Piezo 1 ouakda et p 1 Laameur: faciès sulfatée magnésienne.
- Les forages P1 Boukais et Ouakda hycobar 3: faciès bicarbonatée calcique.
- Les forages Boukais 2 et PZ 02 : faciès chlorurée magnésienne.
- le forage P4 SAFSSIFA : faciès bicarbonatée magnésienne.

**Tableau V.22 :** Faciès chimique des eaux des forages (campagne 2018).

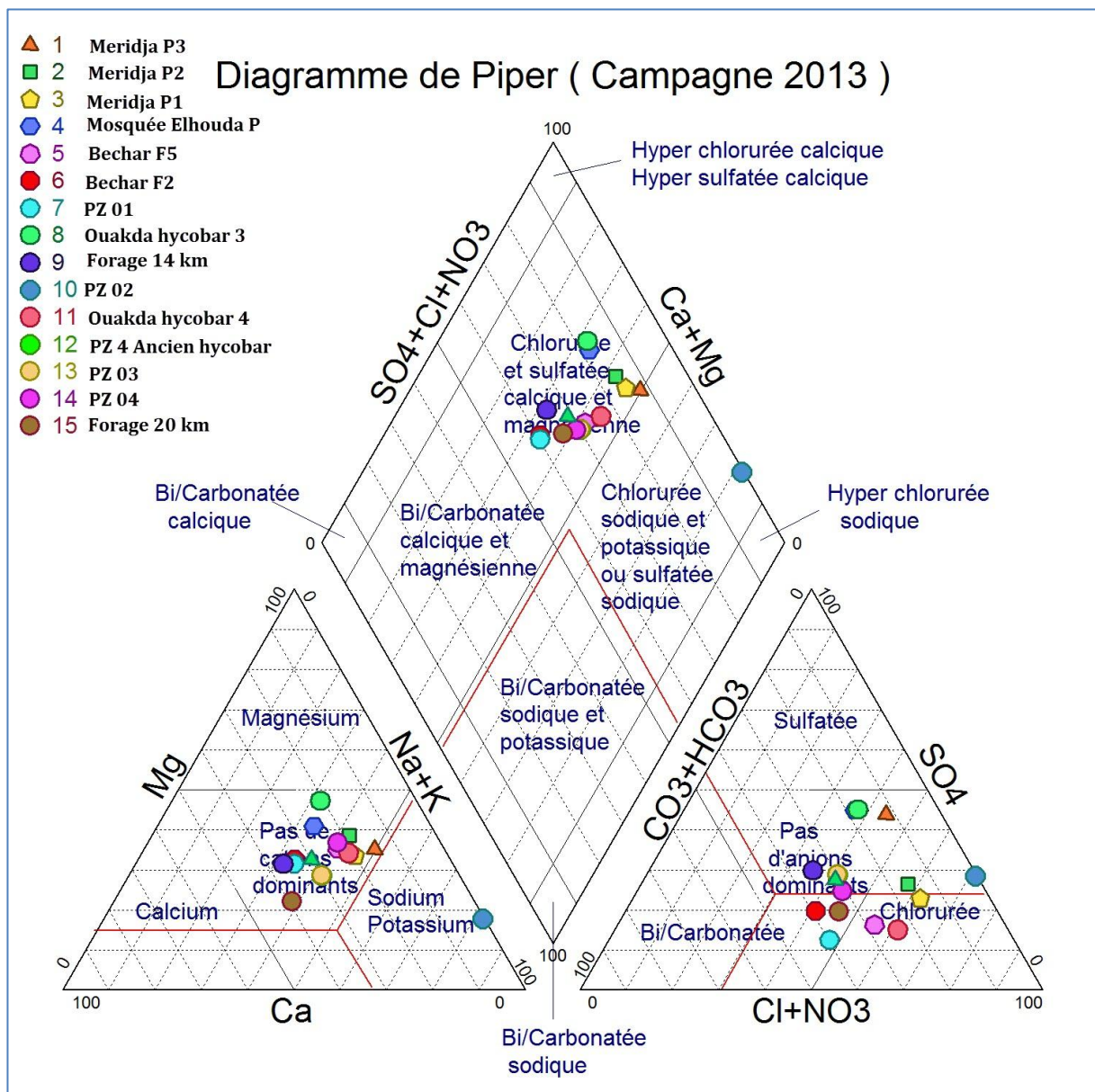
forages	Quantité en réaction en (%)		Facies chimiques
	anions	cations	
Piezo 1 ouakda	r SO <sub>4</sub> > r Cl > r HCO <sub>3</sub>	r Mg > r (Na+K) > r Ca	Eau sulfatée magnésienne
MOSQUE ELHODA P	r SO <sub>4</sub> > r Cl > r HCO <sub>3</sub>	r Mg > r Ca > r (Na+K)	Eau sulfatée magnésienne
BECHAR F5	r Cl > r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub>	r Ca > r (Na+K) > r Mg	Eau chlorurée calcique
Forage 20 km	r Cl > r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub>	r Ca > r (Na+K) > r Mg	Eau chlorurée calcique
PZ 03	r Cl > r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub>	r (Na+K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
Ouakda hycobar 3	r HCO <sub>3</sub> > r Cl > r SO <sub>4</sub>	r Ca > r (Na+K) > r Mg	Eau bicarbonatée calcique
PZ 02	r Cl > r SO <sub>4</sub> > r HCO <sub>3</sub>	r Mg > r (Na+K) > r Ca	Eau chlorurée magnésienne
PZ 04	r Cl > r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub>	r Ca > r (Na+K) > r Mg	Eau chlorurée calcique
Forage 14 km	r Cl > r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub>	r (Na+K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
Mebarki el hassan	r Cl > r SO <sub>4</sub> > r HCO <sub>3</sub>	r (Na+K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
MERIJA P3	r Cl > r SO <sub>4</sub> > r HCO <sub>3</sub>	r (Na+K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
hassiequilibre 2	r Cl > r SO <sub>4</sub> > r HCO <sub>3</sub>	r (Na+K) > r Mg > r Ca	Eau chlorurée sodique
boukais 2	r Cl > r SO <sub>4</sub> > r HCO <sub>3</sub>	r Mg > r Ca > r (Na+K)	Eau chlorurée magnésienne
p 1 Laameur	r SO <sub>4</sub> > r Cl > r HCO <sub>3</sub>	r Mg > r Ca > r (Na+K)	Eau sulfatée magnésienne
P4 SAFSSIFA	r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub> > r Cl	r Mg > r Ca > r (Na+K)	Eau bicarbonatée magnésienne
p 1 Boukais	r HCO <sub>3</sub> > r SO <sub>4</sub> > r Cl	r Ca > r Mg > r (Na+K)	Eau bicarbonatée calcique

Selon les résultats obtenus dans le tableau V.22, on note l'apparition des mêmes faciès chimiques qui sont apparus en 2013 en plus de l'émergence de deux nouveaux types d'eau (chlorurée magnésienne et bicarbonatée magnésienne).

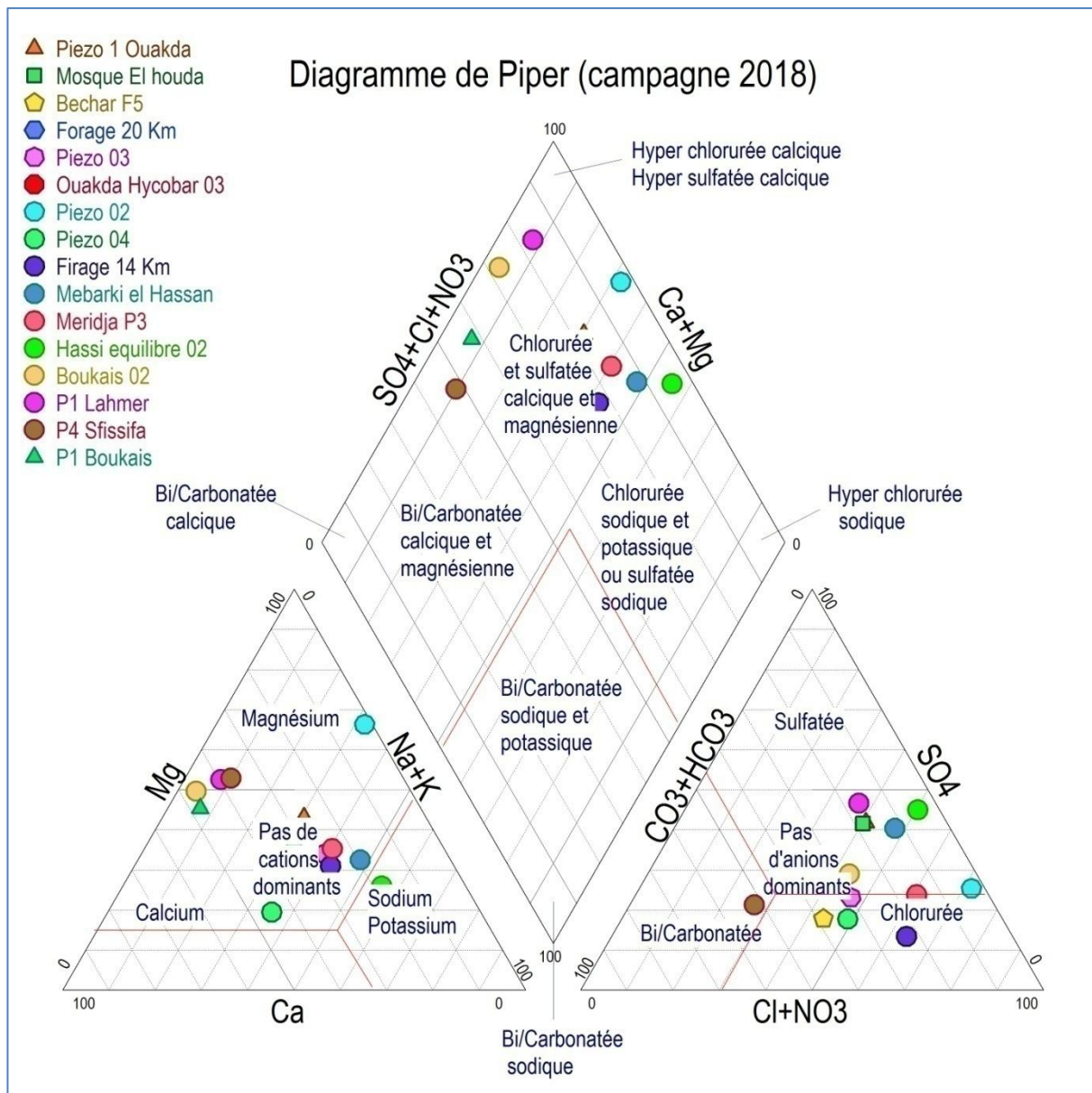
**b. Digramme de Piper (Fig. V.2 et, V.3)**

Afin de réaliser une représentation minérale des eaux souterraines de la nappe du Turonien (Kénadsa –Bechar), nous avons utilisé le Diagramme de Piper qui est composé de deux triangles et où, sur ces côtes droite et gauche, sont représentés les faciès cationiques, anioniques et un losange au centre, celui-ci illustre le faciès global de plusieurs échantillons d'eaux. Le logiciel DIAGRAMMES™ est développé par le laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon.

La représentation des données physico-chimiques de la campagne 2013 sur le diagramme de Piper montre que la majorité des échantillons sont de type Chlorurées et sulfatées calcique et magnésique, sauf le piézomètre 02 qui est de type chlorurée, sodique et potassique ou sulfatée sodique (Fig. V.2). Pour la campagne de 2018, on remarque la dominance des mêmes facies chimiques que ceux de 2013, sauf pour le P4 sfissifa qui se trouve dans la partie Bicarbonatée calcique et magnésienne (Fig. V.3).



**Figure V.2:**Diagramme triangulaire de Piper (campagne 2013)



**Figure V.3:**Diagramme triangulaire de Piper (campagne 2018)

#### 4.2.2. Interprétions des faciès chimiques

La représentation des points d'eau sur le diagramme de Piper illustre une variation des faciès chimiques dans la zone d'étude durant les deux campagnes :

➤ **L'année 2013**

Dans cette campagne d'échantillonnage, on observe deux points essentiels qui sont : la prédominance de faciès chlorurée sodique jusqu'à une proportion de 66.67%. L'émergence de ce faciès est dans la partie Ouest de la zone d'étude dans les deux points d'eau de la commune de Meridja (P1, P2 et P3), Cette émergence dans ces zones est due à une forte dissolution des formations évaporitiques riches en halite. Le deuxième faciès dominant est le faciès sulfaté magnésienne (13.33 %) résultant de la dissolution des calcaires dolomitiques qui correspond à l'aquifère. Le faciès bicarbonaté calcique (13.33%) qui est concentré dans la région d'Ouakda au Sud - est de la région étudiée, l'apparition de faciès dans cette zone est en raison de la dissolution des formations carbonatées bordant la nappe. Le faciès chloruré calcique (6.67%) ne se trouve que dans un seul point (BECHAR F2) concentré dans le centre de la zone d'étude, son apparition peut être expliquée par la présence des formations alluvionnaires salées de quaternaire et des marnes gypsifères.

➤ **L'année 2018**

Pour 2018, on peut voir un changement notable dans l'identité chimique des eaux de la région d'étude en comparaison avec la campagne précédente (2013), le faciès chlorurée sodique reste le faciès dominant mais avec une diminution de la proportion de 66.67% en 2013 à 31.25 % en 2018. Cette réduction peut être justifiée par la baisse du niveau statique à cause de la sécheresse et la surexploitation de la nappe la chose qui a provoqué une variation dans la relation de contact (eau + roche) et par conséquent, l'émergence des nouveaux faciès chimiques qui n'ont pas été, au préalable, enregistrés. Le faciès sulfaté magnésienne reste le second faciès dominant comparé à la campagne précédente avec une légère augmentation (18.75 %). La même portion a été enregistré pour le faciès chloruré calcique avancé au troisième rang dans cette nouvelle campagne. la quatrième dominance est partagé entre les deux faciès faciès bicarbonaté calcique et le faciès chloruré magnésien avec une portion équivalente égale à (12.5%). Le faciès chloruré magnésien peut être le résultat d'un mélange entre des eaux qui ont été en contact des évaporites comme l'halite et des eaux venant d'un environnement carbonatés comme les dolomies Le faciès Bicarbonaté magnésien est le nouveau faciès émergent de la campagne 2018 avec un rapport

de (6.25%) dans un seul point d'eau (PZ02), l'origine d'apparition de ce faciès provient généralement de la dissolution des calcaires.

Dans les triangles des cations et anions, il s'avère difficile de distinguer quel est le cation ou l'anion dominant, mais avec le diagramme de Piper, on note que les chlorites dominant beaucoup plus par rapport aux autres cations. Le faciès chloruré sodique est le faciès dominant sur les deux campagnes observées (voir tableaux V.21 et V.22) ainsi que pour toute la nappe. Il est issu de l'échange de base ou de l'enrichissement des eaux en sodium. L'apparition du faciès chlorure calcique peut s'expliquer par l'interaction géologique avec la dissolution des formations alluvionnaires. L'interaction entre les eaux et les formations composé de gypse et de l'halite, sont à l'origine de l'émergence des facies sulfatés, sodique et magnésienne, durant les deux années observée avec des proportions variées.

Le pôle carbonaté représenté par un faciès bicarbonaté sodique, calcique et magnésien, distribué sur les deux années, est le résultat de la formation de calcaires concentrés dans la partie Nord et Nord- est de la zone d'étude.

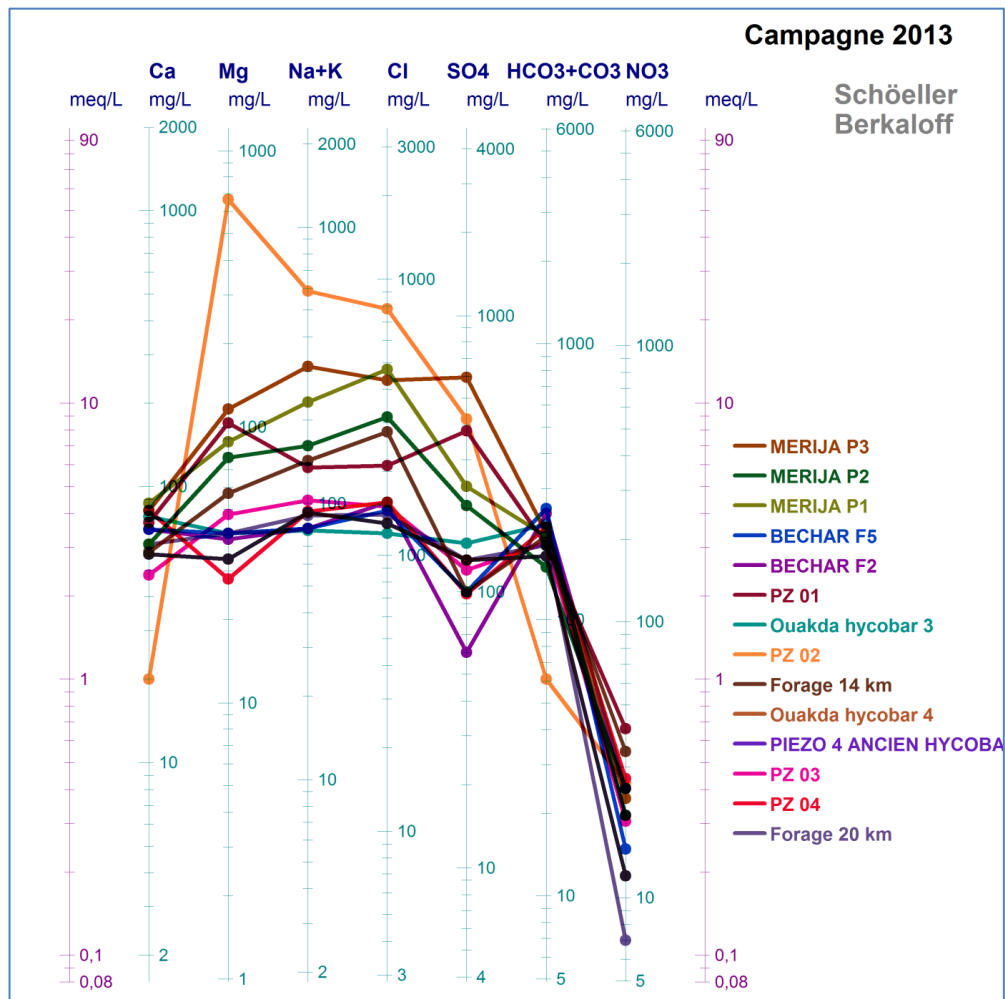
### **c. Diagramme de Schoeller-Berkaloff**

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Fig. V.4) est composé de plusieurs demi-droites verticales qui sont réparties de manière équidistante, et sur chacune d'elles un ion est représenté au moyen d'un segment proportionnel à sa concentration en meq/l, ppm ou %. Les différents points obtenus sont ensuite reliés par une polyligne. Lorsque les axes sont logarithmiques, il s'agit du diagramme de Schoeller-Berkaloff. Les concentrations absolues des éléments majeurs en meq/l sont utilisées afin de déterminer les différentes familles caractérisant les eaux souterraines du système aquifère étudié. Généralement les colonnes sont représentées, de gauche à droite: Ca, Mg, Na+K, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>. L'inclinaison de la ligne joignant les points représentatifs des deux ions mesure sa relation en utilisant le logiciel DIAGRAMMES™. Les analyses chimiques de la zone d'étude pour les deux campagnes observés sont données en figure V.4 et V.5.

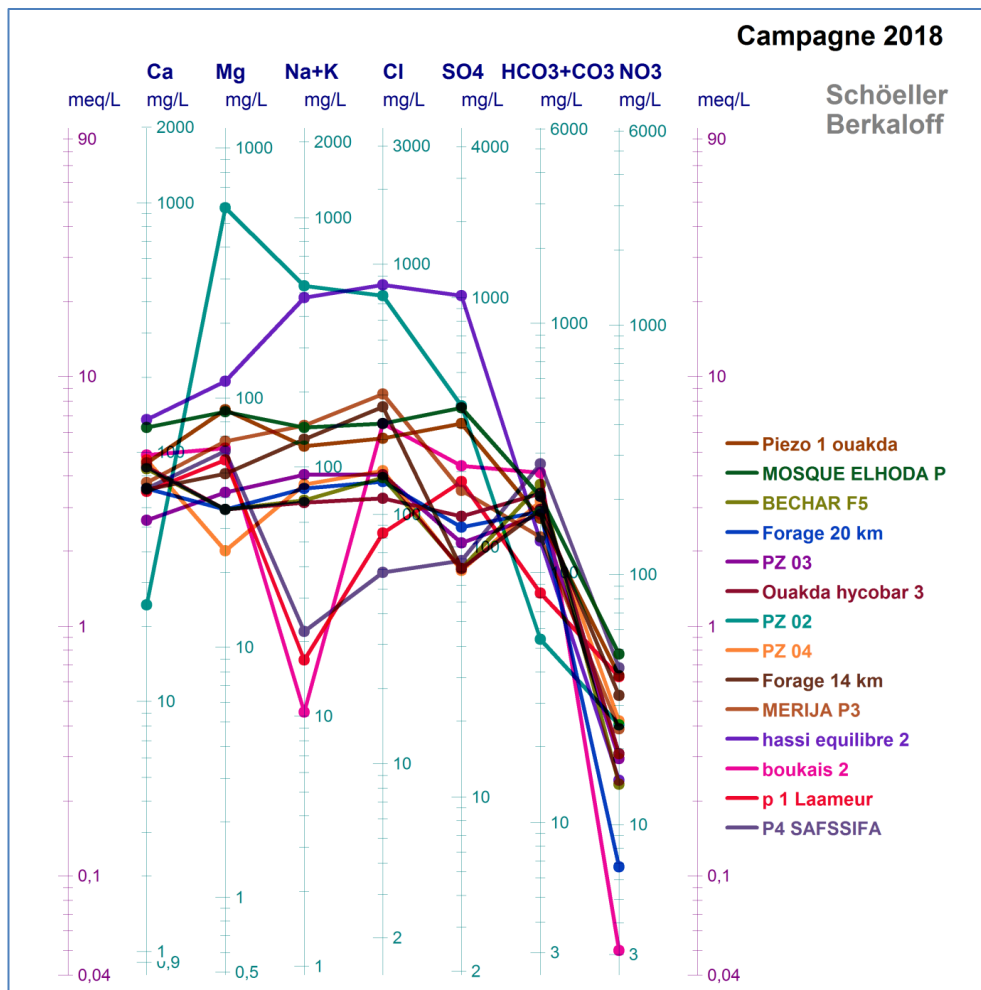
A l'issue des résultats, on note que la majorité des échantillons présentent des allures différentes indiquant que ces eaux peuvent être classées en plusieurs familles différentes qui ne dérivent pas d'une même origine chimique. En effet, certains échantillons aquifères montrent de fortes teneurs en magnésium, en bicarbonate, en sulfate et en calcium suggérant une origine liée à un faciès sulfaté magnésienne ou bicarbonaté calcique. D'autres, se distinguent par des concentrations relativement importantes en ces éléments, témoignant d'une origine en relation avec un faciès chlorurée sodique et calcique ou



encore d'autres avec des teneurs intermédiaires reflétant des intermédiaires de transition entre les deux faciès principaux identifiés.



**Figure V.4:** Diagramme de Schoeller-Berkaloff de l'aquifère de turonien de la campagne 2013



**Figure V. 5:** Diagramme de Schoeller-Berkalloff de l'aquifère de Turonien de la campagne 2018

## 5. les mécanismes de salinité des eaux souterraines

La nature des formations géologiques influence la qualité des eaux souterraines. Lors d'un écoulement souterrain et en fonction du temps de séjour, il y a un échange d'ions entre l'eau et la roche. L'altération des minéraux dans ces roches libère également des éléments mobiles (alcalins et alcalino-terreux) et des oligo-éléments dans les eaux. Afin de déterminer les différents processus hydrogéochimiques qui se produisent dans l'aquifère, des diagrammes de projections ont été appliqués selon les processus identifiés ci-dessous :

### 5.1 . Principaux processus de minéralisation des eaux

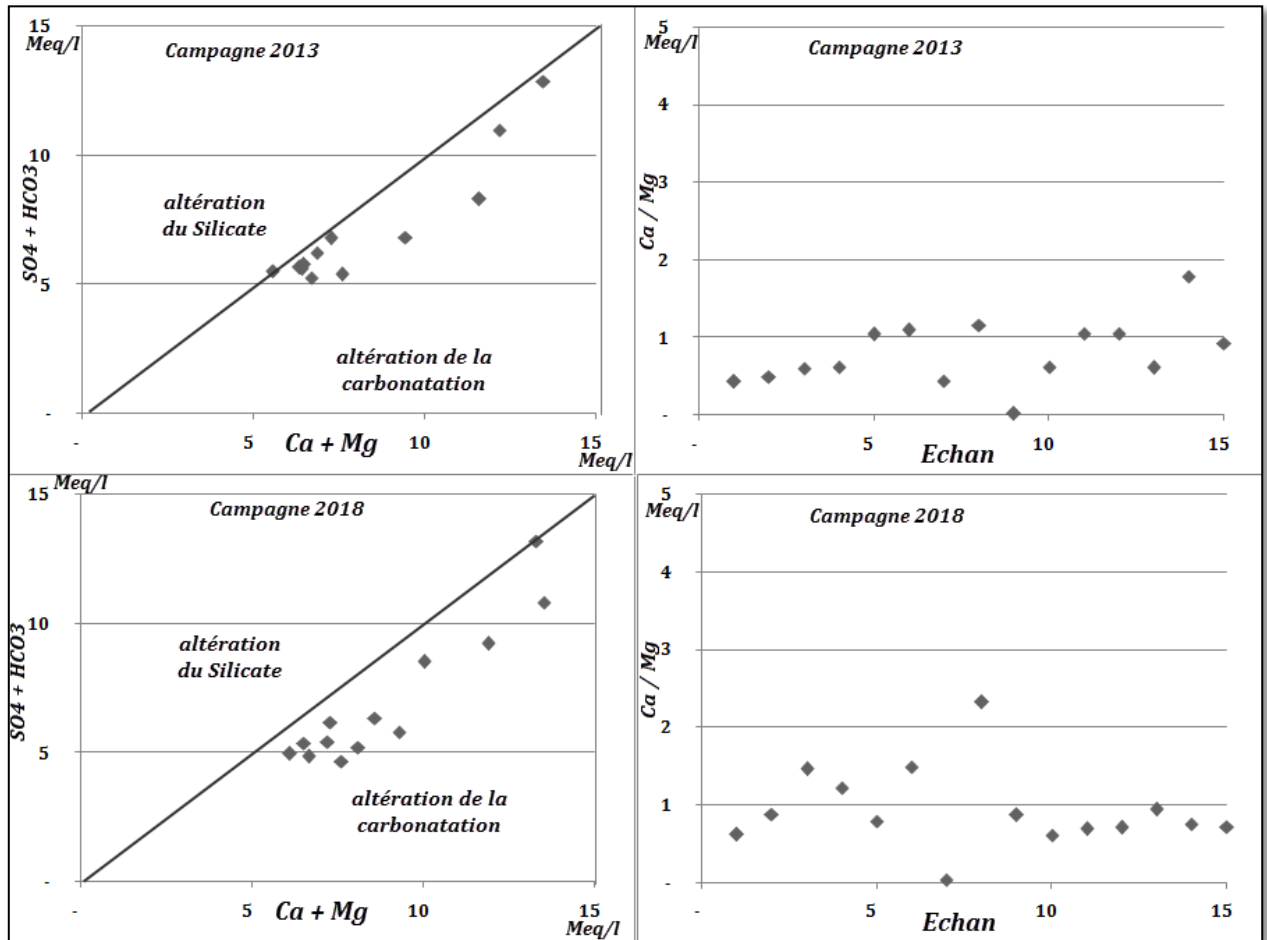
#### a. Altération et dissolution

D'après les résultats de l'analyse des bases de données, on constate que les cations de calcium, sodium et magnésium sont les plus abondants dans les eaux de la nappe Turonienne, les chlorures et les sulfates existent en quantités considérables. Les procédés de lessivage des composantes géologiques de la région telle que les évaporites, les silicates et les carbonates

sont considérés comme les principales sources de minéralisation des eaux de la zone d'étude. Pour mieux comprendre les processus de minéralisation des eaux souterraines de la région, on utilise la projection des minéraux dans les graphiques ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  Vs  $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) qui exposent la contribution des principaux minéraux dans la phase de minéralisation.

La dominance de  $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$  sur  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  est un indicateur de l'altération des silicates, tandis que l'abondance de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  est un indicateur d'échange ionique inverse (Elango & Kannan, 2007). En d'autres termes, l'abondance de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  dans les eaux souterraines pourrait être liée à la présence de roches carbonatées dans un aquifère, tandis que l'altération du carbonate et des silicates contribue au  $\text{Ca}^{2+}$  et au  $\text{Mg}^{2+}$  dans les eaux souterraines. Dans la figure (Fig. V.6), on s'aperçoit que la plupart des points d'échantillonnage pour les deux campagnes se trouve sous le droit de l'équilibre ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ). Cela indique que l'altération du carbonate est la principale source de bicarbonate ion dans les eaux souterraines de cette région (Datta, Bhattacharya, & Tyagi, 1996).

La dissolution de la calcite et de la dolomite peut être illustrée par le rapport molaire  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$  de l'eau souterraine (Fig. V.6). Un rapport molaire  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$  égal à 1 indique la dissolution des roches dolomitiques (Mayo et Loucks, 1995), tandis qu'un rapport plus élevé représente une contribution plus dominante de la calcite des roches. Un rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  supérieur à 2 représente la dissolution des minéraux silicatés dans les eaux souterraines (Katz, Coplen, Bullen et Hal Davis, 1997). Dans notre étude, 61.58% des échantillons d'eaux avaient un rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} < 1$  (Fig. V.6), ce qui indiquait la dissolution de la dolomie. Pour le reste, 33.08% des échantillons avaient un rapport entre 1 et 2, ce qui prouvait la dissolution de la calcite. Un seul échantillon (5.34%) avait un rapport supérieur à 2, ce qui montrait l'effet des minéraux silicatés qui apportent du calcium et du magnésium aux eaux souterraines (Mayo et Loucks, 1995).



**Figure V.6:** Diagramme  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$  vs  $(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$  et rapport molaire  $Ca^{2+} / Mg^{2+}$  des eaux du Turonien dans la région d'étude.

### b. Échange d'ions

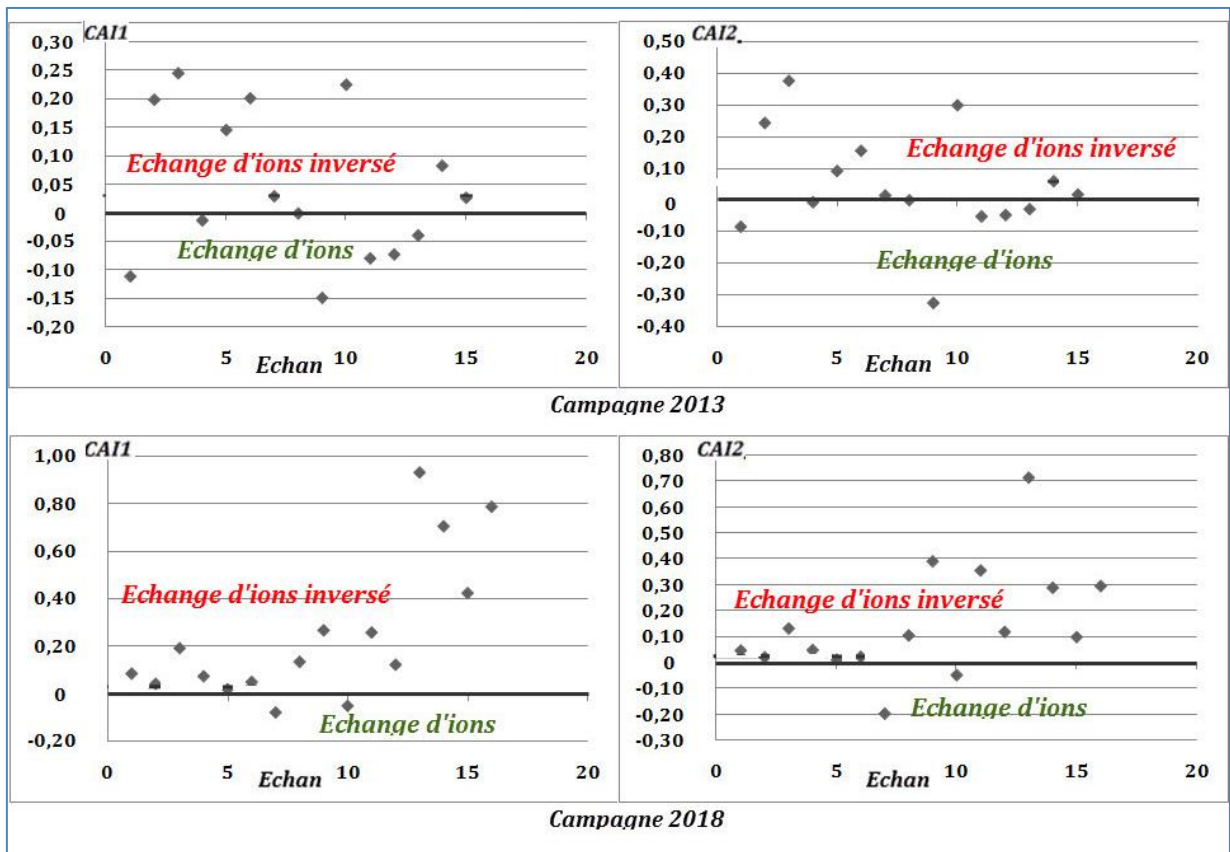
L'échange d'ions est l'un des processus importants et responsables de la concentration d'ions dans les eaux souterraines. Les indices chloro-alcalins 1 et 2 (CAI 1 et CAI 2) calculés pour les échantillons d'eau souterraine du bassin suggèrent fortement la survenue d'un processus d'échange d'ions, où les unités des paramètres chimiques est en méq / l. :

$$CAI\ 1 : (rCl - (rNa + rK)) / rCl. \quad (V.4)$$

$$CAI\ 2 : (rCl - (rNa + rK)) / (rSO_4 + rHCO_3 + rNO_3) \quad (V.5)$$

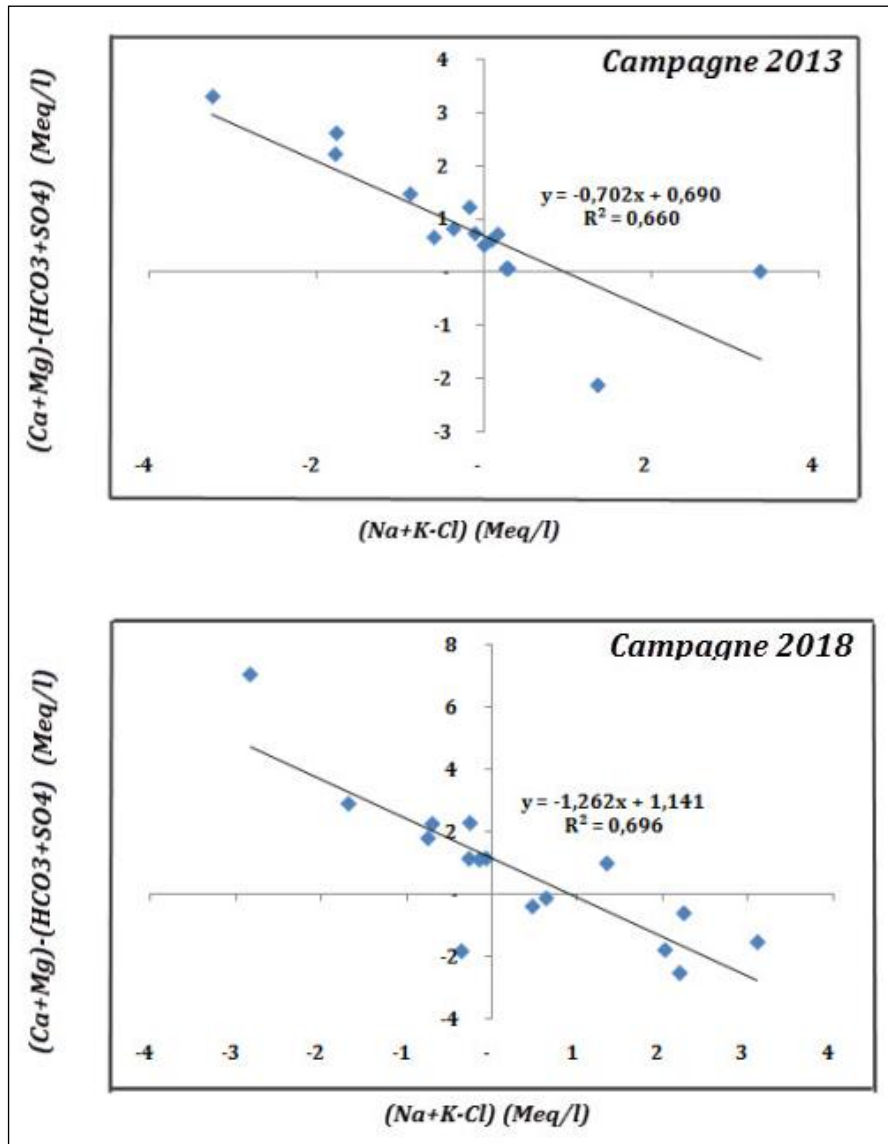
Lorsqu'il y a un échange entre  $Ca^{2+}$  ou  $Mg^{2+}$  dans l'eau souterraine avec  $Na^+$  et  $K^+$  dans le matériau de l'aquifère, les deux indices ci-dessus sont négatifs, s'il y a un échange d'ions inversé, alors ces deux indices seront positifs (Schoeller 1965, 1967).

Selon la figure V.7, on observe des valeurs de CAI 1 et CAI 2 variant en fonction du temps. Durant la campagne 2013 et 2018, on a noté que la majorité des échantillons illustrent des valeurs positives ce qui indique que le processus d'échange ions inversé est le dominant dans les eaux souterraines de la région.



**Figure V.7:** les indices Chloro-alkalins - CAI 1 et CAI 2 indiquant le processus d'échange d'ions dans l'aquifère de turonien

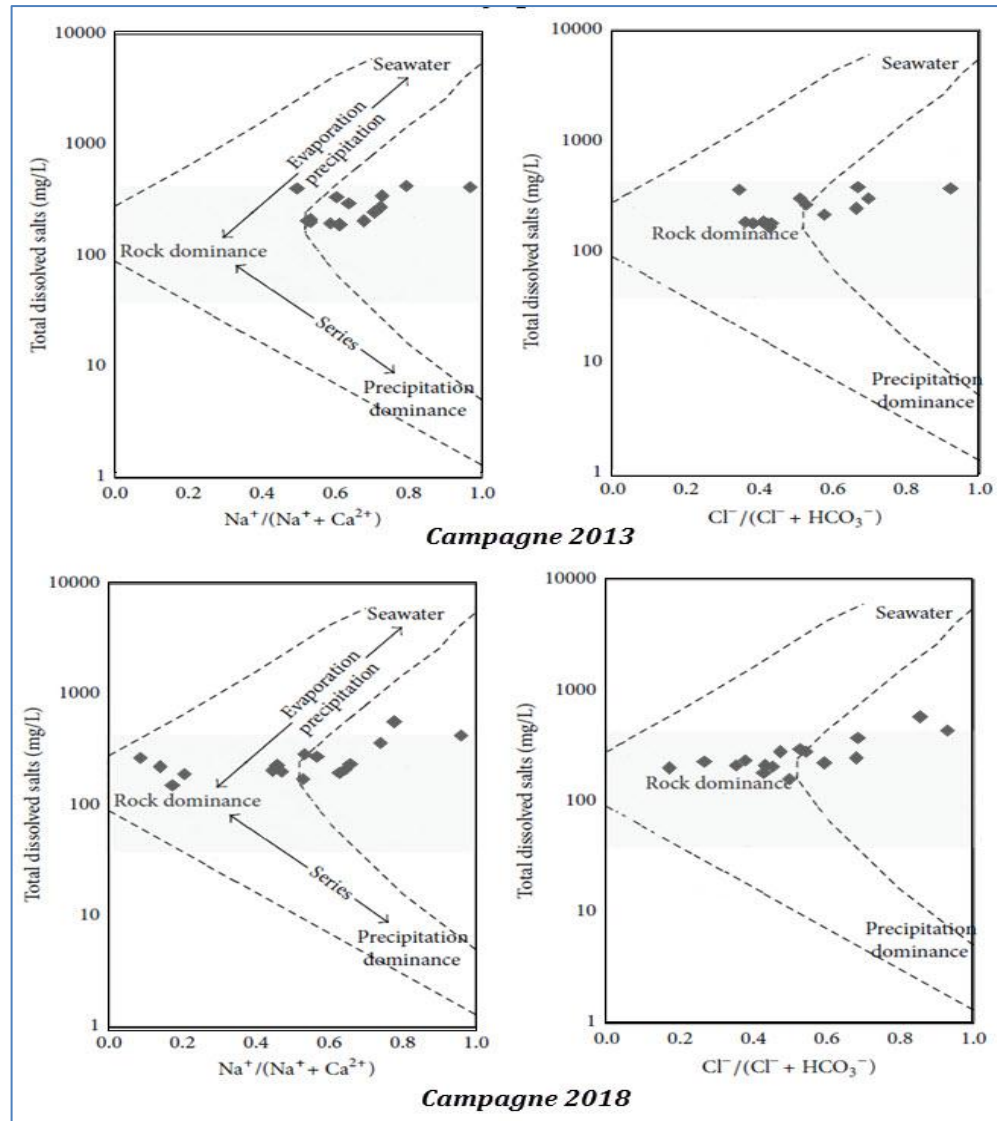
De plus, lorsque l'échange d'ions inversé devient un processus géochimique suffisamment important pour contrôler la composition des eaux souterraines, la relation entre  $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$  et  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{-2}$  devrait être linéaire avec une pente de  $-1.0$  (Fisher et Mullican 1997). La figure V.8, montre qu'apparemment tous les échantillons d'eau souterraine pour la campagne 2018 sont en dessus de la ligne droite ( $R^2=0,69$ ) avec une pente de  $-1,26$ , ce qui indique l'occurrence d'échange ionique inverse dans la zone d'étude.



**Figure V.8:** Relation entre [(Ca+Mg) – (HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub>)] et [Na+K-Cl], dans les eaux.

### c. Evaporation

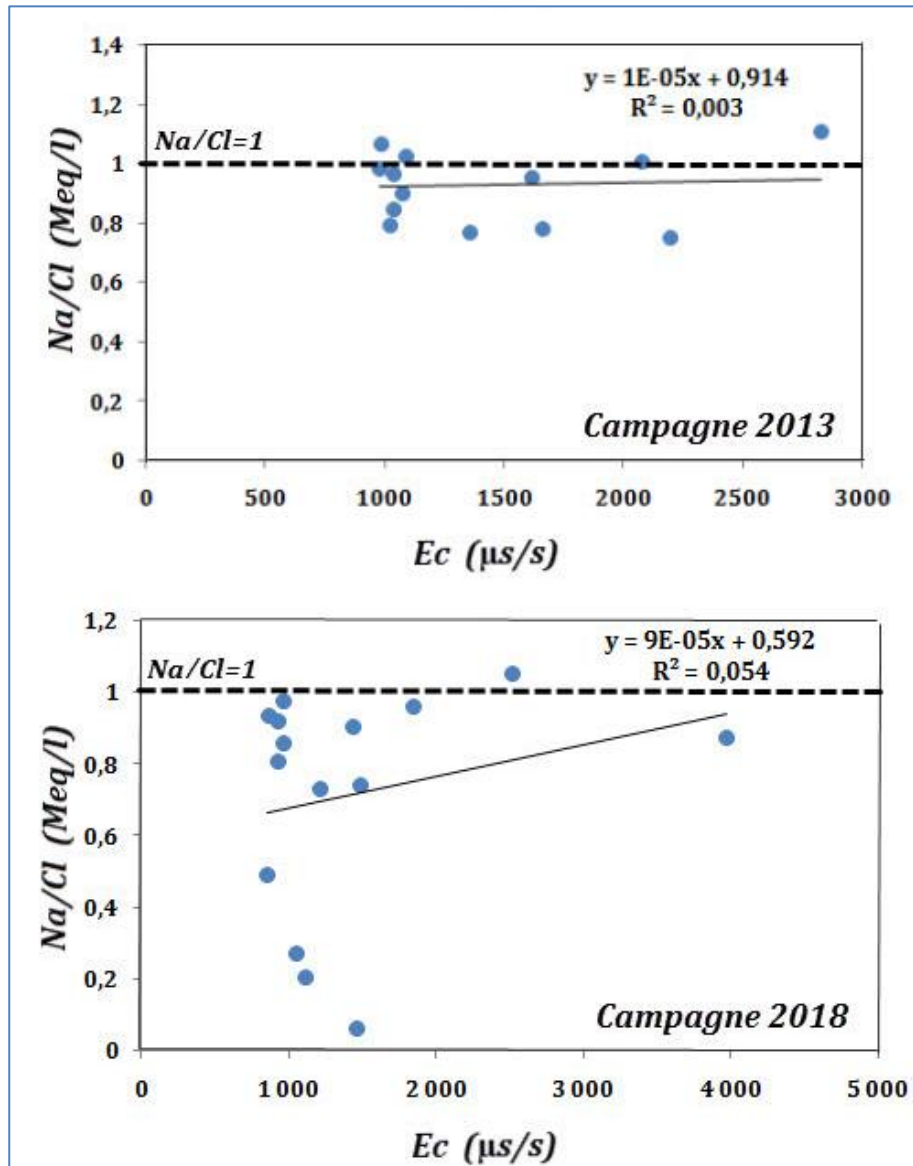
Étant donné que la région d'étude connaît des conditions climatiques sèches et semi-arides, l'évaporation peut également contribuer à la chimie de l'eau dans la région d'étude. Par conséquent, le diagramme de Gibbs y est utilisé pour comprendre et différencier les influences de l'interaction roche-eau, de l'évaporation et des précipitations sur la chimie de l'eau (Gibbs, 1970). La figure V.9, illustre que la plupart des échantillons d'eau souterraine de l'aquifère du turonien se situent dans le champ d'interaction eau-roche, et suggère que l'altération des roches contrôle principalement la chimie des ions majeurs des eaux souterraines dans cette région. De ce fait, les concentrations d'ions majeurs dans les eaux souterraines et la minéralogie de différentes roches ont été utilisées pour déterminer la source de ces ions majeurs dans les eaux souterraines et leur relation avec la géologie régionale et les processus d'altération.



**Figure V.9:** Les graphiques de Gibbs expliquent la chimie des eaux souterraines et le processus géochimique dans la région d'étude

Le processus d'évaporation n'est pas seulement un phénomène courant dans les eaux de surface, mais également dans les eaux souterraines. Le graphique de  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  en fonction de la CE a été utilisé pour caractériser l'impact de l'évaporation sur la chimie des eaux souterraines. Ce graphique donnerait une ligne horizontale, qui serait alors un indicateur efficace de la concentration par évaporation, évapotranspiration et dissolution de l'halite. Théoriquement, le rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  approximativement égal à 1 est attribué à la dissolution de l'halite, alors qu'un rapport supérieur à 1 indique généralement le rejet de  $\text{Na}^+$  dû à l'altération des silicates (Meybeck 1987). En général, le rapport molaire  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  pour les échantillons d'eau de l'aquifère du Turonien varie d'une campagne à l'autre. Pour les deux campagnes (2013 et 2018), on aperçoit que la majorité des échantillons ont un

rapport molaire  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  inférieur à «1» indiquant que la dissolution de l'halite était le principal processus (Fig. V.10). Le diagramme de dispersion de EC versus  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  montre une ligne de tendance inclinée, ce qui indique que l'évaporation n'est peut-être pas le principal processus géochimique contrôlant la chimie des eaux souterraines.



**Figure V.10:** Projection de la chimie des eaux de la région d'étude sur le diagramme : EC vs  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ .

## 5.2. L'Indice de Saturation

Les calculs d'équilibre nous aident à déterminer l'état de saturation des eaux souterraines en fonction des divers minéraux présents. Ils sont utiles pour prédire la présence de minéraux réactifs dans le système des eaux souterraines et estimation de la réactivité minérale (Deutsch 1997). En utilisant l'approche de l'indice de saturation (SI), il est possible de prédire la minéralogie réactive du sous-sol à partir des données sur les eaux souterraines sans collecter



les échantillons de la phase solide et analyser la minéralogie (Deutsch 1997). À partir de ces calculs, nous déduisons si un minéral particulier aurait tendance à se dissoudre ou à se précipiter dans un environnement aqueux donné. Des indices de saturation sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre les minéraux de l'eau. Les changements d'état de saturation permettent de distinguer les différentes étapes de l'évolution hydro-chimique et de découvrir les principales réactions géochimiques contrôlant la chimie de l'eau. Un programme informatique Diagrammes PHREEQC (Parkhurst et Appelo 1999) a été utilisé pour tous les calculs.

➤ Le groupe des carbonatés présente des indices de saturation variées durant les deux campagnes. La dolomite est souvent à l'état de sursaturation avec un indice qui varie entre (1,27/-4,48) en 2018. Les minéraux de calcite et l'aragonite présentent des tendances de variation similaire à la dolomite avec des indices de saturation qui varie entre (0,99/-2,62) et (0,44/-3,25) (Tab. V.23). Suivant ces valeurs, on constate un changement d'un état de sous saturation à un état de sursaturation. La répartition géographique de ces minéraux montre que les valeurs les plus élevées sont observées soit dans la partie Nord (Lahmer et Boukais), soit au niveau de la commune de Meridja à l'Ouest de la zone d'étude ; ils sont caractérisés par des zones carbonatées qui contiennent les ions de calcium et de magnésium, et qui se combinent avec le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère pour donner des minéraux carbonatés.

➤ L'autre groupe de minéraux (l'anhydrite, le Gypse et l'halite), qui forment les évaporites est caractérisé par une sous saturation, avec des valeurs variant de (-1/-2,35) en 2018 pour l'anhydrite, de (-0,79/-2,13) pour le gypse et (-5,08/-7,56) pour l'halite (Tab. V.23). Les valeurs élevées sont enregistrées au centre de la zone d'étude (Mosquée El Houda) ce qui s'explique par l'existence des lentilles évaporitiques.

**Tableau V.23 :** les valeurs de l'indice de saturation (SI)

campagne	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypse	Halite
2013	-1,32/-2,42	0,22/-4,29	0,36/-4,15	0,83/-6,42	-1,1/-2,2	-5,04/-6,63
2018	-1/-2,35	0,44/-3,25	0,58/-3,1	1,27/-4,48	-0,79/-2,13	-5,08/-7,56

### 5.3. Matrice de corrélation

L'analyse de corrélation est utile pour comprendre les réactions chimiques se produisant dans le système des eaux souterraines. Les corrélations entre les variables de la qualité de l'eau peuvent révéler plusieurs relations hydro-chimiques importantes. Les matrices de corrélation de Pearson ont été appliquées pour identifier la relation entre les paramètres physico-chimiques

de l'eau ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , TDS, salinité, température  $T^\circ$ , PH, conductivité, Résidu sec RS).

**Tableau V.24** : Moyenne et écart-type des paramètres physicochimiques

Variable	Moyenne	Ecart-type
Ca	83,8988	26,0866
Mg	93,4513	131,4981
Na	141,9056	155,5694
K	1,9131	1,0704
CL	260,7000	226,8852
SO4	247,4288	239,9254
HCO3	183,9138	64,2998
NO3	24,3450	12,9096
salinité	1251,4864	1187,3502
temperature	20,5250	2,8004
PH	7,4069	0,5550
COND	3344,0481	7654,4194
RS_	2341,0750	5165,6357
TH	70,8756	73,2594

La matrice de corrélation de la campagne 2018 des 14 paramètres mesurés a été calculée et présentée dans le tableau V.25. La valeur de corrélation de Pearson varie entre 0 (dans le cas d'une absence de corrélation) et 1 (lorsque la corrélation est parfaite). Les échantillons ayant un coefficient de corrélation supérieur à 0,7 sont considérés comme fortement corrélés. Lorsque  $r$  prend des valeurs comprises entre 0,5 et 0,7, les échantillons montrent une corrélation modérée à un niveau de signification  $p = 0,05$ ; tandis que pour  $r$  inférieur à 0,3, la corrélation sera jugée comme étant faible.

A partir de cette matrice de corrélation, de nombreux paramètres physico-chimiques ont dénoté de fortes corrélations les uns avec les autres indiquant l'interaction étroite de ces paramètres entre eux. Les résultats de l'analyse de corrélation ont montré une corrélation positive élevée entre la conductivité électrique (CE) et les paramètres de  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , et RS ; ces relations identifient clairement les principaux éléments contribuant à la salinité des eaux souterraines et sa disposition à suivre une tendance similaire. Des corrélations positives élevées ont été rapportées entre les concentrations de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Mg}^{+2}$  avec des coefficients de corrélation  $r$  prenant des valeurs comprises entre 0,757 et 0,965, ce qui suppose l'impact des activités agricoles.

Basés sur le tableau V.25, les coefficients de corrélation entre  $\text{Mg}^{+2}$  et  $\text{Na}^{+2}$  ( $r = 0,993$  et  $0,81$ , respectivement) étaient statistiquement significatives, avec une dureté totale (TH) en prenant la mesure approximative de  $\text{Mg}^{+2}$  et  $\text{Na}^{+2}$ . La dureté totale est également fortement corrélée avec  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0,728$ ) et faiblement corrélée avec  $\text{K}^+$  ( $r = 0,24$ ). Une forte

corrélation positive a été observée entre  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  indiquant que la principale source de chlorure provient de l'halite. Il est à noter que la plupart des ions sont impliqués dans diverses réactions physico-chimiques. Les corrélations positives avec des valeurs élevées entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0,965$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0,823$ ),  $\text{Na}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = 0,758$ ) et  $\text{Mg}^{+2}$  et  $\text{Na}^+$  ( $r = 0,757$ ) démontrent l'impact de l'activité agricole. Le pH a une corrélation négative significative avec la plupart des paramètres physico-chimiques.

**Tableau V.25:** Matrice de corrélation Pearson des paramètres physico-chimiques des eaux du Turonien.

Variable	Ca	Mg	Na	K	CL	SO4	HCO3	NO3	salinité	Temp.	PH	COND	RS_	TH
Ca	<b>1,00</b>													
Mg	-0,49	<b>1,00</b>												
Na	-0,03	0,76	<b>1,00</b>											
K	-0,11	0,43	0,49	<b>1,00</b>										
CL	0,08	0,69	0,96	0,48	<b>1,00</b>									
SO4	0,53	0,30	0,76	0,49	0,82	<b>1,00</b>								
HCO3	0,36	-0,57	-0,62	-0,35	-0,55	-0,34	<b>1,00</b>							
NO3	0,00	0,06	-0,04	0,17	-0,15	-0,05	-0,18	<b>1,00</b>						
salinité	-0,28	0,96	0,90	0,46	0,86	0,53	-0,61	-0,01	<b>1,00</b>					
temperature	0,04	-0,11	0,02	-0,23	-0,07	-0,12	-0,15	0,41	-0,08	<b>1,00</b>				
PH	0,50	-0,86	-0,54	-0,29	-0,44	-0,01	0,23	-0,03	-0,77	-0,04	<b>1,00</b>			
COND	-0,54	0,99	0,73	0,41	0,66	0,23	-0,56	0,00	0,94	-0,13	-0,88	<b>1,00</b>		
RS_	-0,54	0,99	0,73	0,40	0,66	0,24	-0,56	0,01	0,94	-0,12	-0,88	1,00	<b>1,00</b>	
TH	-0,42	0,99	0,81	0,40	0,73	0,35	-0,57	0,05	0,97	-0,04	-0,87	0,98	0,98	<b>1,00</b>

### 5.3.1. Analyse en Composante Principale (ACP)

La méthode des composantes principales est un cas particulier de la méthode plus générale d'analyse factorielle. Le but de l'ACP est la construction de nouvelles variables appelées composantes principales à partir d'un ensemble de variables originales existantes. Les nouvelles variables sont une combinaison linéaire des variables existantes. L'ACP est effectuée pour réduire le grand ensemble de données de variables en quelques facteurs appelés les composants principaux qui peuvent être interprétés pour révéler la structure de données sous-jacente. Les caractéristiques des composants principaux se démarquent par le fait qu'ils ne sont pas corrélés, c'est-à-dire orthogonaux. La première composante principale (F1) absorbe et rend compte de la proportion maximale possible de la variance totale dans l'ensemble de données. La deuxième composante (F2) absorbe le maximum de la variance restante et ainsi de suite. Le nombre maximum de composants principaux est égal au nombre de variables. La variance totale expliquée par tous les  $F_i$  sera égale au nombre de variables car chaque variable standardisée a une variance égale à 1. Pour l'interprétation, seuls quelques nombres de  $F_i$  sont retenus dans l'analyse. Le nombre de composants principaux à retenir dans l'analyse est basé

sur le critère de Kaiser. Selon ce critère, les composantes principales ( $F_i$ ) ayant une racine latente ou une valeur propre (notée  $\lambda_i$ ) supérieure à 1 sont considérées comme essentielles et sont retenues dans l'analyse.

Les composantes principales des paramètres physico-chimiques sont appliquées sur 14 paramètres pour 16 échantillons de la campagne 2018 ; celles-ci montrent que le premier axe ( $F_1$ ) exprime 56.25 % de la variance totale et le deuxième, 16.45%. Les axes factoriels sélectionnés pour cette analyse statistique sont représentatifs de la variance de l'ensemble de données. Les plans factoriels  $F_1$ - $F_2$  et  $F_1$ - $F_3$  représentent donc respectivement des variances cumulées égales à 72.70 % et 66.91 %. Au vu de ces pourcentages exprimés, on peut considérer que les mécanismes qui contrôlent la variation de la conductivité électrique des eaux souterraines sont largement contenus dans les trois premiers facteurs. En conséquence, l'analyse a été réalisée sur les factorielles  $F_1$ - $F_2$  et  $F_1$ - $F_3$ , qui mettent en évidence les tendances générales.

Le tableau des valeurs propres (Tab. V.26) montre que les trois premiers facteurs représentent 83.36 % de la variance exprimée.

**Tableau V.26 :** les valeurs propres

	F1	F2	F3
Valeurs propres	7,8750	2,3033	1,4921
Valeurs propres cumulées	7,8750	10,1784	11,6705
Variabilité (%)	56,2503	16,4524	10,6581
% cumulé	56,2503	72,7027	83,3607

**Tableau V.27 :** Corrélation entre les variables et les facteurs (% après rotation Varimax)

	F1	F2	F3
Ca	-0,3785	<b>0,8067</b>	0,0753
Mg	<b>0,9702</b>	-0,1954	-0,0297
Na	<b>0,8822</b>	0,3976	0,0773
K	<b>0,5277</b>	0,2822	0,0352
Cl	<b>0,8241</b>	0,5123	-0,0303
SO <sub>4</sub>	0,4719	<b>0,8717</b>	0,0276
HCO <sub>3</sub>	<b>-0,6457</b>	-0,0496	-0,3581
NO <sub>3</sub>	0,0181	-0,1191	<b>0,8167</b>
salinité	<b>0,9897</b>	0,0712	-0,0197
temperature	-0,0817	-0,1133	<b>0,8167</b>
pH	<b>-0,7939</b>	0,4188	0,0502
COND	<b>0,9601</b>	-0,2505	-0,0795
RS_	<b>0,9610</b>	-0,2506	-0,0715
TH	<b>0,9762</b>	-0,1372	0,0078

Les trois principaux facteurs ayant une valeur propre supérieure à un représentent 83.36 % de la variance totale. Les saturations factorielles supérieures à 0,5 sont considérées comme significatives. Le premier facteur explique 56.25 % de la variance totale avec des charges élevées de  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  salinité, pH, EC et RS. Ce facteur doit être considéré que ces variables peuvent être influencées par une cause commune, à savoir la dissolution des minéraux au cours de l'écoulement des eaux souterraines. Les ions majeurs, tels que  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  et  $Cl^-$ , sont des composants importants de minéraux tels que l'halite, les carbonates et les dolomites.

Le deuxième facteur représente 16.45 % de la variance totale, les charges de  $Ca^{+2}$ , et  $SO_4^{2-}$  il se traduit par la dissolution de minéraux tels que gypse, sulfures de fer et autres composés soufrés. Le troisième facteur représentant 10.65 % de la variance totale de l'ensemble de données et a une forte corrélation positive avec  $NO_3^-$  et la température. Ce facteur reflète la signature des activités anthropiques telles que les rejets d'eaux usées domestiques et l'usage des engrais (Dragon, 2006) ; qui sont les principales sources de nitrates qui détériorent la qualité régionale des eaux souterraines. Des températures plus chaudes dans le sol et l'eau augmentent la croissance biologique et diminuent les concentrations de nitrate et ce qui prouve la bonne corrélation entre les valeurs des nitrates et la température.

La figure V.11, montre les résultats de l'ACP dans le plan factoriel F1-F2. Le facteur F1 est défini par un groupement situé dans sa partie positive et constitué par la conductivité électrique (CE), TH, RS,  $Mg^{+2}$ , Salinité,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , TDS,  $SO_4^{2-}$ , et  $K^+$  avec une variabilité de 55.24 %. A l'inverse, le facteur F2 est marqué par un groupe constitué de la température,  $HCO_3^-$ , pH et  $Ca^{+2}$  dans sa partie positive avec une variabilité de 19.43%.

L'analyse dans le plan factoriel F1-F3 (Fig. V.12) illustre le même regroupement pour le plan factoriel F1. Le facteur F3 est défini par deux groupements. Le premier groupe, constitué de la température,  $Cl^-$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ , RS, TDS, Cond, Salinité est situé dans sa partie positive. Le deuxième groupement est constitué de  $Ca^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ , pH, Temp est situé dans sa partie négative avec une variabilité de 9.95%.

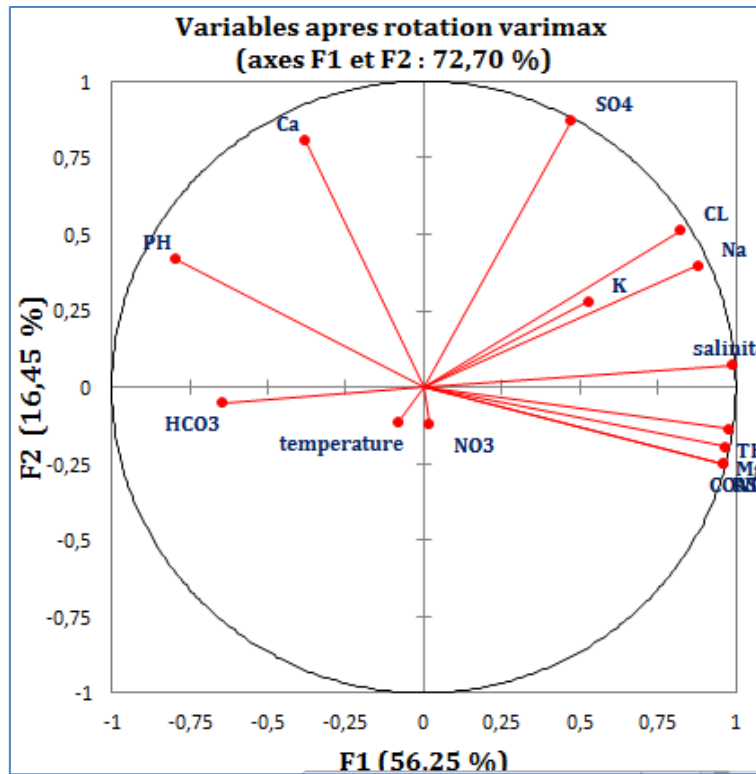


Figure V.11 : Projection des variables sur le plan factoriel (F1xF2)

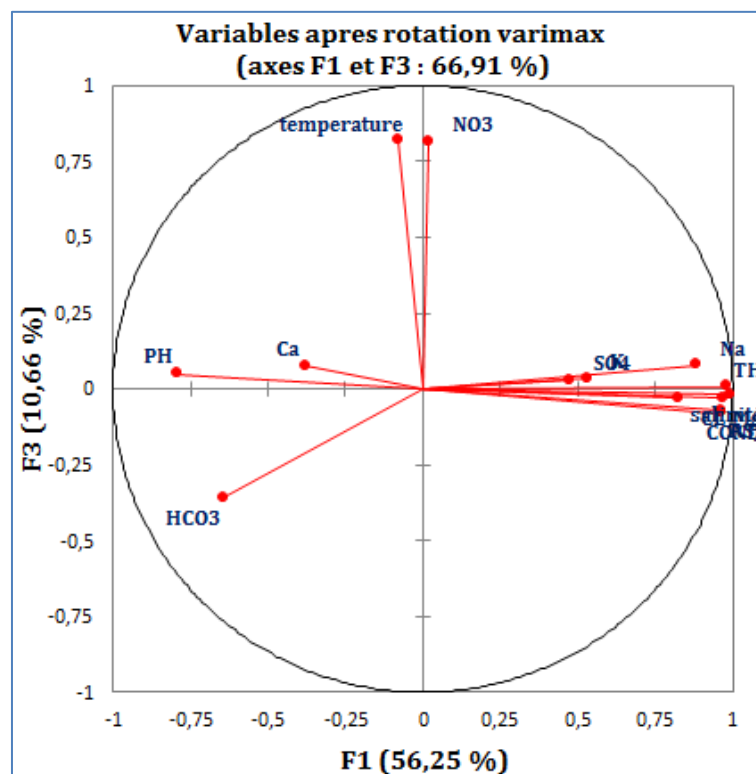


Figure V.12 : Projection des variables sur le plan factoriel (F1xF3)

Les résultats de l'ACP indiquent que la plupart des paramètres physico-chimiques étudiés n'influencent pas tous la conductivité électrique, à l'exception de  $Mg^{+2}$ , TH et RS qui sont très proches de la conductivité électrique dans le plan factoriel F1-F2 ainsi que dans le plan factoriel F1 -F3. En plus de  $Mg^{+2}$ , TH et RS, la somme des cations majeurs et la somme des anions majeurs influencent davantage la conductivité électrique. En effet, la conductivité électrique est un indicateur de la minéralisation globale). Il s'avère que la conductivité électrique est influencée par les paramètres chimiques de l'eau qui se résument dans ce cas à la somme des cations majeurs et à celle des anions majeurs. L'éloignement de la  $HCO_3^-$  de la conductivité électrique dans le plan factoriel F1 -F2, montre que la conductivité électrique est influencée par le bicarbonate. Cependant, l'analyse de la projection des variables dans le plan factoriel F1-F3 montre clairement que le bicarbonate est l'un des paramètres qui peut influencer principalement la conductivité électrique (Fig. V.12). Ceci explique la faible corrélation ( $R = -0.56$ ) entre ces deux paramètres. De plus, les résultats ne montrent aucune relation significative entre d'une part, la conductivité électrique et d'autre part, la température et  $NO_3^-$ .

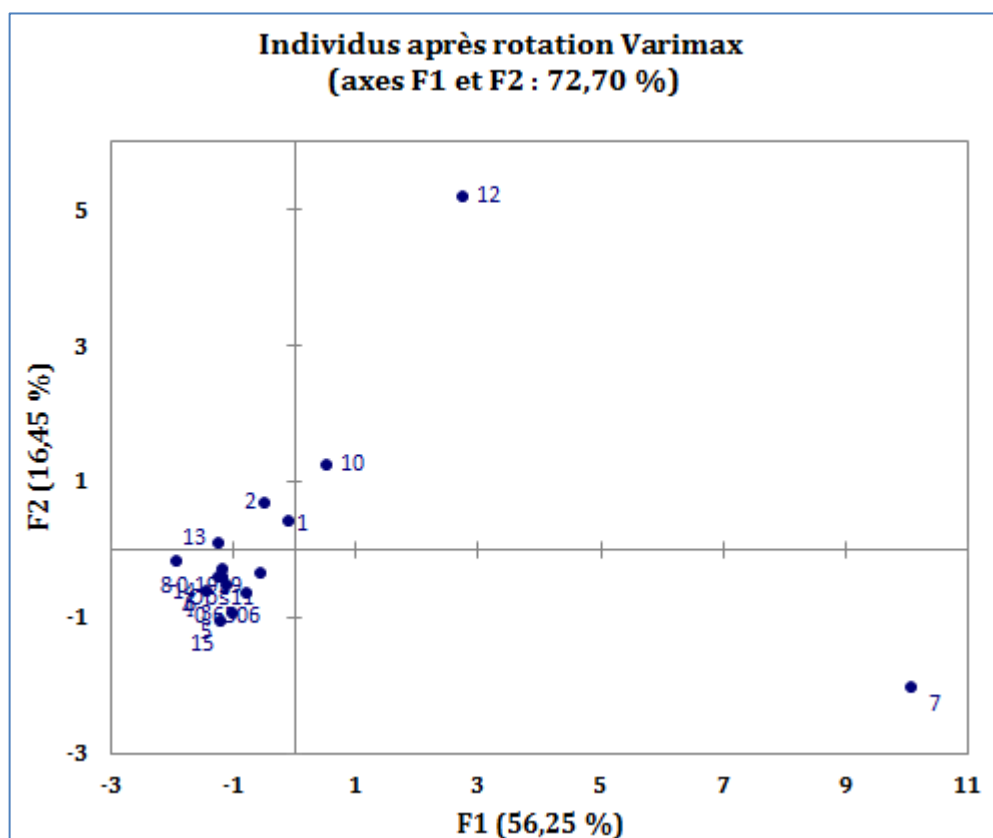


Figure V.13 : La projection des individus sur le plan factoriel (F1xF2).

La structure typologique du plan d'analyse F1 x F2 (Fig. V.13) permet d'identifier trois zones (GI, GII et GIII), en fonction de la nature des polluants et de leur degré de contamination

**Groupe I:** Ce groupe occupe la partie positive de l'axe F1. Elle est représentée par le point d'eau N°7. Les eaux souterraines de cette zone sont caractérisées par une forte minéralisation reflétée par les niveaux élevés de  $\text{Cl}^-$ . Cette forte charge en ces éléments chimiques  $\text{Cl}^-$  reflète un temps de séjour très long des eaux souterraines dans l'aquifère. L'état de sursaturation de l'eau en minéraux carbonatés semble être principalement dû à la dissolution des roches par l'eau, ce qui est un phénomène très rapide.

**Groupe II:** Ce groupe occupe les parties positives de F2. Il est représenté par les points 10 et 12. Il est caractérisé par une charge élevée en éléments chimiques ( $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), dont la présence dans ces eaux souterraines pourrait être liée aux sels géologiques.

**Groupe III:** Ce groupe occupe les parties négatives de F1. Il est représenté par un nuage de points. Il est caractérisé par une charge élevée en éléments chimiques ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{+2}$ ). La présence de ces éléments dans cette eau souterraine pourrait être liée aux sels géologiques. Une bonne partie des points d'eau de notre zone d'étude en forte minéralisation se trouve dans une zone agricole (Ouakda) où la concentration des nitrates peut être issue de l'utilisation excessive des engrais agricoles.

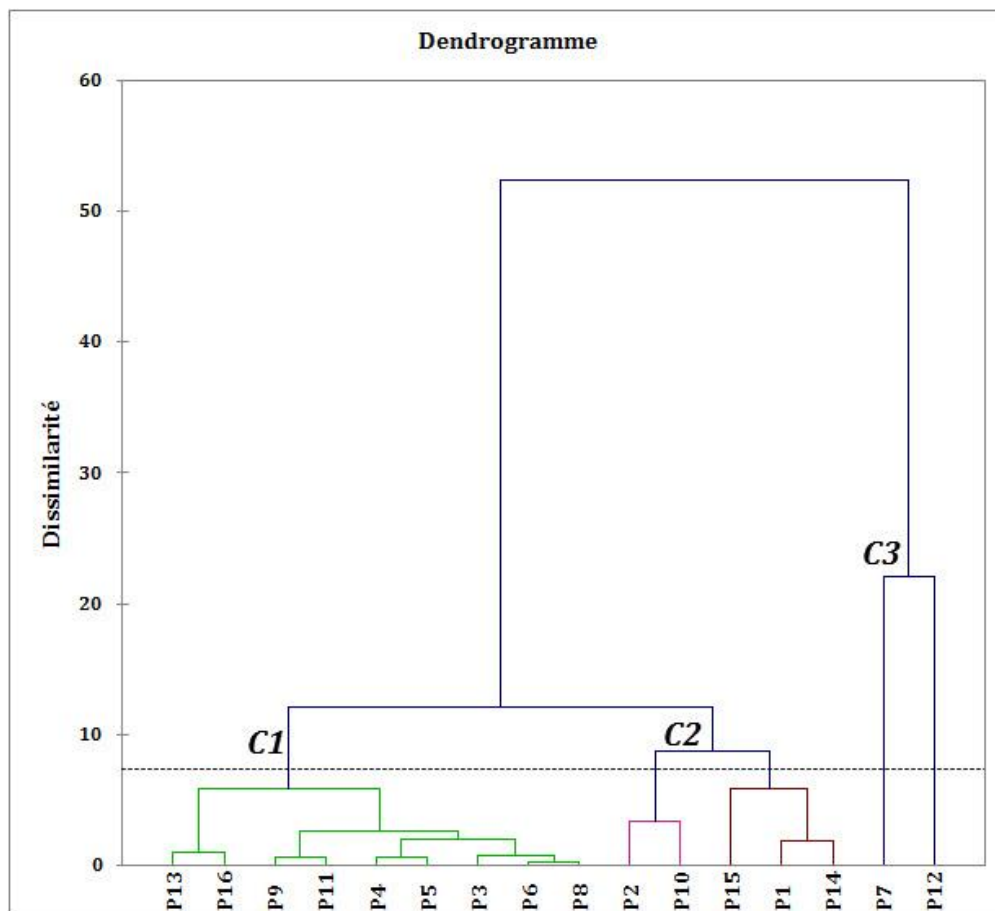
### 5.3.2. Classification Ascendante Hiérarchisée (HCA)

L'analyse de cluster est une branche des techniques multi-variées dont le but principal est de regrouper les objets en fonction des propriétés qu'ils possèdent. Selon des critères de sélection prédéterminés, l'analyse des clusters divise les objets en quelques clusters afin que ceux du même cluster aient les caractéristiques les plus similaires (Valder et al., 2012)

HCA est la technique d'analyse de cluster la plus largement utilisée en hydrogéologie, capable d'identifier la relation initiale entre un échantillon et l'ensemble de données, illustrant visuellement d'une manière générale la relation avec un dendrogramme (Guowei et al., 2020). Dans cette étude, une HCA a été réalisée sur des ensembles de données hydro chimiques standardisés, en utilisant la règle de couplage de Ward, qui génère différents groupes basés sur une analyse de la variance, puis regroupe tous les non-résiduels dans des grappes séparées, où chaque échantillon d'un groupe, paraît être plus similaire aux autres échantillons du même groupe, qu'aux échantillons d'autres groupes. La distance euclidienne, est utilisée dans HCA



comme mesure de similitude entre tous les échantillons (Raiber et al., 2012). Ici, nous avons mené une HCA à l'aide du logiciel Xlstat 5.03.



**Figure V.14 :** Classification ascendante hiérarchisée des eaux à partir de 08 paramètres présentant une corrélation importante.

**Tableau V.28 :** Caractéristiques physico-chimiques de chaque grappe (concentrations médianes en mg/L).

Paramètres	Moyenne		
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Ca	80,69	<b>91,36</b>	79,70
Mg	<u>45,76</u>	79,14	<b>346,91</b>
Na	<u>77,90</u>	115,43	<b>499,75</b>
K	<u>1,47</u>	2,10	<b>3,76</b>
CL	<u>178,07</u>	197,42	<b>793,15</b>
SO4	<u>130,84</u>	286,30	<b>693,70</b>
HCO3	<b>201,62</b>	181,54	<u>94,15</u>
NO3	<u>18,08</u>	<b>38,13</b>	19,98
TDS	<u>844,89</u>	1 054,80	<b>2 358,50</b>
salinité	<u>773,53</u>	1 064,14	<b>3 888,51</b>
T(°C)	20,77	<b>21,58</b>	<u>18,35</u>
PH	7,52	<b>7,53</b>	<u>6,68</u>
COND	<u>1 107,30</u>	1 543,38	<b>17 933,35</b>
RS_	<u>827,64</u>	1 148,16	<b>12 150,00</b>
TH	<u>44,41</u>	61,22	<b>214,10</b>

Selon la figure V.14 qui représente le dendrogramme des eaux souterraines de la zone d'étude, on peut distinguer l'apparition de trois familles hydro chimiques statistiquement liées:

La première famille (C1) englobe 09 points d'eau et représente 56.25 % de la somme des points d'eau étudiés. Cette famille d'eau regroupe les eaux les plus douce avec une CE moyenne de 1107.30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ce qui est la caractéristique d'une eau moins saline. Cependant, ce groupe est fondamentalement dominé par le bicarbonate; et se localise majoritairement à l'Est et au Nord - est de la région d'étude.

La deuxième famille (C2) est représentée par 05 points d'eau soit 31.25 % des points d'eau étudiés. Les eaux de cette famille sont moyennement minéralisées par rapport à C1 avec une CE moyenne de 1543.38  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .  $\text{Ca}^{2+}$  est le cation dominant tandis que  $\text{NO}_3^-$  est l'anion dominant et se trouve en grande partie au Nord et au Nord - ouest. Ils correspondent aux échantillons prélevés à proximité des zones de recharge à savoir les oueds (Piezo Ouakda) ainsi que les zones d'activité agricole (Forgae de Mebarki el hassan)

La troisième famille (C3) comprend 2 points d'eau soit 12.5 % et représente les eaux les plus minéralisées avec des valeurs de conductivité qui dépasse largement les normes de l'OMS 2011 ainsi que les normes algériennes, Dans ce groupe le cation dominant est le  $\text{Na}^+$  suivi par le  $\text{Mg}^{+2}$  tandis que,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  sont les anions dominants. Par conséquent ce groupe correspond au faciès mixte Cl-SO4-Na-Mg. localisés au centre et à l'Est de la région d'étude.

La différence apparente des valeurs maximales et minimales des eaux étudiées est représentée dans le grand écart entre les groupes C1 et le troisième groupe C3, cet écart prouve l'instabilité de la variation de la concentration entre les points d'eau dans la région d'étude.

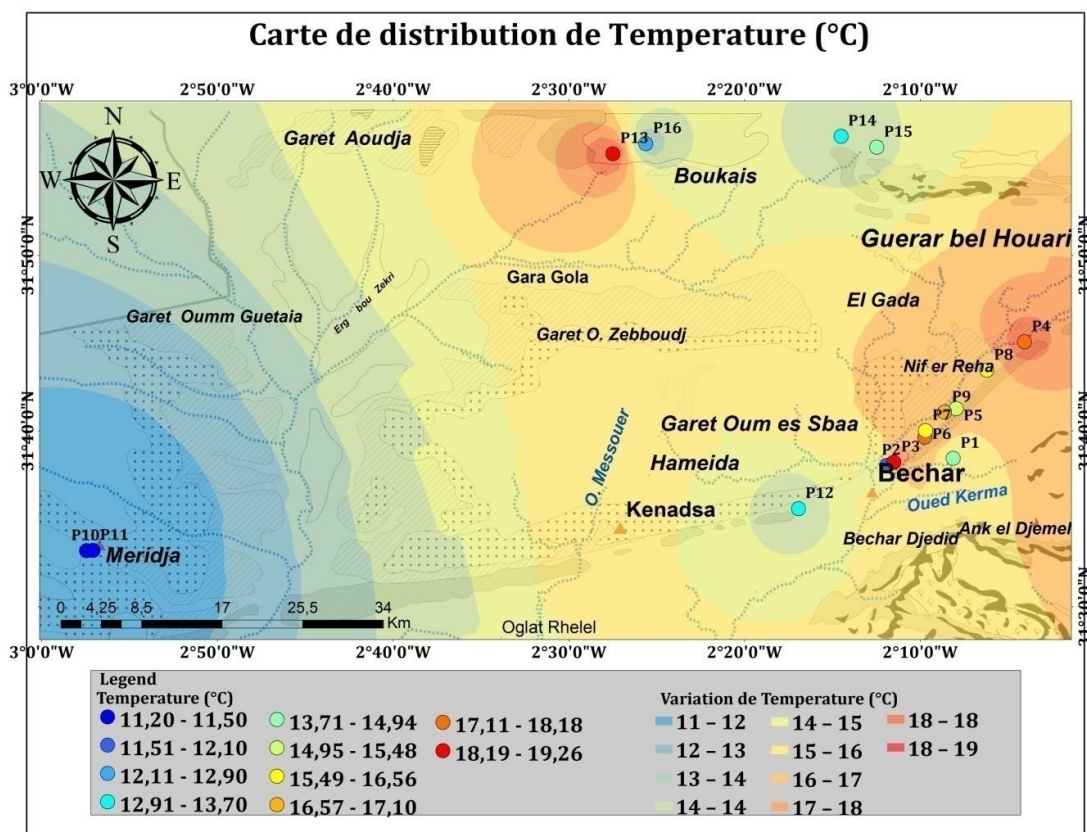
La comparaison entre les résultats illustrés dans le diagramme de Piper et celui représenté dans le dendrogramme démontre des résultats différents. Dans le diagramme de Piper nous avons pu observer que les eaux de la zone d'étude sont hétérogènes et qu'elles sont classées selon six faciès chimiques. Le diagramme de Dendrogramme quant à lui montre que ces eaux sont classées selon trois groupes qui illustrent une variation hydro chimique de la zone d'étude, principalement liée à la localisation des échantillons prélevés et aux caractéristiques géologiques à travers lesquels s'écoulent les eaux souterraines.

### **5.3.3. Variations et répartitions des paramètres physiques des eaux**

#### ***a. La température***

La température est l'une des propriétés les plus vitales d'un système aquatique pouvant affecter les niveaux d'oxygène dissous. La figure V.15, représente la carte de la température interpolée aux eaux souterraines pour la campagne 2018.

Les températures des eaux souterraines varient entre 11.20 et 19.26 °C, ces valeurs montrent que la température des eaux souterraines est en dessous de la température standard recommandée par les normes algériennes (25°C). Les températures de profondeur varient de 11.20°C et 13.07°C avec une moyenne de 12.48°C, ces valeurs sont influencées par le gradient géothermique qui augmente la température en fonction de la profondeur et d'autres facteurs peuvent intervenir par leur action pour l'augmenter comme les réactions physico-chimiques exothermiques. On peut constater aussi, que la partie Ouest de la zone d'étude est caractérisée par de basses températures, en revanche, la partie Est enregistre des températures élevées (près d'Ouakda). Puisque le changement de la profondeur du niveau de l'eau dans cette partie n'est pas important, c'est donc la réaction de l'oxydation et la réduction est la principale raison de l'augmentation de la température de l'eau par rapport à la région ouest

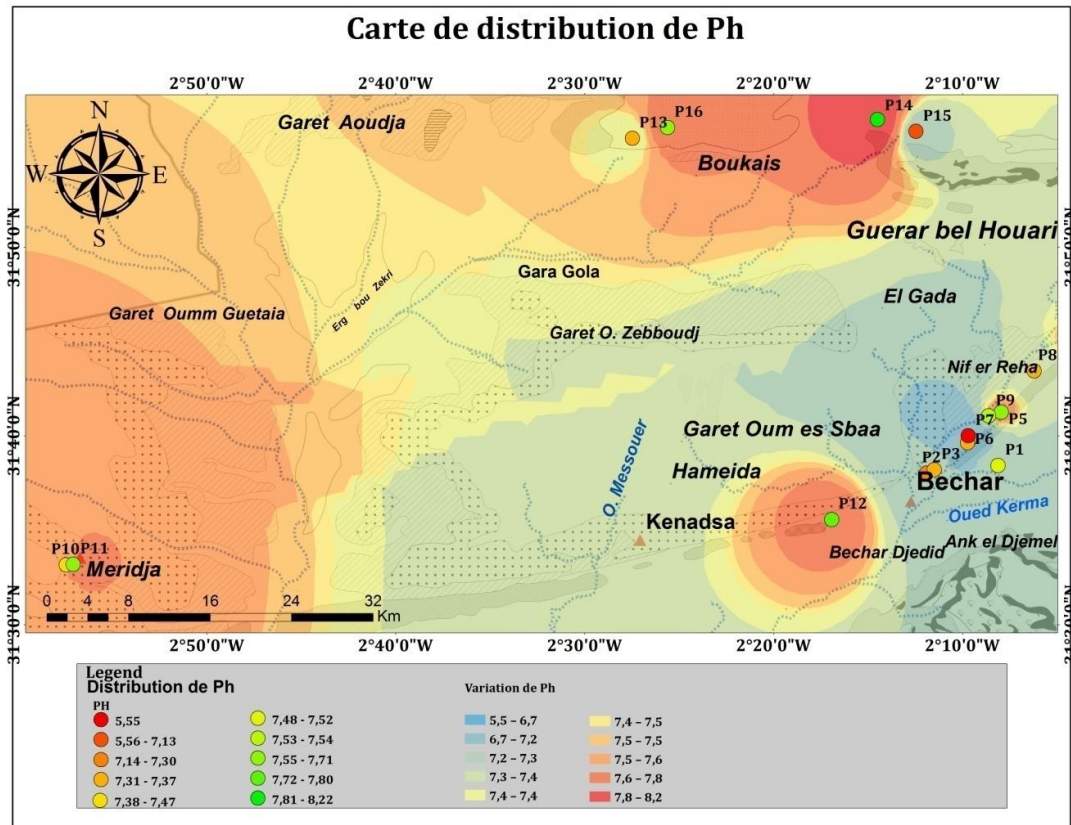


**Figure V.15 :** Carte de répartition du Température

### b. Le potentiel d'hydrogène

Le pH est un paramètre important de l'eau qui détermine la nature acide et alcaline de l'eau. Les normes recommandées du pH de l'eau de bonne qualité varient de 6,5 à 8,5 (les normes algériennes). Le pH des points est dans les normes prescrites pour l'eau potable dans l'ensemble de la zone d'étude et est majoritairement basique, ce qui permet

d'expliquer la bonne oxygénation des eaux. La carte de variation spatiale du pH (Fig. V.16) présente le pH de l'échantillon analysé en montrant que celui-ci varie de 5,5 à 8.2 pour l'année 2018. Un pH minimum (5,5) est observé à Ouakda (échantillons n° 6 et 7), tandis que le pH maximal (8.2) est observé au Nord-est de la zone d'étude près de Boukais (échantillon n° 5).



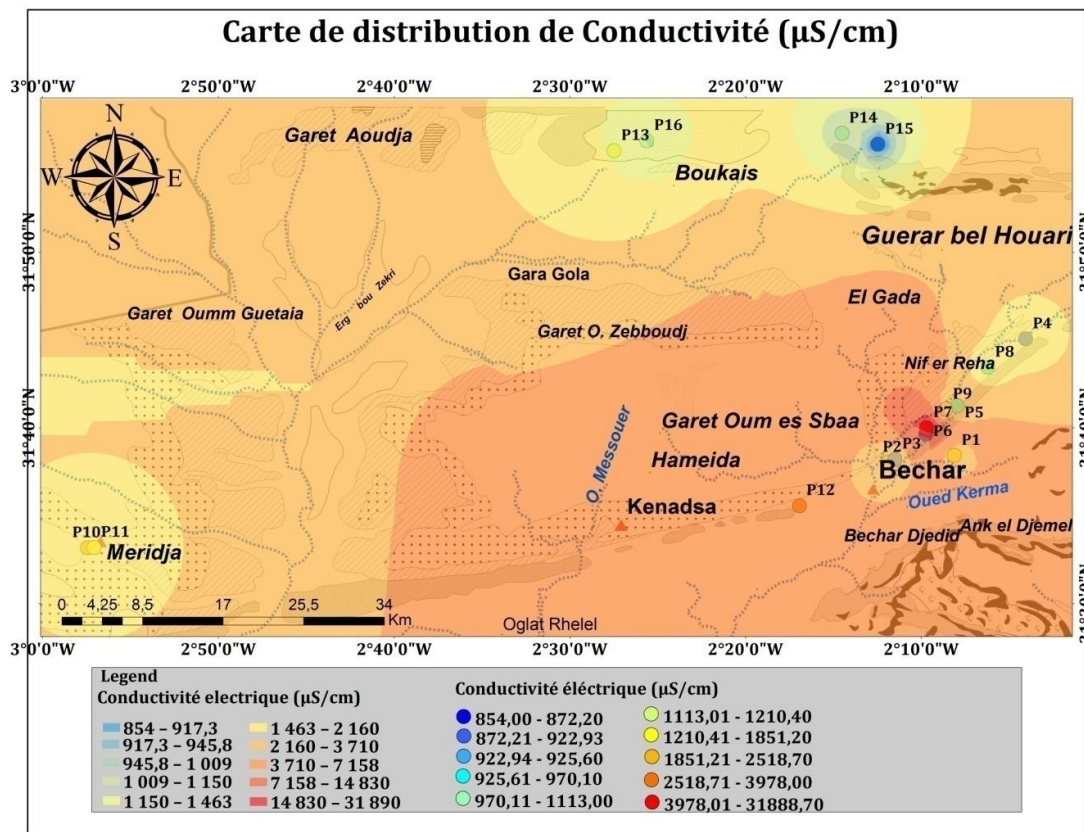
**Figure V.16:** Carte de répartition du pH dans la zone d'étude

### *c. La conductivité électrique*

La conductivité électrique est utilisée pour évaluer la salinité de l'eau d'irrigation. Elle peut être mesurée en micro-siemens ( $\mu\text{S}$ ) ou par centimètre ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) et peut être affectée par la présence de solides inorganiques dissous.

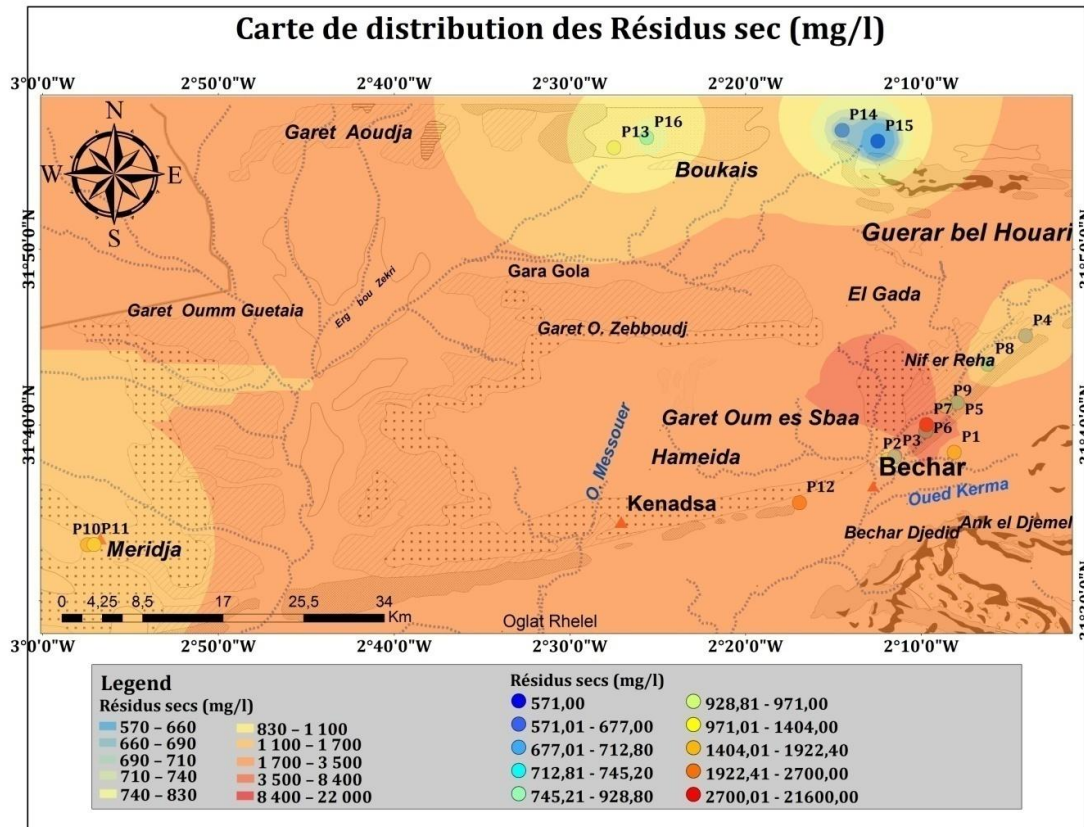
L'analyse de la carte de conductivité électrique (Fig. V.17) montre que les valeurs de la conductivité de la nappe du Turonien dans la zone d'étude sont très hétérogènes et comprises entre 854 et 31 889  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , soit une variation d'un facteur de 49.14, avec une moyenne de 3344  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et un écart type de 7644  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La majorité des eaux de la nappe du Turonien se trouve en-dessous de la norme recommandée pour les eaux potables (2800  $\mu\text{S} / \text{cm}$ ). La valeur minimale de la conductivité est enregistrée pour les points d'eau (P14 et P15) qui se trouvent dans la ville de Lahmer, reconnue pour la qualité de ses eaux

douces. En revanche, les valeurs élevées sont concentrées dans la partie centrale et la partie Sud - est de la zone d'étude près de la zone d'Ouakda, ce qui indique l'existence de processus de dissolution des minéraux provenant des bordures de calcaire, influençant par la suite la composition minérale et la qualité des eaux de la région.



**Figure V.17 :** Carte de répartition de la conductivité électrique (CE) dans la zone d'étude

Pour ce qui est de la carte de distribution des résidus secs (RS) (Fig. V.18), on constate que la répartition des concentrations des résidus secs dans la zone d'étude suit la même distribution que celle de la conductivité (CE), et les informations et les analyses qui peuvent être déduites sont que dans la nature, les résidus secs (RS) sont étroitement liés à la conductivité électrique (CE).



**Figure V.18 :** Carte de répartition des résidus secs (RS) dans la zone d'étude

### 5.3.4. Qualité chimique et répartition des ions des eaux

#### a. Le calcium et le magnésium ( $Ca^{2+}$ et $Mg^{2+}$ )

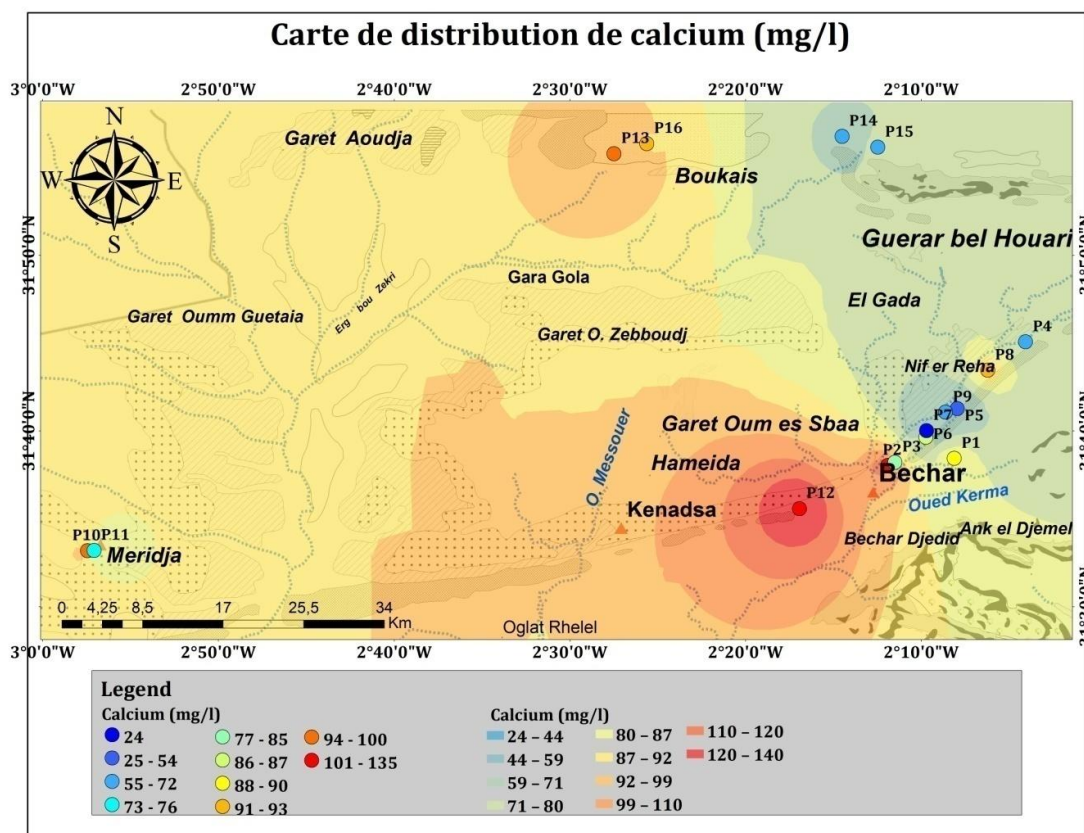
Le calcium et le magnésium sont les éléments naturels les plus abondants à la surface et dans les eaux souterraines et existent principalement sous forme de bicarbonates et dans une moindre mesure, sous forme de sulfate et de chlorure (Prasanth *et al.* 2012). Le magnésium est essentiel à l'activation de nombreux systèmes enzymatiques, mais il est également cathartique et diurétique. Le  $Ca^{2+}$  et le  $Mg^{2+}$  sont dérivés des roches silicatées ainsi que des gisements de dolomite (Sharma *et al.* 2016).

Selon la figure V.19, on distingue des valeurs de Calcium variant de 24 à 135 mg/l. La valeur moyenne de la concentration en ions calcium dans la zone d'étude est de 84 mg/l, avec un écart-type de  $\pm 26.08$ . La partie centrale et de celle de Sud-est de la zone sont dotées d'une concentration moyenne élevée de  $Ca^{2+}$ , tandis que la partie Nord-est a une faible concentration de calcium. Les valeurs élevées de calcium font référence à un processus de dissolution des couches calcaires dans ces zones. et peut aussi provenir de la chaux dans les engrais agricoles (Fig. V.19).

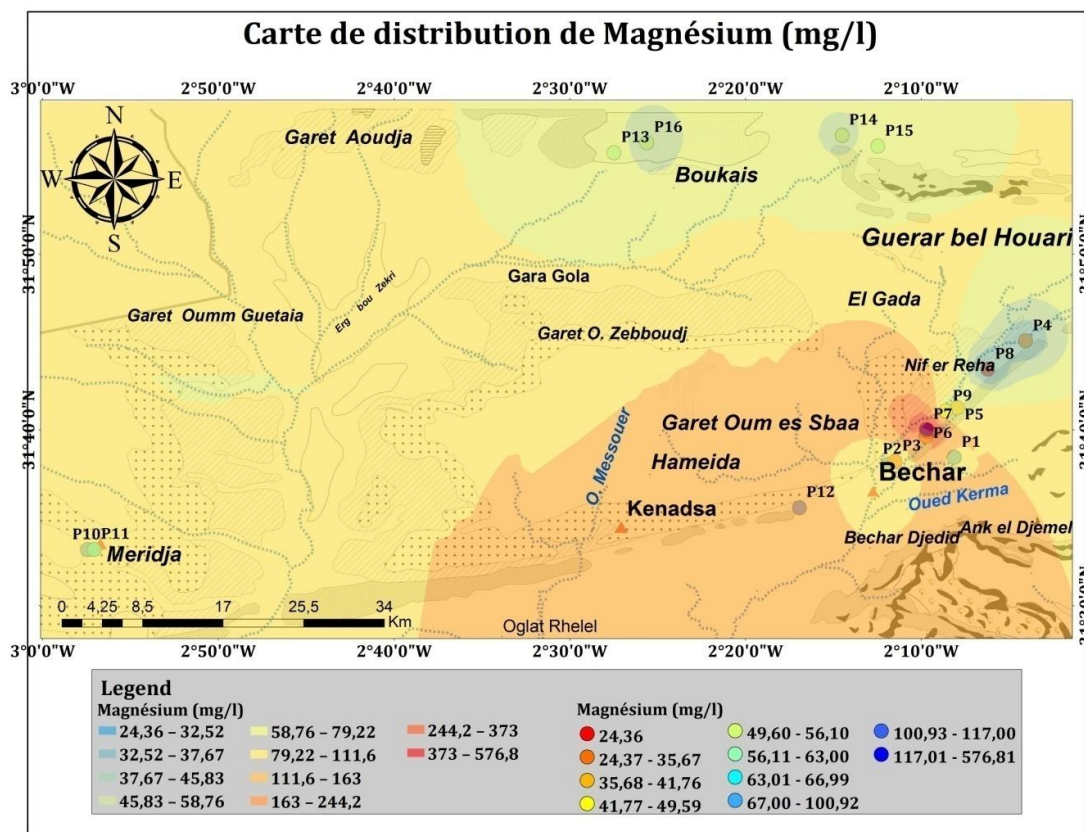
La concentration en ions magnésium varie de 24.36 à 576.8 mg/l avec une valeur moyenne de 93.43 mg/l ( $\pm 131.49$ ). La carte de distribution spatiale de l'ion  $Mg^{2+}$  (figure V.20)

montre que l'Est, le Nord - est et une toute petite partie Ouest de la zone d'étude sont occupées par de faibles concentrations de magnésium. La valeur maximale de magnésium a été enregistrée au centre de la zone d'étude dans le point d'eau (P12), ce résultat peut être expliquée par l'existence d'un processus de la décomposition de la dolomite, des minéraux ferromagnésiens dans cette zone. La limite admissible de concentration de calcium et de magnésium respective dans l'eau potable est de 200 mg/l et 150 mg/l, recommandée par la norme algérienne des eaux potable (2011).

En somme, les résultats actuels ont révélé que tous les échantillons d'eau sont inférieurs à la limite maximale admissible en magnésium (Tab. V.12), excepté pour un point d'eau, dont les valeurs excèdent le seuil admissible (576 mg/l).



**Figure V.19 :** Carte de répartition de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans la zone d'étude



**Figure V.20 :** Carte de répartition de magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans la zone d'étude

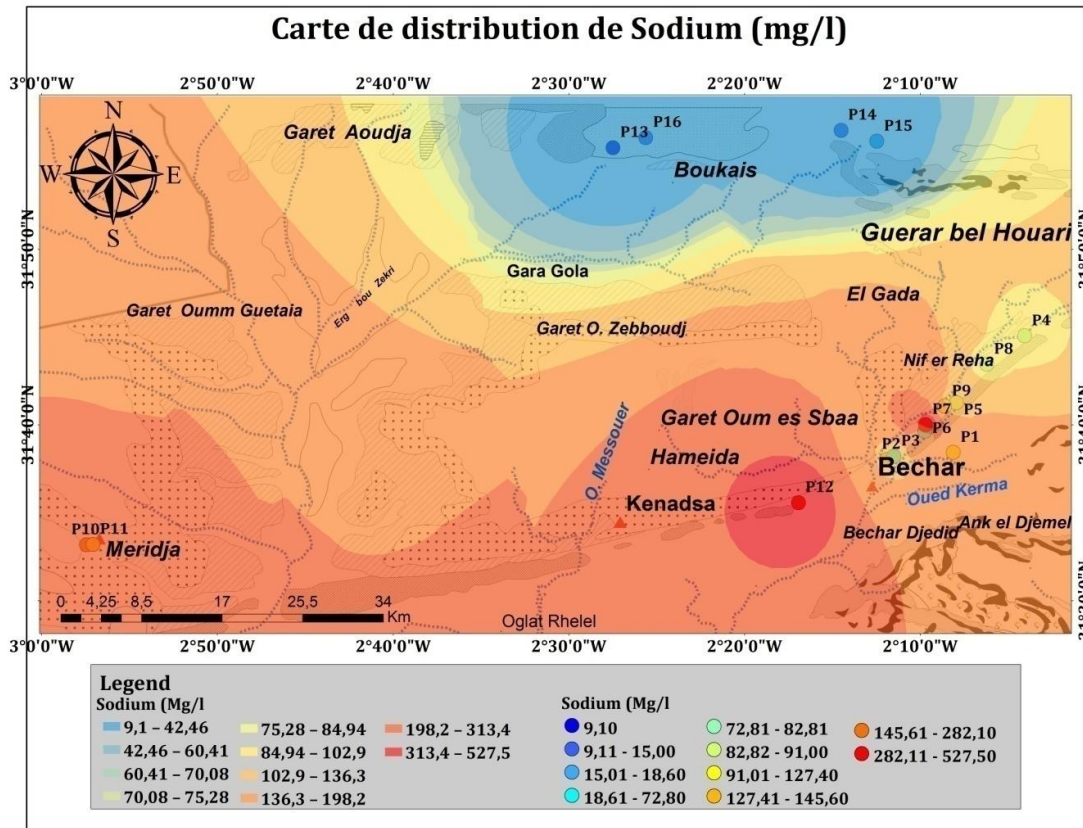
### ***b. Le sodium et le potassium***

Le sodium est l'une des substances les plus abondantes que l'on trouve dans l'eau naturelle et dans les roches. Dans cette étude, le sodium varie de 9.1 à 527 mg/l, avec une valeur moyenne de 141 mg/l ( $\pm 1.55$ ). Il peut être libéré par les minéraux argileux. Une consommation élevée de sodium peut causer de l'hypertension, des pathologies cardiovasculaires, des troubles nerveux et des problèmes rénaux (Magesh *et al.* 2012). La limite suggérée pour la concentration en sodium dans l'eau potable est de 200 mg/l (les normes algériennes 2011). La majorité des points d'eau de la zone d'étude ont une concentration en  $Na^+$  qui ne dépasse pas les seuils conseillés. La distribution spatiale du sodium dans la zone d'étude est représentée sur la figure V.21.

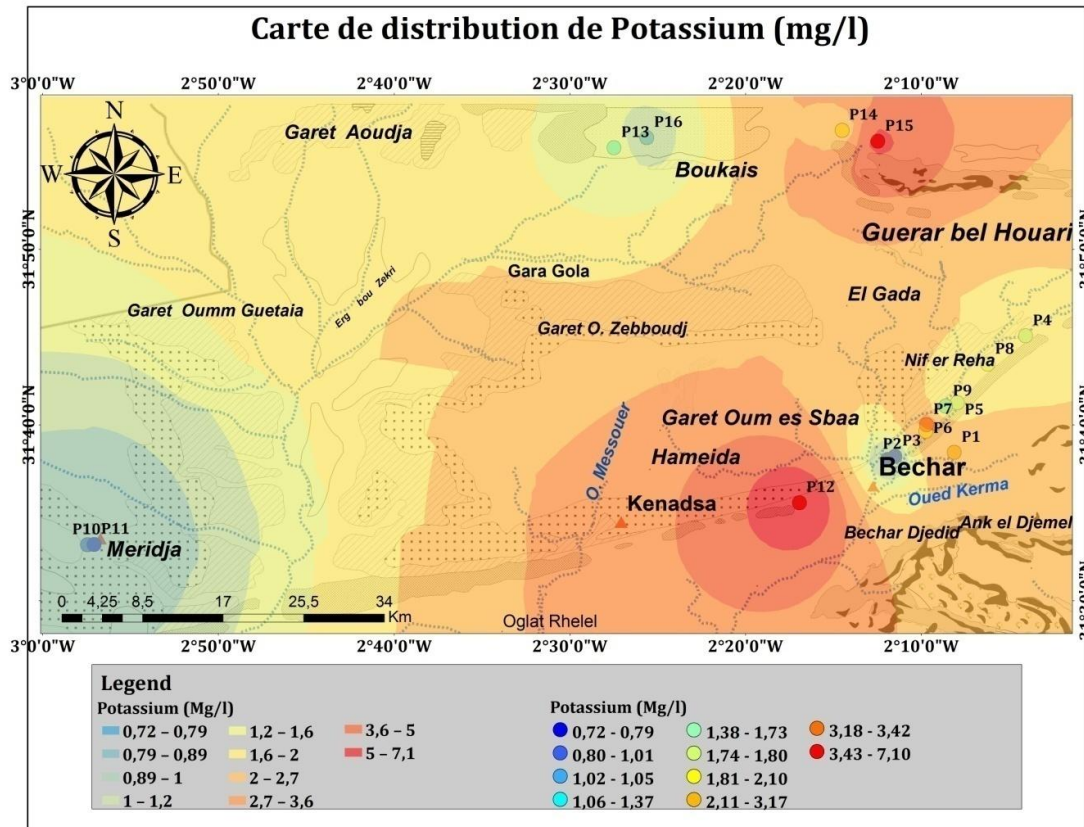
Le potassium  $K^+$  est un élément naturel, cependant sa concentration reste assez inférieure par rapport à  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  et  $Na^+$ . Le potassium est présent dans l'eau potable suite à l'utilisation du permanganate de potassium comme oxydant dans le traitement de l'eau (OMS 2011). La concentration en potassium de la zone d'étude varie entre 0,72 et 7,1 mg/l avec une valeur moyenne de 2.22 mg/l. La limite maximale admissible de  $K^+$  dans l'eau potable est de 12 mg/l, et on constate que la totalité des échantillons ont un seuil inférieur à la limite admissible par l'OMS (Tab. V.3). La forte concentration de  $K^+$  a été enregistrée pour le point d'eau (P12), cette concentration est due à l'effet des engrais utilisées dans les pratiques agricoles et d'autres activités



industrielles situées à proximité du site. Celle-ci diminue vers la partie Sud - ouest de la zone d'étude près de la ville de Meridja (Fig. V.22.).



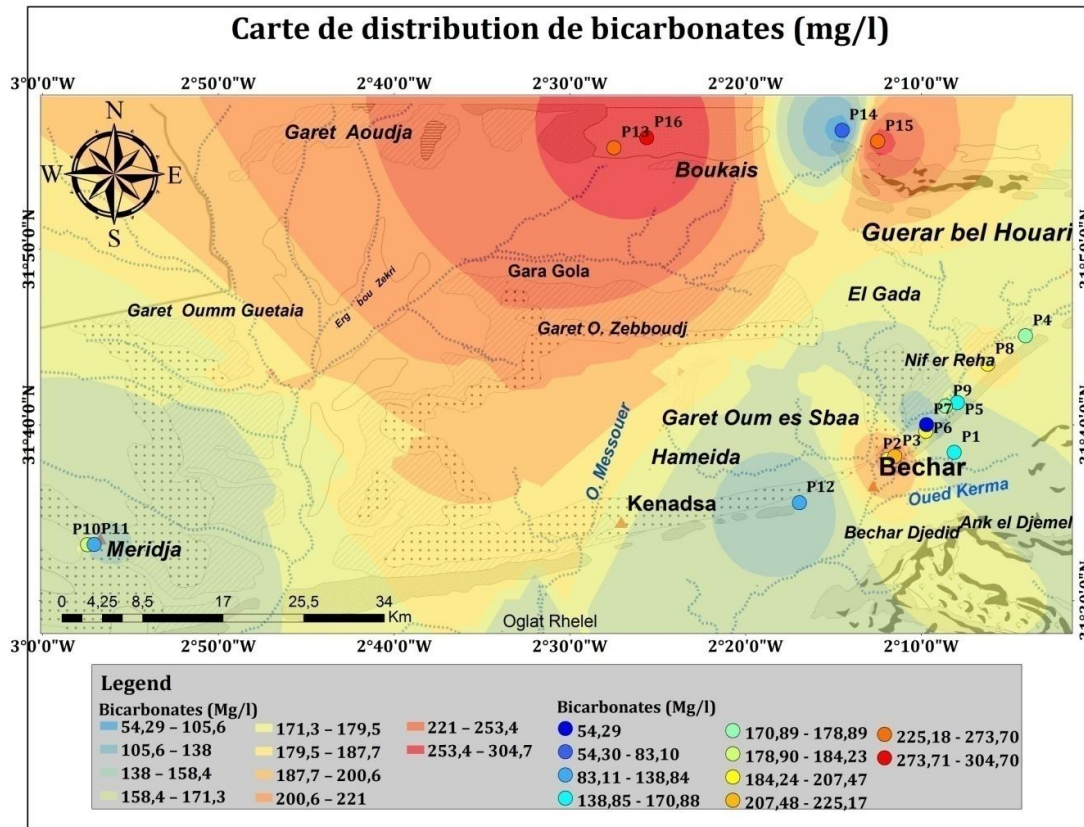
**Figure V.21 :** Carte de répartition de Sodium ( $\text{Na}^+$ ) dans la zone d'étude



**Figure V.22 :** Carte de répartition de potassium (K<sup>+</sup>) dans la zone d'étude

### *c. Les bicarbonates*

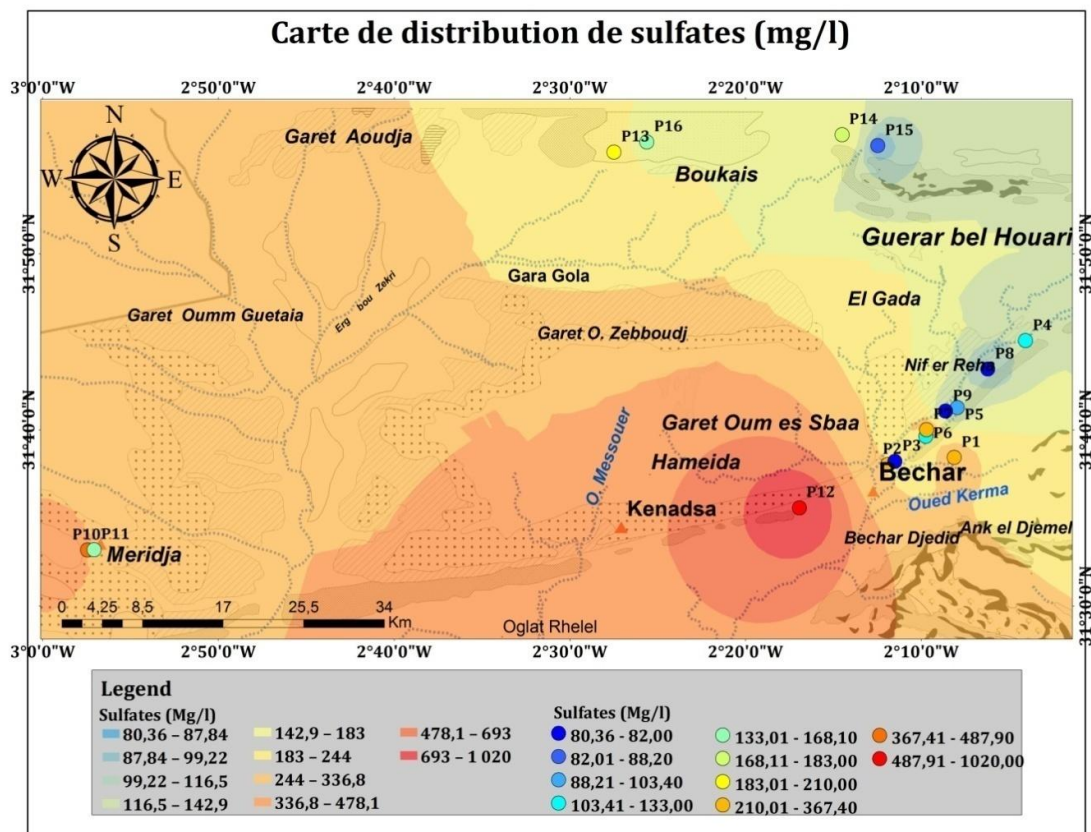
Dans la zone d'étude, le bicarbonate varie entre 54.29 et 304.7 mg/l, avec une valeur moyenne de 183 mg/l ( $\pm 64.3$ ). Sa répartition spatiale est illustrée en figure V.23, Les résultats ont montré que l'Ouest, le Sud - ouest et le Sud - est de la zone d'étude renferment relativement une faible concentration de bicarbonate, comparé aux autres paramètres ( $< 70$  mg/l) car le faciès chloruré sodique est dominant dans cette zone. La partie Nord contient une forte concentration de bicarbonate particulièrement pour les points d'eau P13 et P16 qui se situent dans le secteur administratif de la ville de Boukais. La forte concentration de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans la source d'eau souterraine indique une prédominance de la dissolution des minéraux silicatés (Stumm et Morgan 1996).



**Figure V.23 :** Carte de répartition de Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans la zone d'étude

#### d. Les sulfates

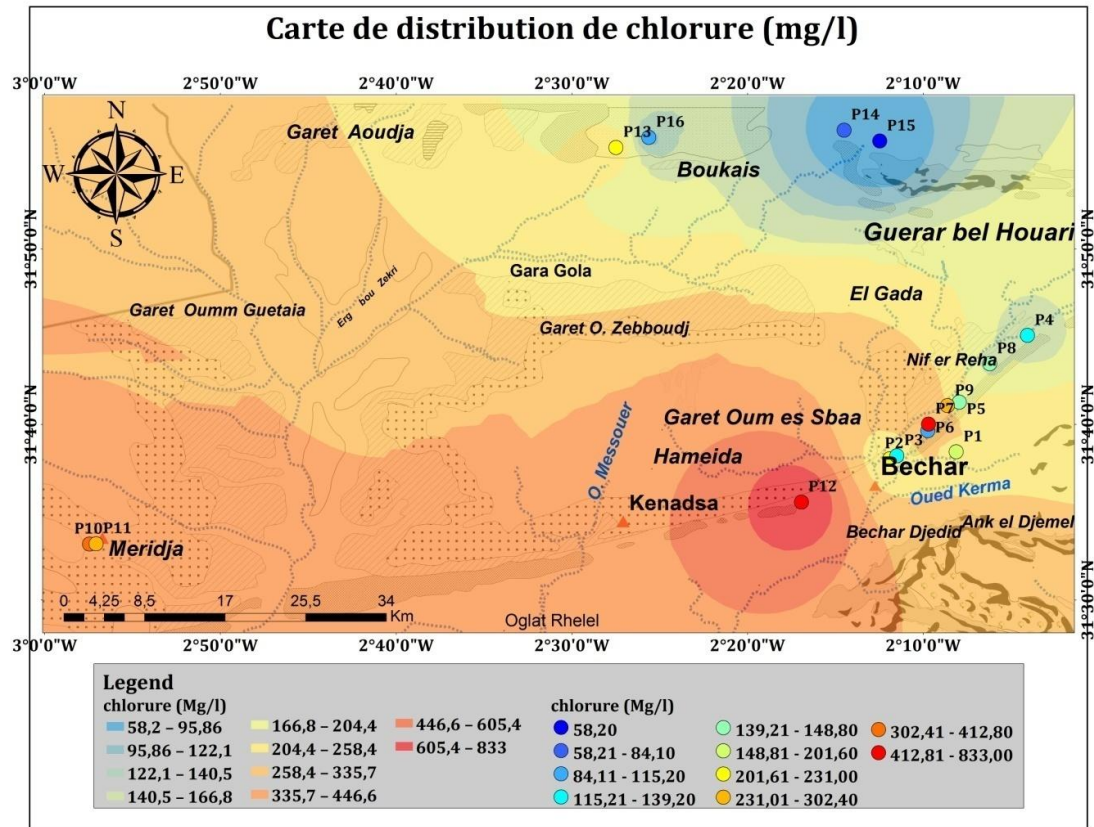
La concentration en sulfate varie de 80.36 à 1020 mg/l avec une valeur moyenne de 247.42 mg/l et un écart type de  $\pm 239.92$ . Selon le tableau (V.2), seulement deux points d'eau (forage 14 km et hassi equilibre 2) qui ont enregistré des concentrations supérieures à ( $> 400$  mg/l) ce qui indique que (87.5 %) des points d'eau se situent dans la limite souhaitable (200 et 400 mg/l). Les concentrations élevées des sulfates peuvent entraîner des risques de complications sur les organes humains si la valeur dépasse la limite extrême de 400 mg/l, pour l'eau potable (OMS 2011) (Ravi *et al.* 2014). La distribution spatiale de la concentration d'ions sulfate dans les eaux est illustrée sur la figure V.24 et les résultats ont montré qu'une concentration maximale de sulfate est observée dans la partie centrale et le Sud - est de la zone d'étude, tandis que de faibles concentrations sont notées dans la partie Nord - est près de la ville de Lahmer. L'origine probable des valeurs élevées de sulfates peut être due à une dissolution minérale à cause de l'existence d'une lithologie gypsifère, le facteur anthropique est aussi l'un des sources de sulfates (exploitation minière, engrais, etc.).



**Figure V.24 :** Carte de répartition des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

#### e. Les chlorures

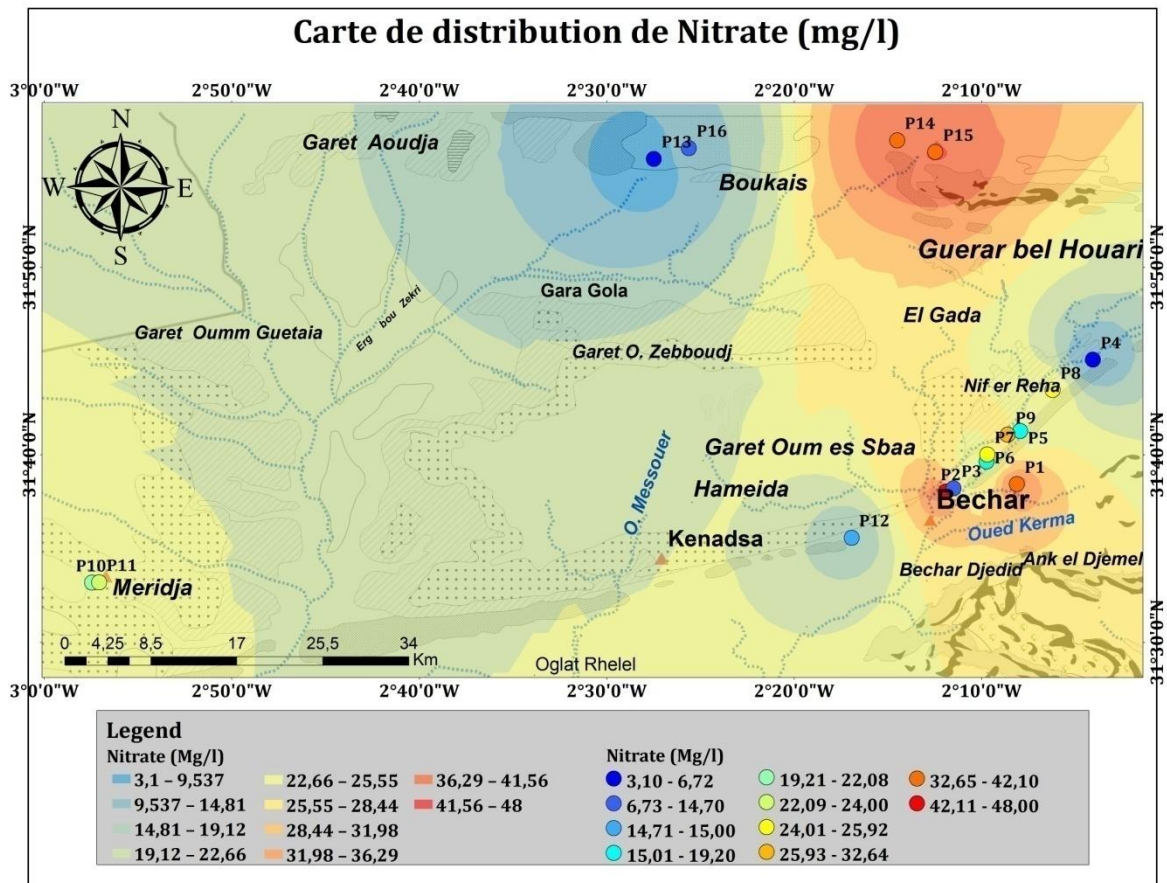
Les chlorures sont l'un des principaux anions inorganiques présents dans l'eau naturelle. Le chlorure peut être originaire ou accumulé dans les eaux souterraines en raison de l'altération et du lessivage des roches sédimentaires et des sols, des activités agricoles et des eaux usées domestiques. La concentration élevée de chlorure est considérée comme l'indicateur de la pollution par les déchets organiques à forte teneur en déchets d'origine animale ou industrielle (Selvakumar *et al.* 2017). Dans cette étude, cette concentration varie de 58.2 à 833 mg/l avec une valeur moyenne de 260.7 mg/l ( $\pm 226.88$ ). la valeur admissible pour le chlorure est 200 mg/l pour l'eau potable (OMS 2011), et l'étude révèle que 50 % des échantillons dépassent la limite maximale réglementaire de l'OMS. La distribution spatiale du chlorure dans la zone d'étude est représentée en figure V.25. La plus élevée en  $\text{Cl}^-$  est observée de la partie Sud - ouest jusqu'à la partie centrale de la zone d'étude. La partie Nord-Est est occupée par des concentrations moyennes en  $\text{Cl}^-$  de 58.2 à 95.86 mg/l. L'augmentation de la concentration en  $\text{Cl}^-$  entraîne des lésions cardiaques et rénales, une indigestion, (CPCB 2008).



**Figure V.25 :** Carte de répartition de **chlorure** (Cl<sup>-</sup>) dans la zone d'étude

#### *f. Les nitrates*

La carte de la distribution spatiale et de la concentration du NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans la zone d'étude est illustrée dans la figure V.26. Les valeurs de nitrates varient de 3.10 à 48 mg/l avec une valeur moyenne de 24.34 mg/l (± 12.90). La plus grande partie de la zone d'étude dispose d'une concentration en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> inférieure à 25 mg/l mais reste élevée dans la partie Nord - est. Ses origines peuvent être diverses. Elles peuvent provenir de la zone agricole, du site d'élimination des déchets et des industries présentes dans la zone d'étude. La concentration de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans les eaux souterraines de la zone d'étude est inférieure à la limite admissible de l'OMS (2011) qui est de (50 mg/l).



**Figure V.26 :** Carte de répartition de Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) dans la zone d'étude

## 6. Conclusion

La qualité des eaux souterraines est un critère primordial qui permet de déterminer si les eaux issues et extraites de la nappe du Turonien est propre à la consommation humaine et animale. Pour le confirmer, cette étude s'est proposée de réaliser une analyse hydrochimique des eaux de la nappe du Turonien, une représentation minérale de la nappe et une étude relative à la saturation ; par le biais d'une campagne d'échantillonnage sur 16 points de prélèvement (année 2018) et de leurs comparaisons avec des données préexistants de l'année 2013.

Certains paramètres tels que la température ( $^{\circ}\text{C}$ ), les solides dissous totaux (TDS), le pH et la conductivité électrique (CE), ont été mesurés à l'aide de dispositif de mesure, sur le terrain et directement après l'échantillonnage, le reste c'est-à-dire sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), chlorite ( $\text{Cl}^-$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), ont été mesurés par chromatographie ionique au niveau du laboratoire d'analyse chimique de l'ADE de Bechar.

Ces paramètres ont ensuite été comparés aux normes relatives à la qualité de l'eau, de l'OMS et des normes algériennes.

Les résultats de l'analyse des paramètres hydro-chimiques de la nappe du Turonien, ont permis de conclure que ces eaux sont caractérisées par une minéralisation normale, avec une salinité acceptable, elle-même caractérisée par l'accroissement de la concentration au fil des années considérées. Les plus fortes concentrations ont été enregistrées dans les points d'eau de moyenne profondeur avec un maximum de 1.99 g/l enregistrés en 2018. Les eaux de grande profondeur sont plus douces, un état qui s'explique par le phénomène de dissolution des :

- lentilles évaporitiques riches en sels existant dans le Sud de la zone d'étude,
- des formations carbonatées et gypseuses au Sud - est,
- et des formations de calcaires concentrés dans la partie Nord et Nord – est,

L'étude s'est poursuivie par la réalisation d'une représentation minérale des eaux souterraines de la nappe du Turonien en ayant recours au Diagramme de Piper. L'interprétation des diagrammes de Piper pour les deux campagnes a montré une variation de facies chimiques en fonction du temps et de l'espace, dans trois domaines de la zone d'étude et qui sont le facies chlorure sodique, le facies chlorure calcique et le facies sulfaté magnésienne.

Nous avons également eu recours à un autre type de diagramme, celui de l'échange ionique CAI-1 et CAI-2 à partir duquel on s'est aperçut que tous les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude se situent au-dessus de la ligne (0) avec un coefficient  $R^2 = 0,69$  et une pente de  $-1,26$ , ce qui indique l'occurrence d'échange ionique inverse dans la zone d'étude.

Enfin, pour prédire la minéralogie réactive du sous-sol, l'étude a réalisé une analyse de l'indice de saturation des eaux, qui a montré l'existence d'une saturation qui varie en fonction du temps pour le groupe des carbonatés (dolomite, calcite et l'aragonite). En revanche, l'autre groupe de minéraux (l'anhydrite, le gypse et l'halite) qui forme les évaporites est caractérisé par une sous saturation.

Pour compléter ce travail, nous avons effectué une analyse des composantes principales dans le but de déterminer la corrélation des paramètres entres eux. Les résultats de l'ACP indiquent que la plupart des paramètres physico-chimiques étudiés n'influencent pas la conductivité électrique, à l'exception de  $Mg^{+2}$ , TH et des résidus secs (RS). Il s'avère aussi que la conductivité électrique est influencée par les paramètres chimiques de l'eau qui se résument dans ce cas à la somme des cations majeurs et à la somme des anions majeurs.

---

# **Chapitre VI**

Qualité bactériologique des eaux  
souterraines et de surface

---



---

# CHAPITRE VI

## QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE

---

### 1. Introduction

Les microorganismes pathogènes contaminent l'eau, c'est maintenant un problème mondial majeur (Pandey et al., 2014). La principale cause de la présence de bactéries dans le milieu aquatique est l'élimination des déchets humains et des eaux usées municipales par les égouts et les fossés de drainage (sharma et al., 2017). Les fèces d'animaux à sang chaud mais des humains également, peuvent héberger des coliformes fécaux et sont les indicateurs les plus couramment utilisés de la pollution fécale de l'eau et des aliments (Cabral et al., 2010). Des niveaux accrus de coliformes fécaux fournissent un avertissement sur la défaillance du système de gestion des eaux usées et de la possible contamination par d'autres agents pathogènes tels que *E. coli*, *shigella spp.*, *Salmonella spp.*, *Choléra*, etc. (Pandey et al., 2014). La consommation d'eau potable insalubre et l'utilisation d'eau insalubre à des fins quotidiennes entraînent la prévalence de maladies telles que la diarrhée, la typhoïde, le choléra et la dysenterie bacillaire chez la population (Mahendra et al., 2018).

En outre, les eaux de surface contaminées par des bactéries pathogènes et résistantes aux antibiotiques est devenue un problème émergent à travers le monde (Amarasiri et al., 2020). Cette résistance aux antibiotiques exacerbe la prévalence des maladies d'origine hydrique, parmi les habitants des environs de ces zones humides (Henriot et al., 2019). Par conséquent, le maintien d'une eau de bonne qualité est essentiel à la survie des organismes aquatiques et à la santé des personnes qui y sont exposées.

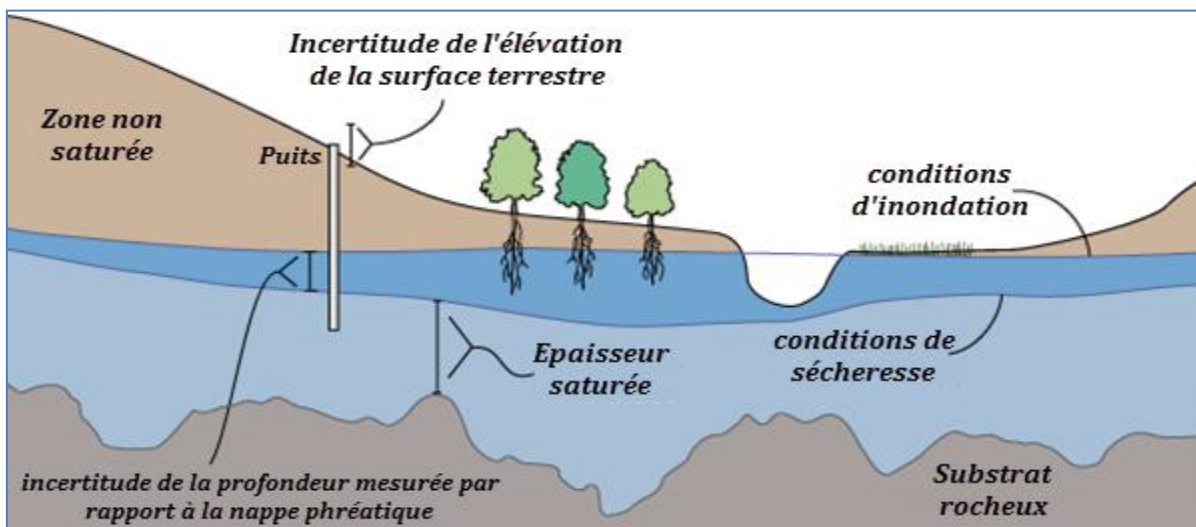
Dans cette optique, une analyse bactériologique des eaux souterraines fût lancée pour déterminer l'indice de qualité microbiologique de la zone d'étude, en utilisant des données extraites d'études antérieures.

## 2. Étude de la relation oued/ nappe

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est caractérisé par une ramification moyennement dense, composé d'affluents comme oued El Houari, oued Kerma, oued Berrihoua et oued Messouer, qui s'écoulent vers l'oued Béchar, principal cours d'eau du bassin versant de Béchar. Ce dernier suit son cours sur un tracé d'une longueur totale de 206.59 km et de direction Nord-est / Sud-ouest vers l'exutoire de Dait Tiour tout en traversant les deux villes d'Ouakda et le centre ville de la commune de Béchar.

L'analyse morpho métrique de l'oued Béchar révèle que l'intensité de la pente diminue le long du tracé du cours d'eau du sommet vers l'exutoire (0.97 % en amont, 0.33 % au centre et 0.12% dans la partie avale de l'exutoire), ce qui influe sur la vitesse d'écoulement qui est plus rapide vers le haut, pour s'affaiblir progressivement vers le bas. Ce constat prouve ainsi qu'il y a une corrélation directe entre la pente et la vitesse d'écoulement (Van Caillie 1989-90 ; Laouina *et al.* 2000 ; Morsli *et al.* 2004).

D'autres relations liant l'oued et les nappes sont l'effet des précipitations. En effet, le niveau de la nappe phréatique est spatialement variable et peut même l'être au sein d'une même zone. Ces fluctuations sont causées par le changement du régime des précipitations entre les saisons et les années. À la fin de l'hiver et au printemps, lorsque les précipitations sont élevées, le niveau de la nappe phréatique monte. A contrario, en été, le niveau de la nappe diminue puisqu'elle a tendance à alimenter les cours d'eau afin d'assurer un débit d'étiage proche du niveau normal retrouvé en hiver (Fig. VI.1). Cette relation (oued – nappe) peut également s'expliquer de manière plus technique à travers des études microbiologiques effectuées sur des points de prélèvements sur les rives des cours d'eau.



**Figure VI.1 :** relation d'échange entre l'oued et la nappe

## 2.1. Composition lithologique des berges et du lit de l'oued

D'une manière générale, la lithologie influe particulièrement sur la morphologie du cours d'eau (la pente et la vitesse d'écoulement). Les données et les études antérieures réalisées dans le secteur de recherche prouvent qu'il existe une large variété lithologique au niveau du lit et des berges de l'oued Béchar, où sont observées trois formations lithologiques de grande importance et classées selon la variation des pentes.

- Dans la première partie du cours d'eau (en amont) qui est caractérisé par une pente sévère de 0.97%, la structure lithologique se compose de blocs rocheux, de galets et d'alluvions ; la vitesse d'écoulement est forte et maximale, ce qui provoque une érosion sévère des berges et du lit de l'oued.

- Pour la deuxième partie qui se trouve au centre de l'oued, la pente diminue (0.33%) ce qui réduit la vitesse d'écoulement de l'oued et affaiblit sa force et sa capacité à charrier des éléments grossiers pour ne transporter que des petits blocs. C'est par ailleurs ces petits éléments (petits galets et limons) qui sont observés dans le lit d'oued.

- La troisième partie, soit la partie aval située à l'exutoire, à la plus faible pente du tracé (0.12 %). Elle se caractérise par l'élargissement de l'oued qui favorise l'accumulation des sédiments (zone de sédimentation), l'érosion y est très faible. Le lit et les berges de l'oued sont composés de sédiments fins tels que les limons, les argiles et les alluvions.

En définitive, l'étude du tracé de l'oued Béchar montre qu'une grande partie de son tracé (centre et aval) réunit les conditions nécessaires et suffisantes telles que la faible pente du tracé et des formations lithologiques perméables pour faciliter l'infiltration en profondeur des eaux de surface, ce qui permet également l'infiltration des polluants métalliques et des éléments bactériologiques vers les eaux souterraines de la région d'étude (Fig. VI.2 et VI.3).



**Figure VI.2 :** Écoulement de l'oued Béchar pendant une crue orageuse (Novembre, 2014)



**Figure VI.3 :** Eaux de l'oued mélangé aux eaux usées de la ville de Béchar.

Afin de mieux comprendre l'impact de la contamination des eaux souterraines par des polluants bactériologiques, quelques notions sur les germes pathogènes affectant la santé seront expliquées dans la section suivante.

### **3. Caractères biochimiques des germes pathogènes polluants les eaux**

Le protocole conventionnel des analyses bactériologiques des eaux souterraines se base nécessairement sur la recherche des germes pathogènes souvent résultant des matières fécales d'origine humaine et animale composées de germes de streptocoques et de coliformes, comme (Valenzuela et al., 2009):

#### **3.1. Les coliformes**

##### **3.1.1. Les coliformes totaux**

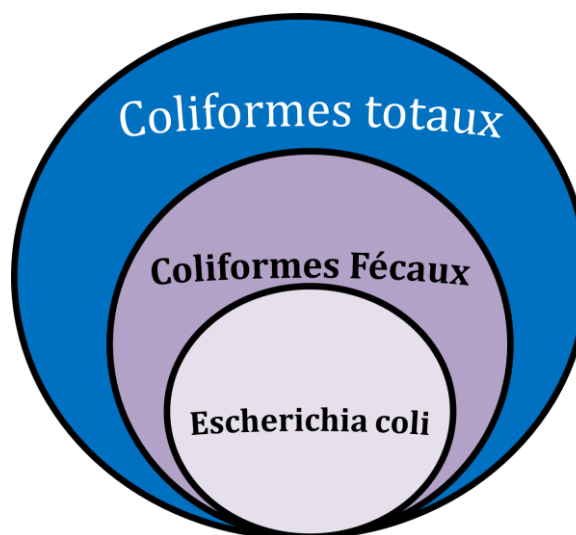
Sont communs dans l'environnement (sol ou végétation) et généralement inoffensifs. Toutefois, leur présence dans un échantillon prélevé dans une nappe suppose une faille dans la gestion des eaux usées et prouve que d'autres agents pathogènes peuvent également y pénétrer (Gerba, 2015). Il est important de trouver et de résoudre la source de la contamination

##### **3.1.2. Les Coliformes Fécaux (Escherichia – Coli)**

Escherichia – Coli (*E. coli*) est un sous-groupe de la famille des coliformes fécaux, lui-même (coliforme fécale) issu du sous-groupe de bactéries coliformes totales (Fig.VI.4)

(Zulhafizal et al., 2019). La plupart des bactéries E. coli sont inoffensives même si certaines souches peuvent provoquer des maladies et existent dans les intestins des humains et des animaux à sang chaud (Satoshi et al., 2008). La présence d'E. Coli dans un échantillon d'eau potable indique généralement une contamination fécale récente. Cela signifie qu'il y a un plus grand risque de présence d'agents pathogènes (Price et al., 2017).

**Figure VI.4 :** Relations entre les coliformes totaux, coliformes fécaux et Escherichia – Coli



### 3.2. Les streptocoques

Les entérocoques appartiennent au groupe des streptocoques, ce sont des bactéries à Gram positif, non sporulées qui se présentent sous forme de coques isolés ou arrangés en paires ou en chaînettes (Isnard, 2017). Ces bactéries ubiquistes, sont présentes dans différentes niches écologiques telles que le tractus intestinal des mammifères dont l'homme ; on les retrouve également dans les eaux usées, l'eau douce, l'eau de mer et le sol (Isnard, 2017). Ces germes sont communément utilisées comme indicateur de contamination d'origine fécale afin de tester la qualité hygiénique des échantillons environnementaux (eaux utilisées pour la consommation) mais aussi alimentaires (Wheeler et al. 2002). Elles peuvent provoquer toute une gamme d'infections, dont des endocardites, des infections urinaires, des prostatites, des infections intra-abdominales, une cellulite et des infections de plaies, ainsi que des bactériémies concomitantes.

### 3.3. Les salmonella

La salmonellose est une maladie causée par une infection de la bactérie Salmonella. Il s'agit principalement d'une infection intestinale, mais dans un petit nombre de cas, elle peut infecter la circulation sanguine et provoquer des infections focales, telles que des abcès et une méningite dans presque toutes les parties du corps (Gordon, 2008). Les bactéries Salmonella sont subdivisées en sérotypes en fonction de leurs propriétés biochimiques. Bien que la salmonellose puisse survenir tout au long de l'année, dans la

plupart des cas elle survient pendant l'été (Tizard, 2004). La salmonelle peut être trouvée dans les intestins d'animaux d'élevage ou les eaux contaminées (Andrade et al., 2003).

### 3.4. Le vibrion cholérique

*Vibrio cholerae* est un anaérobie facultatif, tige incurvée ne formant pas de spores, d'une longueur d'environ 1,04 à 1,06  $\mu\text{m}$ . C'est un pathogène humain facultatif trouvé dans les eaux et qui provoque la maladie gastro-intestinale aiguë, choléra, qui constitue une menace sanitaire majeure dans les pays pauvres (Osunla et al., 2017).. Il est largement reconnu comme l'un des plus importants agents pathogènes d'origine hydrique d'une importance économique dans le monde entier. La détection de *V. cholerae* dans les denrées alimentaires est problématique, puisqu'ils sont présents à un faible niveau avec un grand nombre de microflore concurrente et qu'ils peuvent également être endommagés par différentes méthodes de transformation des aliments (Maheshwari et al., 2011).

## 4. Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau : les maladies de transmission hydrique

Les maladies d'origine hydrique apparaissent lorsqu'une personne avale de l'eau contaminée par des bactéries, quelques exemples sont donnés dans le tableau suivant (Lara et al., 2011 :

**Tableau VI.1** : Exemples de maladies microbiennes associées à l'eau (Lara et al., 2011)

Bactérie pathogène	Maladies
<i>Vibrio Cholerae (Choléra)</i>	Il s'agit d'une maladie diarrhéique aiguë causée par une infection de l'intestin par la bactérie toxigène <i>Vibrio Cholerae</i> séro groupe O1 ou O1239
<i>Salmonella - shigella.spp</i>	Gastro-entérite, il s'agit d'un terme global utilisé pour désigner l'inflammation du tube digestif qui résulte généralement d'une infection
Genre <i>Leptospira</i> (leptospirose)	Maladie bactérienne qui affecte les humains et les animaux, elle est causée par des bactéries du genre <i>leptospira</i>
<i>Shigella Dysenteriae et Shigella Flexneri</i> (dysenterie)	Maladie inflammatoire de l'intestin, en particulier du côlon, qui entraîne toujours une diarrhée sévère et des douleurs abdominales
Type d'agent pathogène de <i>L'Escherichia Coli générale</i>	Diarrhée infantile: diarrhée chez les enfants de moins de 2 ans

Bien qu'elles causent un certain nombre de maladies, les agents pathogènes rassemblés dans le tableau VI.1, peuvent facilement et efficacement être éliminés, notamment par le traitement de l'eau potable (traditionnellement par filtration et

chloration). Ce n'est cependant pas le cas de toutes les bactéries puisque certaines développent une bonne résistance à la désinfection et persiste dans l'environnement ([van Elsas et al., 2011](#)). C'est le cas particulièrement des protozoaires, parasites résistants au chlore, comme les oocystes de *Cryptosporidium parvum* et divers virus entériques, une situation particulièrement préoccupante ([Omarova et al., 2018](#)).

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle il est important d'utiliser l'indicateur approprié pour chaque groupe pathogène (s) considéré.

### **5. Analyse bactériologique**

En raison du manque de matériel nécessaire au protocole d'analyse au sein du laboratoire universitaire, nous n'avons pas pu effectuer d'analyses bactériologiques. Nous nous sommes donc tournés vers la bibliographie existant sur le sujet et avons utilisé les travaux de ([Kabour et al., 2015](#)) et de ([Kendouci et al., 2013](#)) , la localisation des points d'eau traités dans ces études sont illustrés dans la figure suivante ( [Fig. VI.5](#)).

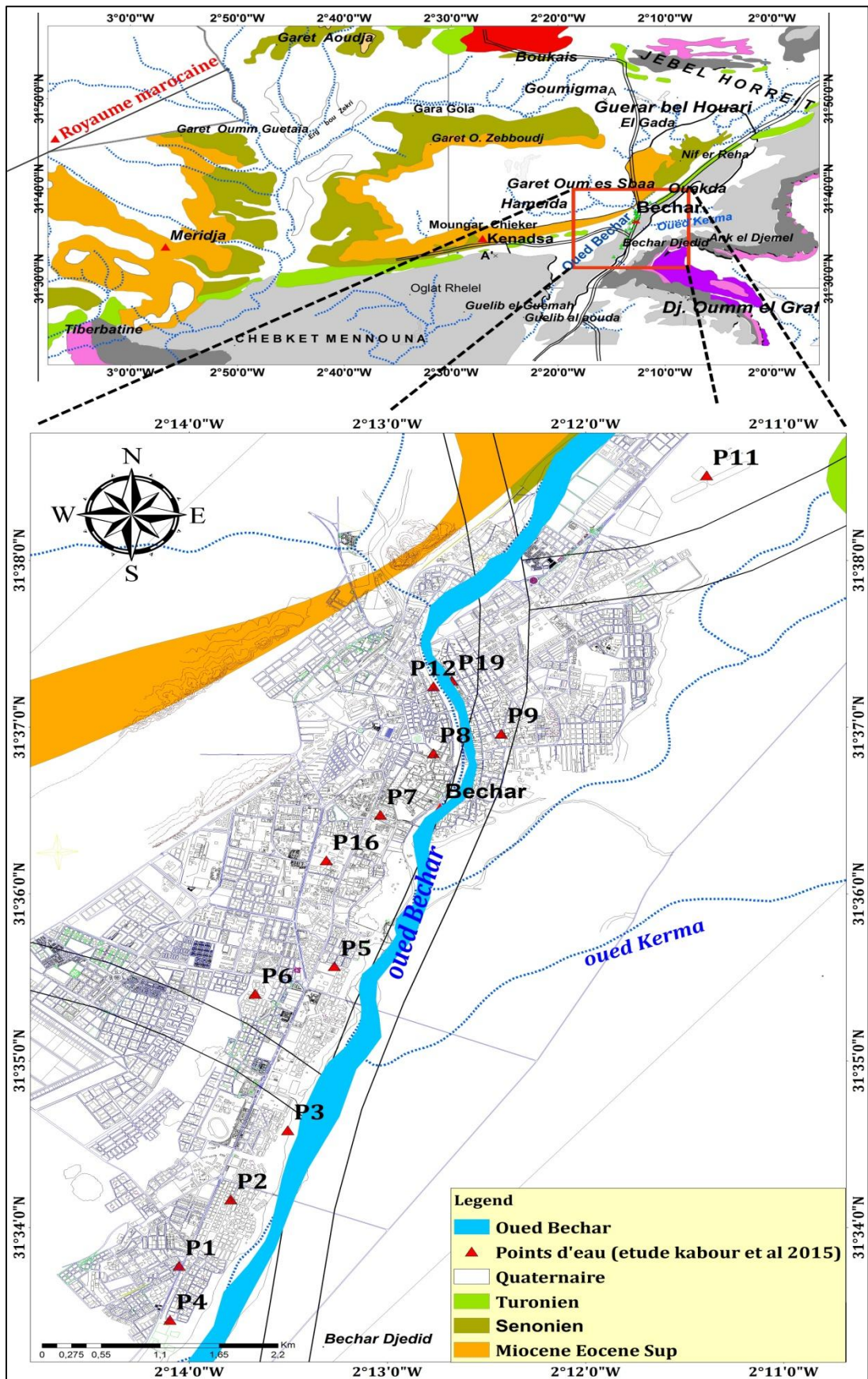
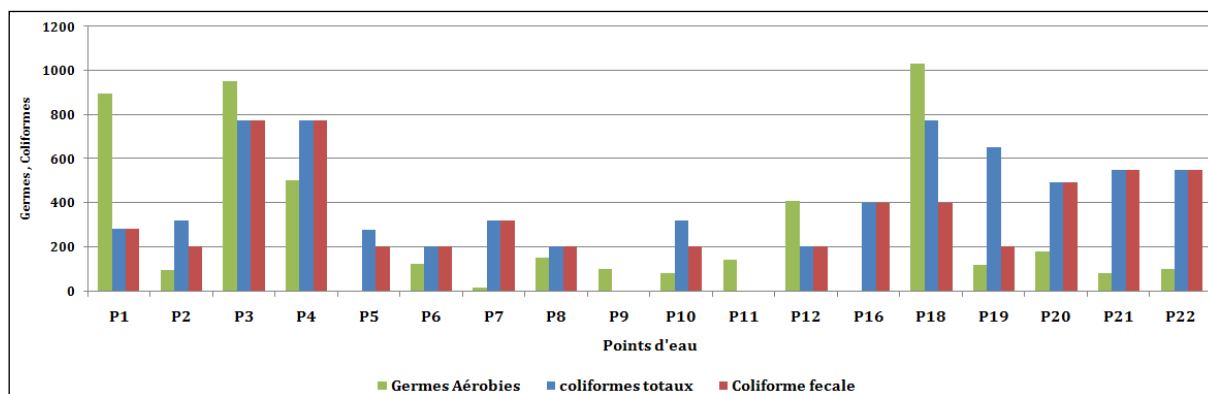


Figure VI.5 : Points d'eau traités dans l'étude de l'indice de qualité microbiologique (Kabour et al.2015)





**Figure VI.6 :** diagramme de variation des germes aérobies, coliformes totaux et fécaux (Kabour et ,2015)

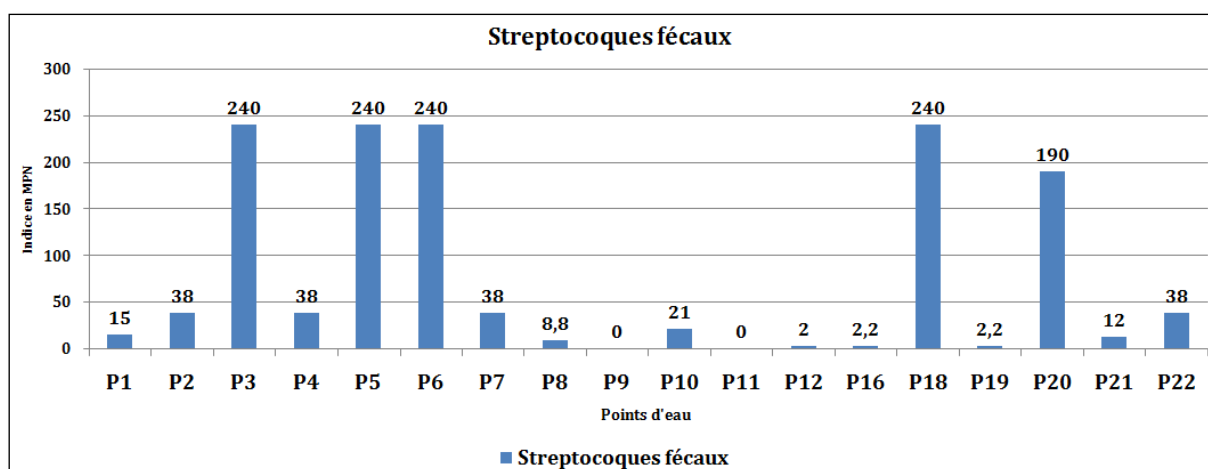
A partir du diagramme (Fig. VI.6), on observe une hétérogénéité des résultats des indicateurs bactériologiques où :

- Les valeurs maximales pour les germes anaérobies sont enregistrées pour les points d'eau (P1, P3 et P18).

- Les concentrations maximales des coliformes totaux sont enregistrées au niveau des points (P3, P4 et P18).

- Les concentrations maximales des coliformes fécaux sont enregistrées pour les points P3 et P4 (775 MPN).

Les trois points d'eau (P3, P4 et P18) sont très proches du lit de l'oued Bechar, la nappe alluviale se trouve à faible profondeur en dessous de la surface, ce qui facilite l'infiltration d'un débit important des eaux de surface vers la nappe contrairement aux autres points d'eau où la nappe se trouve plus en profondeur (P9 et P11) et apparaissent donc moins vulnérables à la pollution bactériologiques.



**Figure VI.7:** diagramme de variation des streptocoques fécaux dans la zone d'étude (Kabour et ,2015)

Pour ce qui est du digramme (Fig. VI.7) relatif aux streptocoques fécaux, on observe presque les mêmes variations qu'avec les autres germes (aérobies coliformes totaux et fécaux en (Fig. VI.6), c'est-à-dire des concentrations maximales enregistrées pour les points d'eau (P3, P5, P6 et P18). On note également que la majorité des points d'eau dépassent la norme algérienne (0 /100 ml), excepté les points P9 et P11.

Quant à la distribution spatiale et aux valeurs des points d'eau, on remarque que les valeurs maximales sont distribuées du Nord vers le Sud (amont - aval), ce qui correspond à une grande concentration des débits des eaux sanitaires déversées par la ville de Béchar.

Suivant cette étude (Kabour *et al.*, 2015), une constatation peut être faite : tous les points d'eau traités ont quasiment des valeurs nettement plus élevées que la norme algérienne de potabilité en vigueur. Bien que les points utilisés dans notre étude soient différents des points de l'étude de Kabour *et al.* (2015), les résultats de ce dernier peuvent être extrapolés à notre étude puisqu'il s'agit de la même nappe, celle du Turonien.

## 6. Calcul de l'indice de qualité microbiologique (IQM)

Le processus de calcul de l'indice de qualité microbiologique (IQM) est basé sur le traitement des données qui correspondent aux indications de la contamination fécale (Bovesse et Depelchin, 1980). L'IQM est calculé à partir des concentrations dans l'eau des coliformes totaux, fécaux et E. coli.

Cinq classes de concentration sont définies pour chacun de ces paramètres (Tab. VI.2). L'IQM est la moyenne des numéros de classe de chaque paramètre. La classification des paramètres pollués est effectuée selon cinq classes de qualité (Tab. VI.3) correspondant aux couleurs standards (Fig. VI.8).

**Tableau VI.2** : Classes de qualité correspondant aux différents paramètres.

Classes	Coliformes totaux /ml	Coliformes fécaux /ml	Streptocoques fécaux
5	< 2000	<100	<5
4	2000 - 9000	100 - 500	5 - 10
3	9000 - 45,000	500 - 2500	10 - 50
2	45,000 - 360,000	2500 - 20,000	50 - 500
1	>360,000	>20,000	>500

**Tableau VI.3** : Classification des paramètres pollués selon cinq classes de qualité (IQM).  
Contamination fécale IQM.

IQM	Contamination fécale
4.3 - 5.0	nul
3.5 - 4.2	faible
2.7 - 3.4	modérée
1.9 - 2.6	fort
1.0 - 1.8	très fort

Pollution nulle
Pollution faible
Pollution modérée
Pollution forte
Pollution très forte

**Figure VI.8:** Classes de qualité correspondant aux couleurs standards

Selon le tableau VI.4 qui présentent les résultats obtenus suite à l'application de la méthode [Bovesse et Depelchin \(1980\)](#) pour extraire l'indice de qualité microbiologique (IQM), on constate que plus de la moitié des points d'eau étudiés (66.66 %) présente des indices microbiologiques faibles, ce qui confirme l'existence de traces de contamination par un polluant. En revanche, 33.33 % des points d'eau indiquent l'absence totale de contamination (classe 5 = Nulle). Ceux-ci localisés dans la partie amont du tronçon de l'oued correspondent aux valeurs de faible concentration (des polluants), comparé à la partie aval de l'oued.

**Tableau VI.4 :** Résultats d'application de la méthode de [Bovesse et Depelchin, 1980](#) (l'indice de qualité Microbiologique IQM)

Points d'eau	Paramètres bactériologiques			IQM	Contamination
	coliforme totaux	coliforme fécaux	Streptocoques fécaux		
P1	280	280	15	4	faible
P2	320	200	38	4	faible
P3	775	775	240	3,66	faible
P4	775	775	38	4	faible
P5	275	200	240	3,66	faible
P6	200	200	240	3,66	faible
P7	320	320	38	4	faible
P8	200	200	8,8	4,33	nulle
P9	0	0	0	5	nulle
P10	320	200	21	4	faible
P11	0	0	0	5	nulle
P12	200	200	2	4,66	nulle
P16	400	400	2,2	4,66	nulle
P18	775	400	240	3,66	faible
P19	650	200	2,2	4,66	nulle
P20	490	490	190	3,66	faible
P21	550	550	12	3,66	faible
P22	550	550	38	3,66	faible

## **7. Conclusion**

A l'instar des régions sous-développées, la zone d'étude est exposée au risque de pollution des eaux souterraines par des agents pathogènes.

Ces bactéries sont retrouvées dans les nappes souterraines à travers un processus simple qui consiste dans un premier temps à rejeter les eaux usées et polluées non traitées dans les oueds et les cours d'eau, ou qu'il y ait une défaillance dans le système de gestion des effluents urbains. Les eaux de surface contaminées passent ensuite dans les nappes en profondeur par l'interaction de différents facteurs tels que les pentes faibles, la lithologie perméable et l'infiltration des eaux. A ce stade, la contamination des eaux de surface et souterraine est jugée permanente.

L'étude bactériologique effectuée dans ce chapitre et appliquée à la nappe du Turonien, conclut que les ressources hydriques dans la zone d'étude sont exposées à des risques de contaminations accrus par les différents agents pathogènes de type coliformes totaux et fécaux qui sont des bactéries issues des fèces d'origines humaines et animales. Le degré de risque de contamination varie d'un point d'eau à un autre. Toutefois, l'étude a montré que quasiment tous les points d'eau traités ont des valeurs nettement plus élevées que la norme algérienne de potabilité en vigueur.

La consommation par l'homme ou l'animal de ces eaux contaminées par des micro-organismes isolés, les exposent à des complications sanitaires et des maladies telles que le Choléra, la gastro-entérite, la diarrhée infantile,...), c'est la raison pour laquelle l'organisation mondiale de la santé (OMS) ainsi que les services sanitaires algériens recommandent le suivi de mesures fermes qui ont pour but de protéger les ressources hydriques de toute pollution éventuelle.

---

# **Chapitre VII**

Vulnérabilité à la pollution et  
protection des ressources en eau

---

---

# CHAPITRE VII

## VULNERABILITE A LA POLLUTION ET PROTECTION DES RESSOURCES EN EAU

---

### 1. Introduction

Durant les dernières années, la modélisation de la contamination des eaux souterraines à grande échelle et la nécessité d'une planification stratégique pour la protection des aquifères ont été l'objet d'une attention considérable (Winter et al., 1998). Les contaminants des eaux souterraines comprennent les polluants inorganiques tels que l'arsenic, l'aluminium, le plomb, le mercure, le fer et les nitrates et les polluants organiques artificiels tels que les pesticides, les plastifiants et les solvants chlorés (Sharma et al., 2017). En conséquence, il est essentiel de surveiller et d'évaluer la qualité des eaux souterraines, en particulier dans les régions où les eaux souterraines sont la principale source d'eau potable.

Ce chapitre sera dédié à l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution à travers l'élaboration de cartes de vulnérabilité, en y intégrant un ensemble de données. La méthode utilisée à cet effet, le modèle DRASTIC, est un outil d'évaluation relative, conçu pour produire des cartes de potentiel de pollution de l'ensemble des États-Unis par une approche non subjective normalisée pour comparer la vulnérabilité à la pollution dans différentes zones (Colins et al., 2016).

Pour cette raison, les classes de poids et les côtes ont été considérées comme des constantes qui ne pouvaient pas être modifiées, faute de quoi la comparaison entre différentes zones n'aurait pas été possible. Seuls deux paramètres, le milieu aquifère et l'impact de la zone vadose, se sont vu attribuer une côte typique et une côte variable, cette dernière permettant de sélectionner une valeur typique ou d'ajuster la valeur en fonction de connaissances plus spécifiques. L'application de cette méthode dans la zone d'étude est discutée dans les sections suivantes.

Les paramètres DRASTIC ont été saisis dans le logiciel ArcView GIS sous forme de couches vectorielles. Les cotes et les poids ont été attribués aux paramètres DRASTIC, tels qu'indiqués par (Aller et al. 1987b). Les cotes de tous les paramètres DRASTIC ont ensuite

été ajoutées pour obtenir la cote totale de la cellule. Pour tous les paramètres, les cartes illustrent une variation de notation de 1 à 10, des nuances plus foncées indiquant des notes plus élevées. Les détails du processus concernant tous ces paramètres sont présentés dans la section suivante.

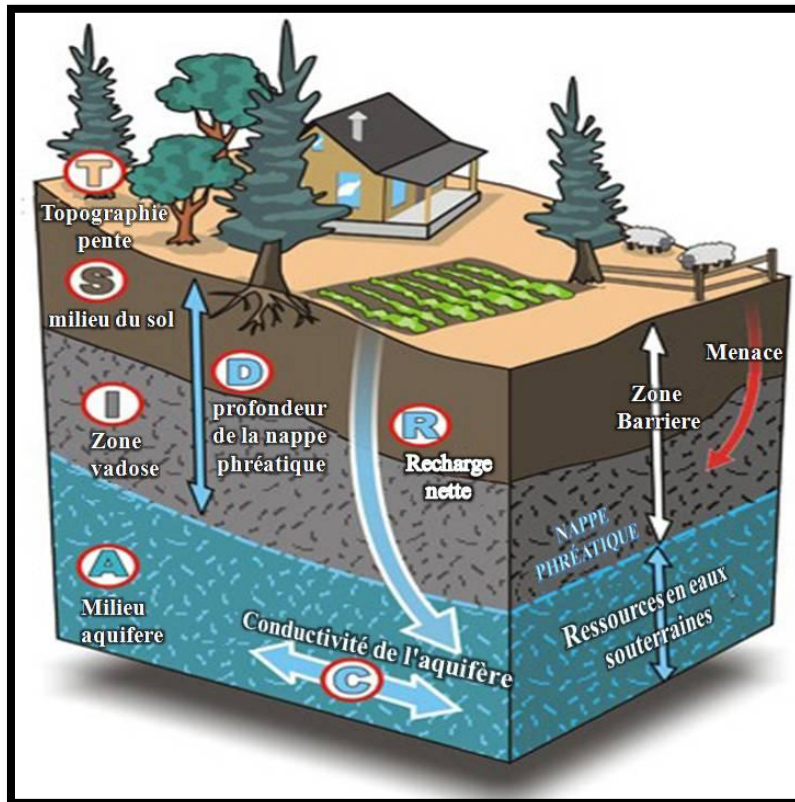
## 2. Cartographie de vulnérabilité DRASTIC

DRASTIC est l'une des techniques de cartographie de vulnérabilité paramétrique les plus connues et les plus utilisées. Elle a été développée dans le cadre d'un projet EPA (Environmental Protection Agency) aux États-Unis dans le but d'aider les gestionnaires, les planificateurs et les administrateurs. La méthode DRASTIC est facile à mettre en œuvre et peut être utilisée dans de vastes régions, en raison de son faible coût d'application et de la facilité de collecte des données requises (Zhang et al., 2013). De nombreux chercheurs l'ont appliquée pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à travers le monde comme par exemple en Iran (Saatsaz et al., 2011 ; Aminreza et al., 2014), en Jordanie (Al-Rawabdeh et al., 2013 ; Awawdeh et al., 2010), en Europe (Bastida et al., 2009 ; Vidal Montes et al., 2016), aux États-Unis (Baker, 2002) et en Afrique (Ouedraogo et al., 2016 ; Esterhuyse et al., 2017).

Cette méthodologie utilise sept paramètres hydrogéologiques, un avantage selon Panagopoulos (2006), puisque la sélection de nombreux paramètres et leur interrelation diminuent la probabilité d'ignorer certains paramètres importants, limitent l'effet d'une erreur accidentelle dans le calcul d'un paramètre et améliorent ainsi la précision statistique du modèle en améliorant la fiabilité de l'indice de vulnérabilité (Colins et al., 2016).

Cette méthode de vulnérabilité par indice de recouvrement est basée sur les caractéristiques physiques et hydrogéologiques de l'aquifère pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque (Oroji, 2019).

L'acronyme DRASTIC représente des variables quantitatives et catégoriques, notamment: la profondeur de l'eau, la recharge nette, le milieu aquifère, le milieu du sol, la topographie, l'impact de la zone vadose et la conductivité hydraulique. La Figure VII.1, affiche le diagramme schématique des paramètres DRASTIC.



**Figure VII.1** : définition des paramètres DRASTIC (source : [www.frakturmedia.net](http://www.frakturmedia.net))

Le modèle DRASTIC est selon l'approche Delphi réalisé par un comité d'experts afin que le poids et les taux des paramètres ne puissent pas être modifiés (Gheisari, 2017). La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'aide de DRASTIC suppose certains points, qui sont :

- Le contaminant est rejeté à la surface de la terre (utilisation d'engrais, combustion du charbon et lixiviation des métaux des résidus de charbon-cendres, etc.).
- Le contaminant s'infiltre dans les eaux souterraines par précipitation.
- Le contaminant se déplace avec la vitesse de l'eau.
- La zone concernée doit être de 100 acres (0,4 km<sup>2</sup>) ou plus.

L'indice DRASTIC original ( $D_i$ ) a été calculé en appliquant une combinaison linéaire de tous les paramètres comme démontré par (Aller et al., 1987b), Eq. VII.1 :

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=n} (W_j R_j) \quad (VII.1)$$

$D_i$  : indice de vulnérabilité global d'une unité cartographique

$W_j$  : facteur de pondération du paramètre  $j$

$R_j$  : indice du paramètre  $j$

$N$  : nombre de paramètres pris en compte



L'indice de vulnérabilité est un indice sans dimension et une mesure relative de la sensibilité à la pollution; les régions avec une valeur d'indice DRASTIC plus élevée sont plus vulnérables que celles avec un indice inférieur (Abdullah et al., 2016) . La plage d'indice peut être de 70 à plus de 200. De plus, dans cette méthode, les paramètres sont pondérés de 1 à 5 et les notations sont de 1 à 10, sur la base de la contribution relative à la contamination potentielle (Tab. VII.1). Les paramètres DRASTIC ont été expliqués brièvement dans les sections suivantes.

**Tableau VII.1** : Poids attribués pour des paramètres Drastic (Aller et al., 1987b)

paramètres	Echelle de poids
Profondeur des eaux souterraines	5
La recharge nette de l'aquifère	4
Milieu aquifère	3
Milieus de sol	2
Topographie	1
Impacte de la zone vadose	5
La conductivité hydraulique	3

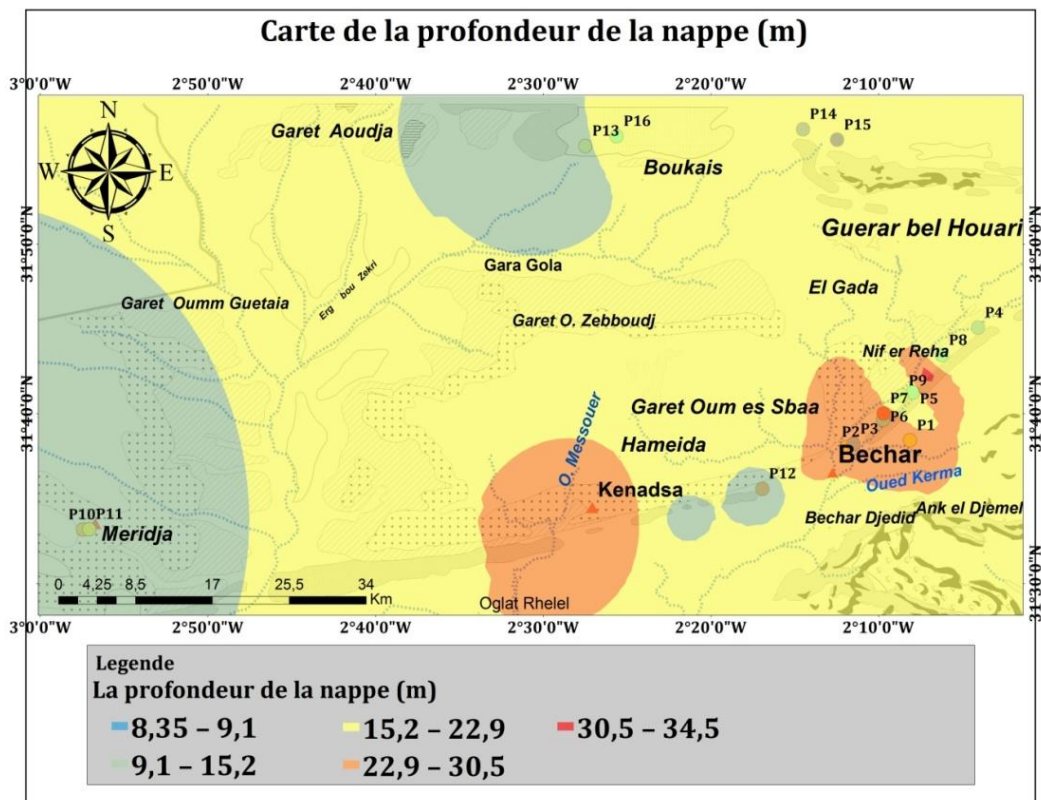
## 2.1. Profondeur des eaux souterraines

La nappe phréatique est l'expression de la surface où tous les espaces poreux sont remplis d'eau sous le niveau du sol (Aller et al. 1987b). La distance que l'eau doit parcourir pour atteindre les eaux souterraines, combinée à la facilité avec laquelle le mouvement se produit, joue un rôle considérable dans la détermination de la vulnérabilité d'une zone à la contamination. Les zones avec une nappe phréatique élevée sont plus vulnérables à la contamination que les zones avec une nappe phréatique plus profonde si les matériaux sous-jacents sont les mêmes. En général, la nappe phréatique élevée ne procure pas aux eaux d'infiltration contaminées suffisamment de temps de contact avec le matériau de l'aquifère pour que le processus d'atténuation associé soit efficace en vue d'éliminer la contamination. Par conséquent, la profondeur des eaux souterraines a reçu le poids maximal (5) pour déterminer la vulnérabilité à l'aide de la méthode DRASTIC (Tab VII.1).

La carte de la profondeur des eaux souterraines de la zone d'étude a pris uniquement en considération la dernière campagne 2018 puis a été classée selon la cote DRASTIC (Tab VII.2) ; le résultat est présenté en figure VII.2.

**Tableau VII.2:** L'intervalle et la notation de la profondeur des eaux souterraines d'après (Aller et al., 1987b)

Profondeur des eaux souterraines	
intervalle	notation
0 - 1.5	10
1.5 - 4.5	9
4.5 - 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9– 30.5	2
>30.5	1



**Figure VII.2:** Carte d'évaluation de la profondeur des eaux souterraines

Cette carte montre cinq classes de notation (1, 2, 3, 5 et 7). La nappe phréatique la moins profonde a été observée dans les parties Ouest, Nord et centrale de la zone d'étude, ce qui lui confère un potentiel de vulnérabilité très élevé à la pollution (scores de 7). La profondeur moyenne de la nappe qui s'est vu attribuer une cote de 3, est observée dans une très grande partie de la zone d'étude, tandis que la nappe la plus profonde d'une cote de 1, n'est présente

que dans la zone de Ouakda qui se trouve à l'Est de la zone d'étude et qui dispose d'un aquifère profond non confiné.

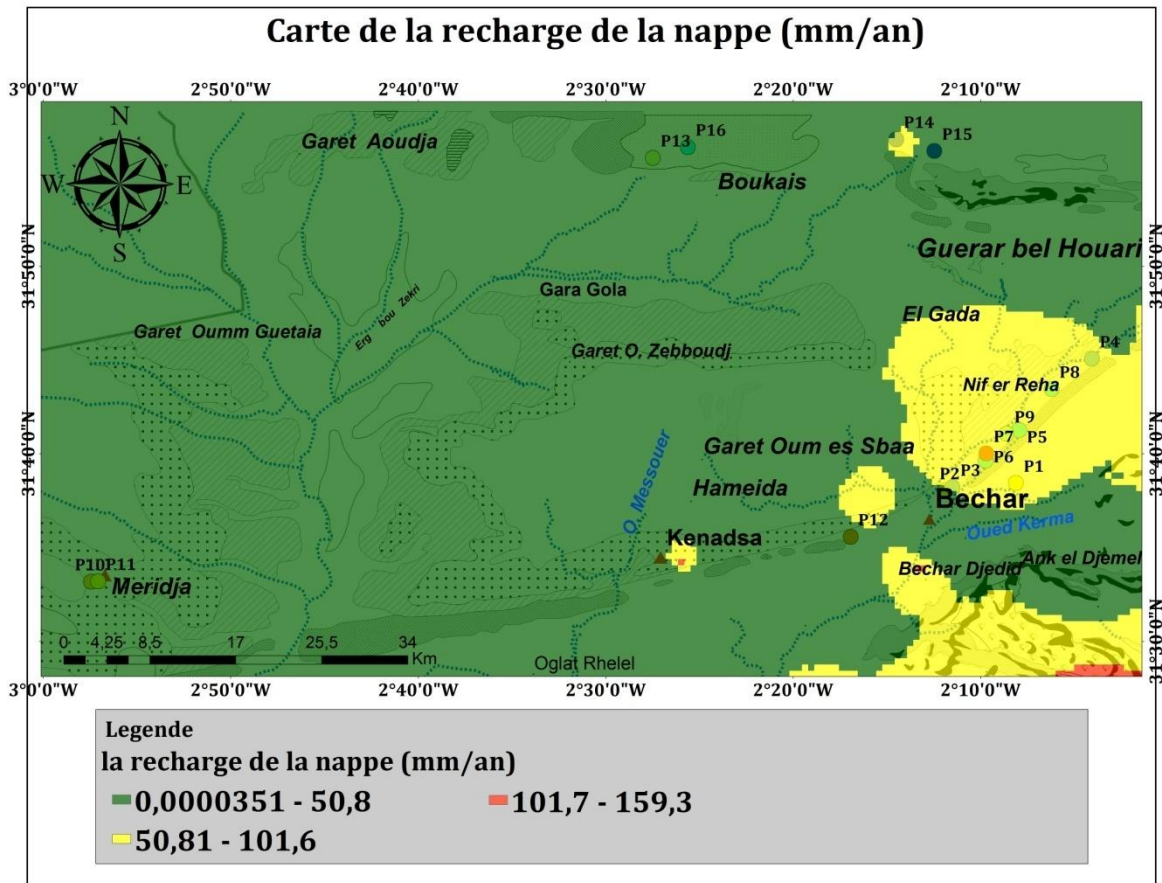
## 2.2. Recharge nette

La principale source d'eau souterraine est généralement due aux précipitations, qui s'infiltrent à travers les strates du sol et percolent jusqu'à la nappe phréatique. Le débit de retour de l'irrigation s'ajoute également à la recharge des eaux souterraines. La «recharge nette» représente la quantité totale d'eau, qui est appliquée à la surface du sol et s'infiltré pour atteindre l'aquifère. Il comprend la quantité annuelle moyenne d'infiltration et ne prend pas en compte la distribution, l'intensité ou la durée des événements de recharge. La recharge est importante car c'est un véhicule principal pour la lixiviation et le transport des contaminants solides ou liquides vers la nappe phréatique. Par conséquent, plus la recharge est élevée, plus le potentiel de pollution est élevé. La recharge nette a reçu un poids «4» dans la méthode DRASTIC (Tab.VII.1). La reclassification de la carte de recharge nette, préparée plus tôt, a été effectuée selon la cote DRASTIC et la deuxième couche de paramètres a été générée.

La carte de la recharge nette (Fig. VII. 3) montre trois classes de notation (1, 3 et 6) selon le tableau VII.3 ; Le score le plus élevé (6) correspond à la partie sud-est, qui présente une forte activité agricole et également un certain nombre de paléo-canaux du cours d'eau de Tighelieine. Une recharge nette moyenne a également été observée dans la partie Est et Sud-est de la zone d'étude, Tandis que le score le plus bas de 1 a été observé dans la majorité de la zone d'étude.

**Tableau VII.3** : L'intervalle et la notation de la recharge nette d'après (Aller et al. 1987b)

Recharge nette	
Intervalle	Notation
0 – 50.8	1
50.8 – 101.6	3
101.6 - 177.8	6
177.8 – 254.0	8
>254.0	9

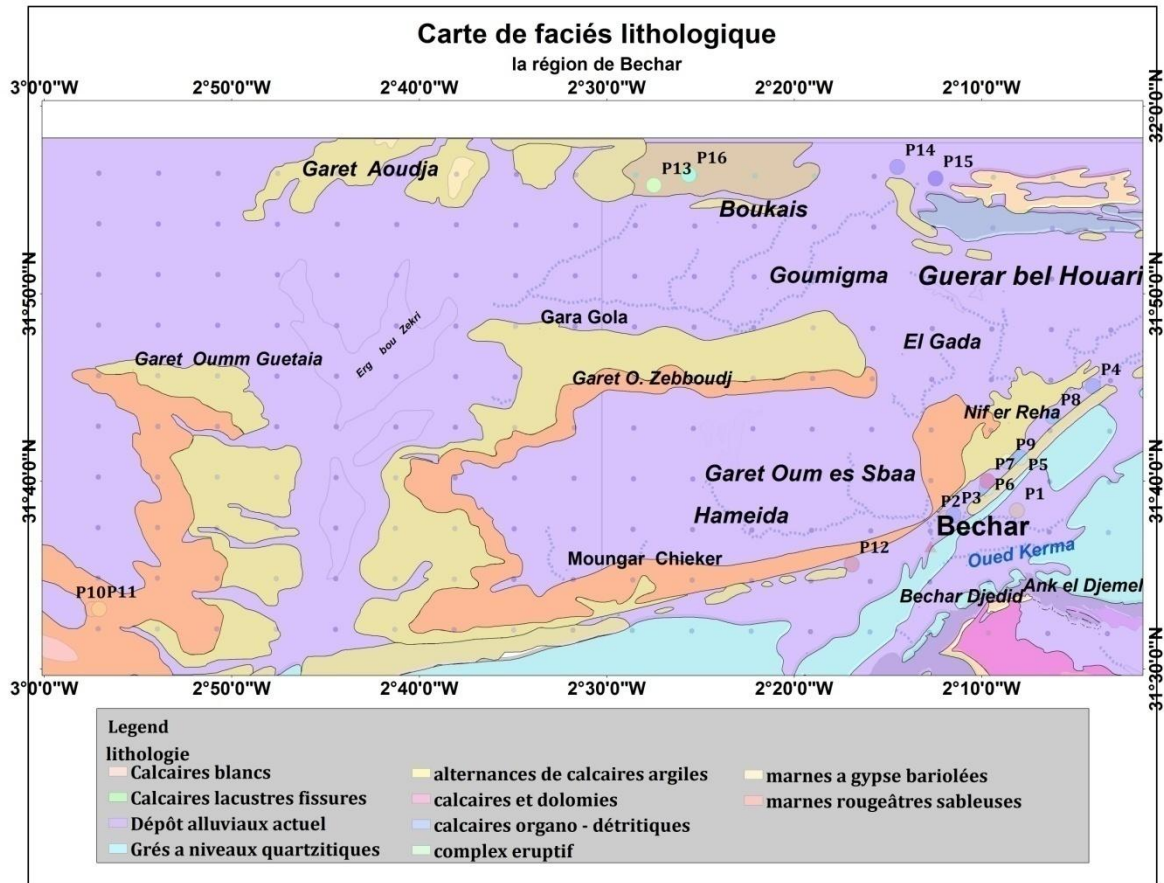


**Figure VII.3:** Carte des taux de recharge nette

### 2.3. Milieux aquifères

Le milieu aquifère désigne le milieu consolidé ou non consolidé qui sert d'aquifère, comme le sable, le gravier ou le calcaire (Aller et al. 1987b). Ce paramètre a reçu un poids «3» dans la méthode DRASTIC (Tab.VII.1).

La description géologique de la zone d'étude indique que les aquifères sont de nature calcaire, avec une cote entre «4» et «9» (la cote typique est 6) (Aller et al., 1987b; Tab.VII.4). Vu que l'ensemble de la zone d'étude est une zone de dépôt alluviale typique, une seule valeur de notation typique de ce paramètre est appliquée. En d'autres termes, la zone ne reflète aucune variation spatiale significative dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'égard des milieux aquifères.



**Figure VII.4:** Carte de faciès lithologique

**Tableau VII.4 :** Classification des milieux aquifères d'après (Aller *et al.* 1987b).

Milieux aquifères		
Intervalle	Notation	Notation typique
Schiste massif	1 – 5	2
Métamorphique / igné	2 – 5	3
Métamorphique altéré / igné	3 – 5	4
Séquences minces de grès, calcaire et schiste	5 – 9	6
Grès massif	4 – 9	6
Calcaire massif	4 – 9	6
Sable et gravier	4 – 9	8
Basalte	2 – 10	9
Calcaire karstique	9 - 10	10

## 2.4. Milieux de sol

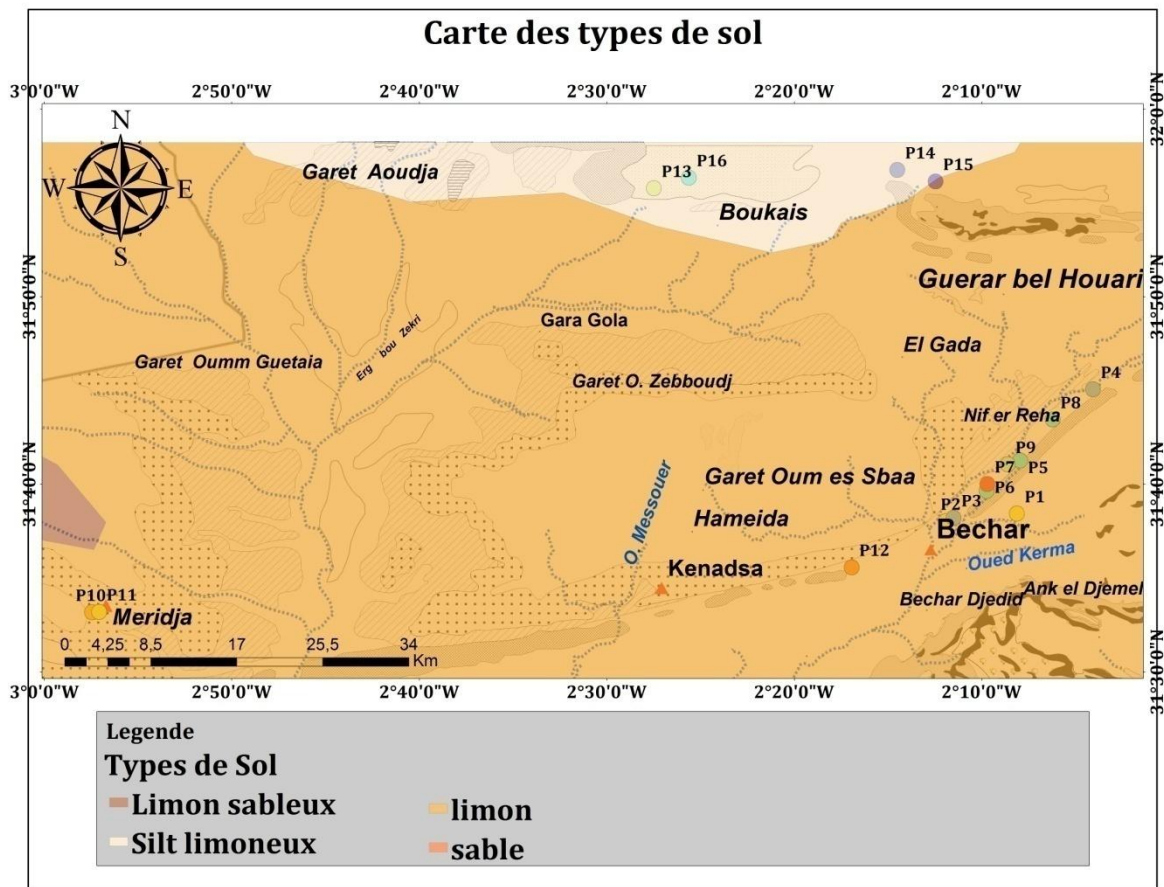
Le sol a un impact significatif sur la quantité de recharge qui peut s'infiltrer dans les eaux souterraines et, par conséquent, influe sur la capacité des contaminants à se déplacer verticalement dans la zone vadose. De plus, là où la zone de sol est assez épaisse, les processus d'atténuation de filtration, de biodégradation, de sorption et de volatilisation peuvent être assez importants. Ce paramètre a reçu un poids de «2» dans la méthode DRASTIC (Tab.VII.1). La reclassification de la carte des sols préalablement conçue, est effectuée selon la cote DRASTIC, obtenant ainsi une nouvelle couche de donnée illustrant ce paramètre (Fig. VII.5).

**Tableau VII.5** : Classification des milieux de sol d'après (Aller *et al.* 1987b).

Milieux de sol	
Intervalle	Notation
mince ou absent	10
Gravier	10
Sable	9
Tourbe	8
Argile rétractable et / ou agrégée	7
Limon sableux	6
Limon	5
silt limoneux	4
Argile limoneux	3
Boue	2
Argile non rétractable et non agrégée	1

La carte des sols (Fig.VII.5) illustre quatre classes de notations (4, 5, 6 et 9) selon le tableau VII.5. Le score élevé (9) correspond aux sols sableux recensés dans la partie Sud-est de la zone d'étude. La note moyenne (5) correspond aux sols limoneux présents dans la majorité de la zone d'étude. Les notes les plus basses (4 et 6) quant à elles représentent une petite partie localisée à l'Ouest près de la ville de Meridja là où le sol est limon sableux.

.



**Figure VII.5:** Carte d'évaluation des sols.

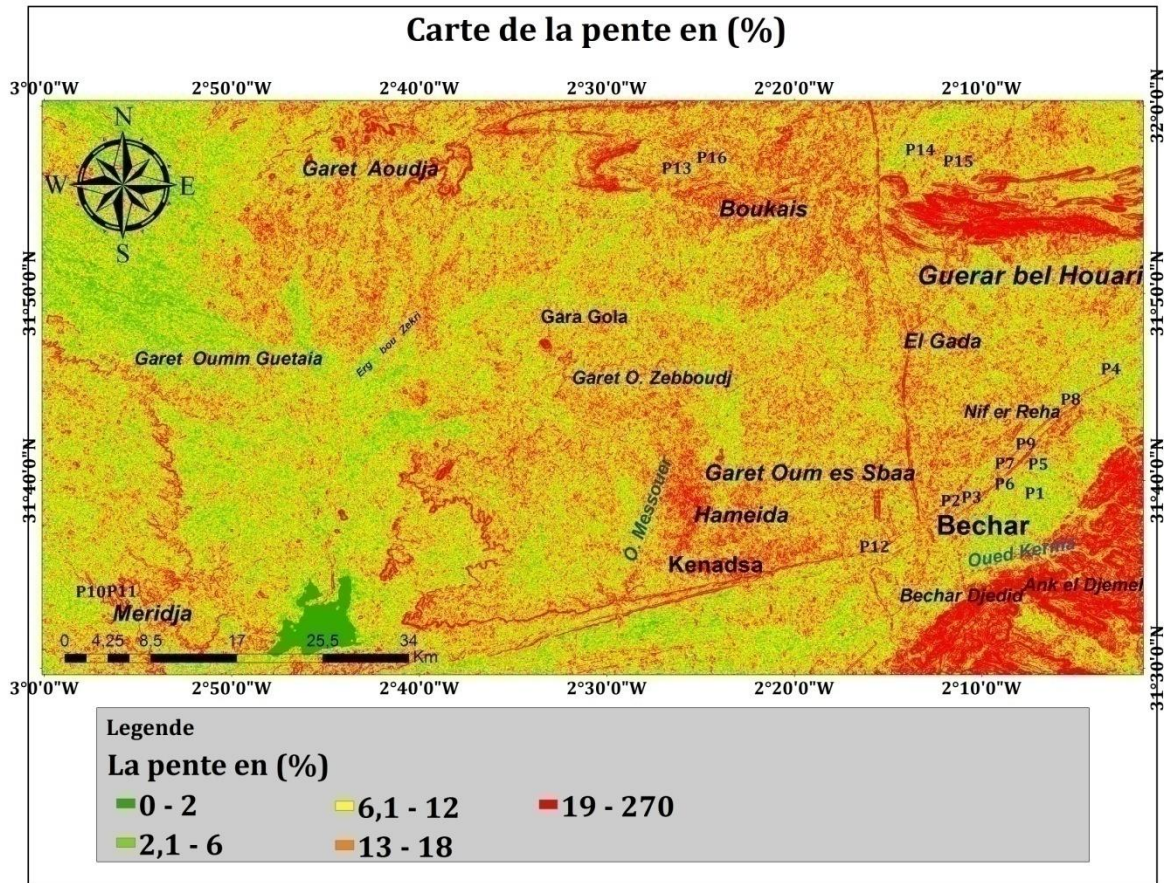
## 2.5. Topographie

La topographie fait référence à la variabilité de la pente et de la pente de la surface terrestre. Elle aide à contrôler la probabilité qu'un polluant s'écoule ou reste à la surface dans une zone suffisamment longtemps pour s'infiltrer. Dans le cadre DRASTIC, le paramètre de topographie a reçu un poids «1».

**Tableau VII. 6 :** Classification des pentes d'après (Aller *et al.*, 1987b).

Topographie	
Intervalle (%)	Notation
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

La reclassification de la carte des pentes (préalablement réalisée), est effectuée selon les cotes DRASTIC (Tab.VII.6), la carte résultante est donnée en figure VII.6.



**Figure VII. 6:** Carte d'évaluation de la pente

La carte (Fig.VII.6) indique que la zone d'étude est caractérisée par des valeurs élevées de pente dans la plupart des secteurs (28.51 % de la zone d'étude a une notation 3). Étant donné que ce type de topographie entraînerait généralement une diminution du temps de percolation de la surface du sol à la nappe phréatique, les cotes DRASTIC sont également élevées. On constate également que plus de 60% de la zone d'étude a un score moyen (5) là où le pourcentage de la pente varie de 6 à 12 %.

## 2.6. Impact de la zone Vadose

La zone vadose est définie comme la zone située au-dessus de la nappe phréatique et est insaturée (Aller *et al.* 1987b). La nature de la zone vadose détermine les caractéristiques d'atténuation du matériau sous l'horizon de sol typique et au-dessus de la nappe phréatique. Ce paramètre a reçu un poids «5» dans la méthode DRASTIC.

Sur la base de la description géologique de la zone d'étude, la zone de vadose est observée comme étant constituée d'une proportion variable d'argile, de limon et de sable, qui correspond à une cote entre 4 et 8 (cote typique est 6) (Tab.VII.7) . Bien que le pourcentage

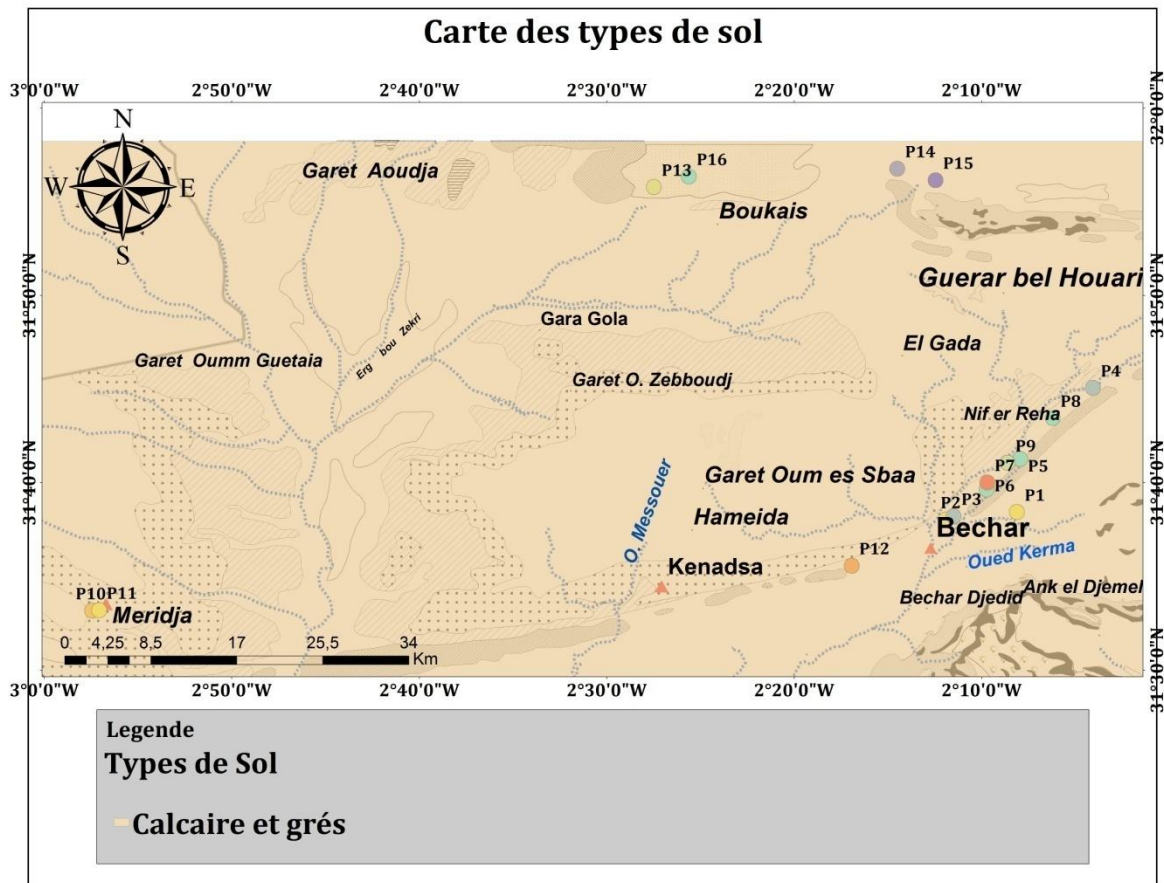


de sable, de limon et d'argile varie d'un endroit à l'autre, les notes données par *Aller et al. (1987b)*, ne tiennent pas compte de la variabilité inter constituant. Par conséquent, la classification disponible ne peut fournir qu'une valeur unique pour la zone vadose dans les zones alluviales, vu que la vulnérabilité n'est pas significativement influencée par la variabilité spatiale intrinsèque des caractéristiques géologiques.

L'impact de la zone vadose est classé sur la base des logs stratigraphiques de forage du secteur de recherche. La partie la plus importante de la zone comprenait du calcaire et du grès. Par conséquent, l'impact de la zone vadose a été divisé en une classe qui est le calcaire et le grès stratifiés avec un impact du taux de la zone vadose de 6. La figure VII.7 montre l'impact de la couche de la zone vadose dans le secteur de recherche.

**Tableau VII.7 :** Classification de la zone vadose d'après (*Aller et al., 1987b*).

<b>Milieus aquifères</b>		
<b>Intervalle</b>	<b>Notation</b>	<b>Notation typique</b>
Limon / Argile	1 – 2	1
Schiste	2 – 5	3
Calcaire	2 – 7	6
Grès	4 – 8	6
Grès stratifié, calcaire, schiste	4 – 8	6
Sable et gravier avec limon et argile importants	4 – 8	6
Métamorphique / igné	2 – 8	4
Sable et gravier	6 – 9	8
Basalte	2 - 10	9
Calcaire karstique	8 - 10	10



**Figure VII.7:** Carte de l'impact de la zone vadose

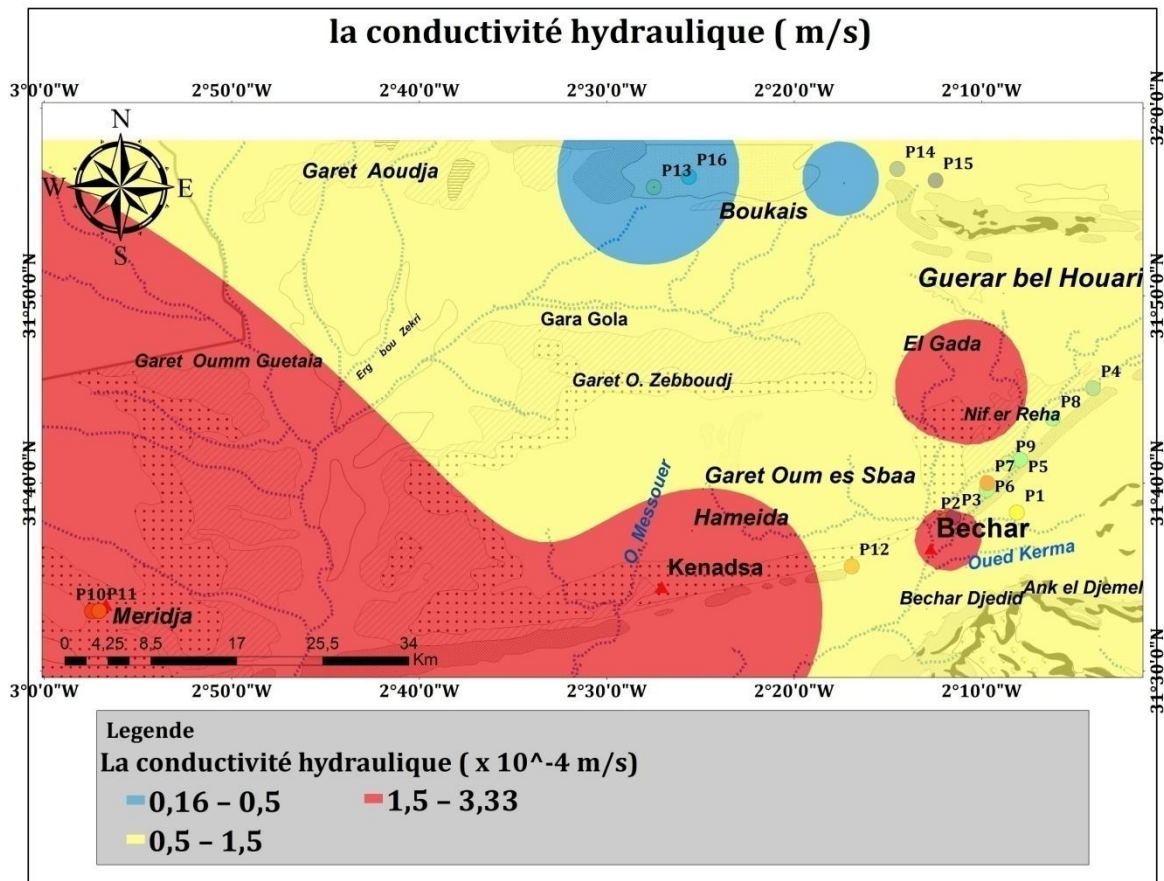
## 2.7. Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique fait référence à la capacité du matériau de l'aquifère à transmettre de l'eau, qui à son tour, contrôle la vitesse à laquelle l'eau souterraine s'écoulerait sous un gradient hydraulique donné. La vitesse à laquelle l'eau souterraine s'écoule contrôle également la vitesse à laquelle un contaminant serait éloigné du point auquel il entre dans l'aquifère. Dans la méthode DRASTIC, ce paramètre a reçu un poids «3».

Sur la base de la carte de conductivité hydraulique préparée en amont, ses valeurs sont majoritairement réparties entre deux classes de notation (1) et (2), deux petites taches de la classe de notation 4 sont concentrées dans le Nord de la zone d'étude près de la ville de Mougheul (Fig. VII.8). Compte tenu de la classification DRASTIC (Tab.VII.8), ce paramètre a reçu une cote de «10» (Aller et al. 1987b).

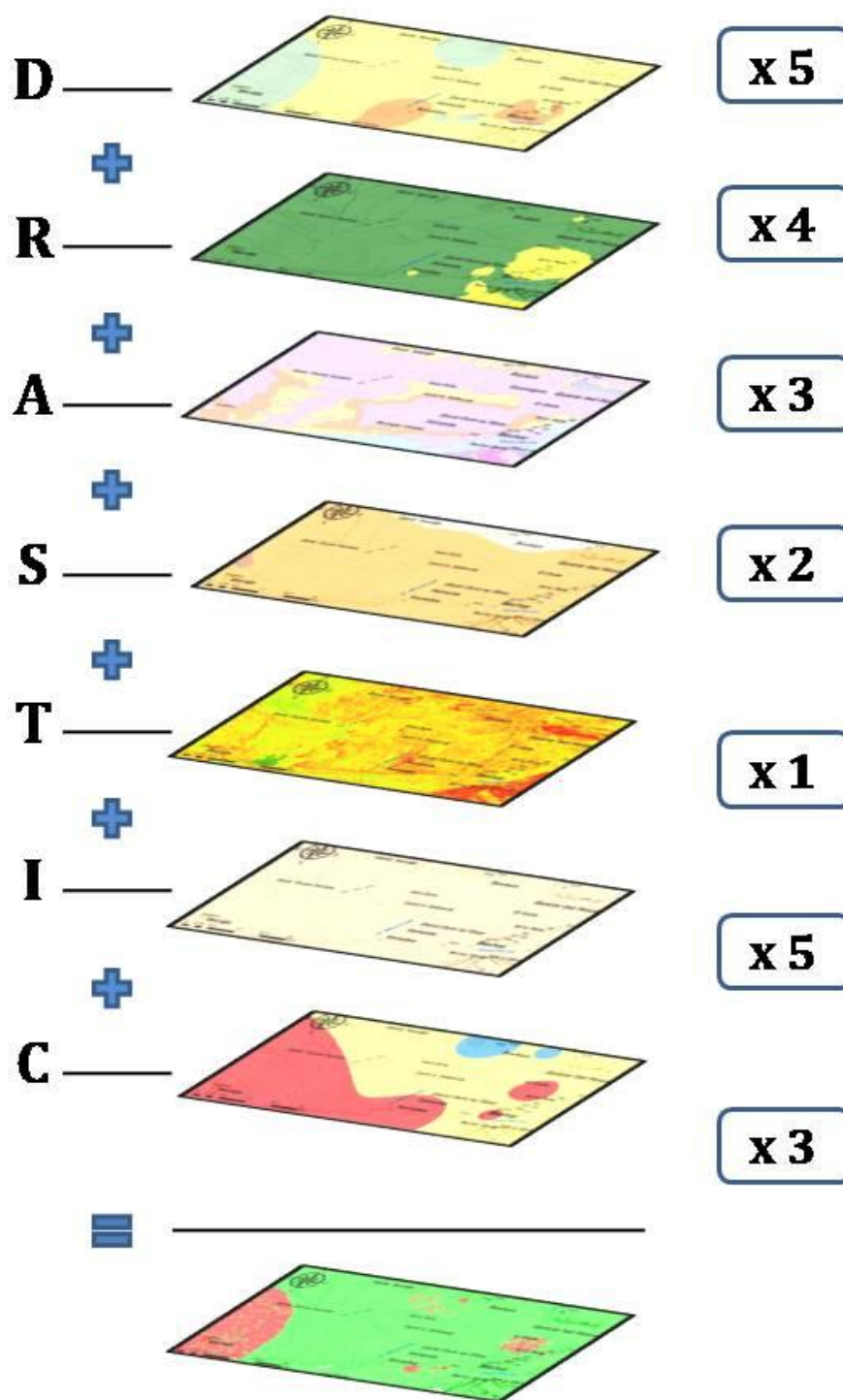
**Tableau VII.8** : Classification des conductivité hydraulique d'après (Aller *et al.*, 1987b)

Conductivité hydraulique (m/jour)	
Intervalle	Notation
0.005 – 0.5	1
0.5 – 1.5	2
1.5 – 3.5	4
3.5 – 5.0	6
5.0 – 10.0	8
>10.0	10

**Figure VII.8:** Carte de la conductivité hydraulique

### 3. Consolidation et calcul de l'indice DRASTIC

Le processus de fusion des cartes des paramètres susmentionnées est effectué à l'aide du programme ArcMap™. Il consiste à superposer chaque couche de données comportant chacune l'information du dit paramètre puis à les fusionner à l'aide de l'outil Raster calculator d'ArcMap™ ; ce qui permet d'exécuter les opérations de combinaison en insérant des équations pour chaque opération. La figure VII 9,. fournit un schéma du processus de fusion des couches de données de chaque paramètre DRASTIC.

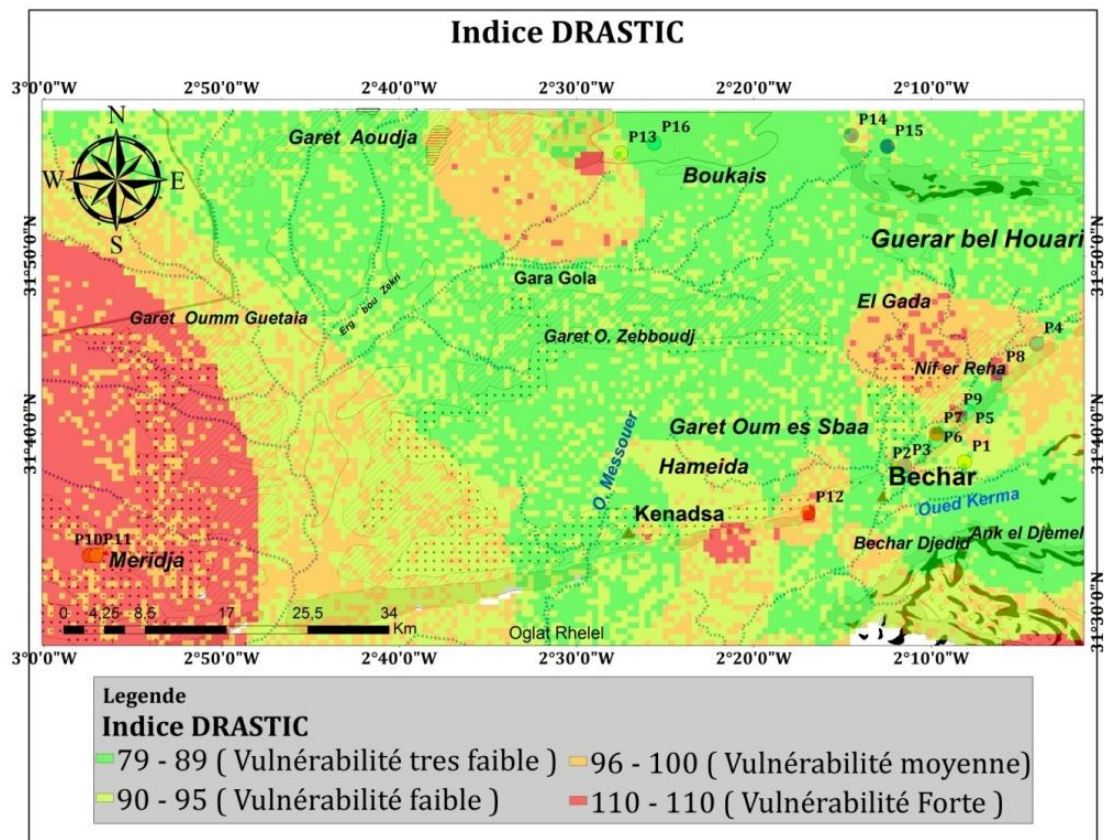


## L'indice DRASTIC

**Figure VII.9:** Illustration conceptuelle de la méthode DRASTIC pour la zone d'étude

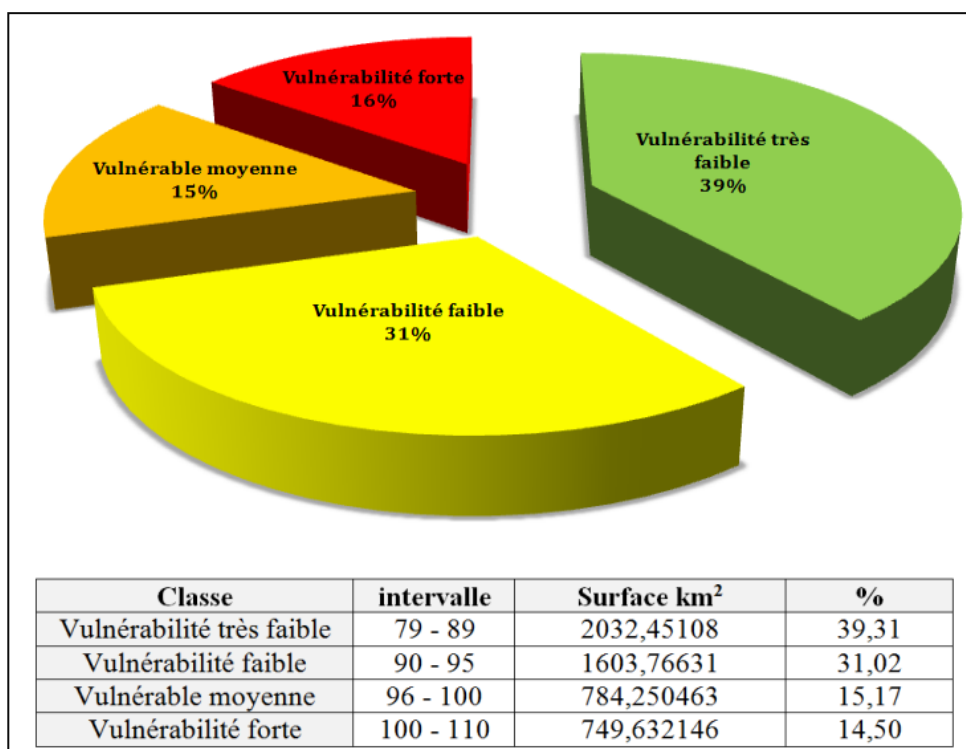
### 3.3 Carte d'indice de vulnérabilité DRASTIC

La carte de l'indice de vulnérabilité DRASTIC est obtenue par superposition et fusion des paramètres DRASTIC. La carte résultante (Fig. VII.10) illustre quatre sections réparties en fonction de la valeur d'exposition pour chaque zone. D'après le tableau joint à la figure VII.11, il apparaît que la classe « **vulnérabilité très faible exposition** » est la plus répandue du secteur de recherche avec 39,31%, principalement concentrée au centre et à l'Est de la zone d'étude. La classe « **vulnérabilité faible** », (90 à 95) constitue la seconde catégorie la plus importante et occupe 31,02% de la zone principalement concentrée dans le Nord (Moughel) et près de la ville de Meridja. Elle est également retrouvée à l'Ouest et au centre de la zone d'étude combinée à la troisième classe. La troisième classe, quant à elle, (96-100), occupe 15,17 % de la zone d'étude disséminée à travers la zone d'étude.



**Figure VII.10:** Carte de vulnérabilité « DRASTIC » de la nappe Turonien, selon [Aller L., et al., 1987.](#)

La valeur la plus élevée du degré de vulnérabilité (100-110) occupe 14,50% de la zone d'étude et se concentre dans la partie Ouest adjacente à la ville de Meridja, au Nord près de Boukais dans une moindre mesure, et à l'Est dans la zone agricole de Ouakda (Fig. VII.11). Cette valeur élevée indique l'influence et la convergence de plusieurs paramètres à savoir la faible profondeur des eaux souterraines, un coefficient de recharge élevé et un sol sableux qui favorisent la vulnérabilité élevée des aquifères. En conséquence, ce domaine doit être une priorité pour les responsables du secteur de la distribution d'eau qui doivent mettre en place des mesures de protection strictes et immédiates dans ces zones.



**Figure VII.11:** les classes de vulnérabilité de la nappe de turonien

#### 4. Indice de pollution et répartition spatiale des nitrates

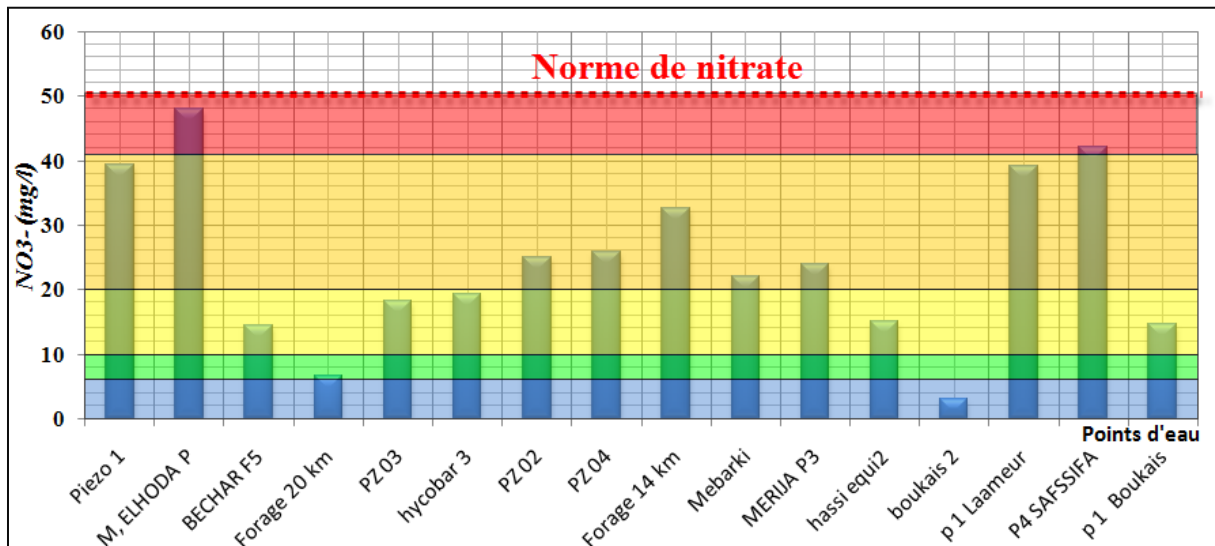
Les nitrates  $\text{NO}_3^-$  sont considérés comme les premières sources de pollution des eaux superficielles ou souterraines. Les nitrates proviennent généralement des activités anthropiques (agriculture, les fosses septiques). L'OMS (2011) estime que les concentrations au dessus de 50 mg/l sont considérées comme une source de risque de pollution. ABULUDE *et al.* (2018) a présenté une classification avec une explication détaillée de la concentration en nitrate en fonction du degré de risque et des symptômes qui en résultent. A partir du tableau (Tab.VII.9), on peut déduire qu'avec une limite de 0 à 40 mg/l, l'eau est propre à la consommation humaine et animale, contrairement à 41-100 mg/l où elle constitue un risque.

**Tableau VII.9 :** les concentrations des nitrates et interprétation (ABULUDE et al. 2018)(  
référence ajoutée dans liste bibliographique )

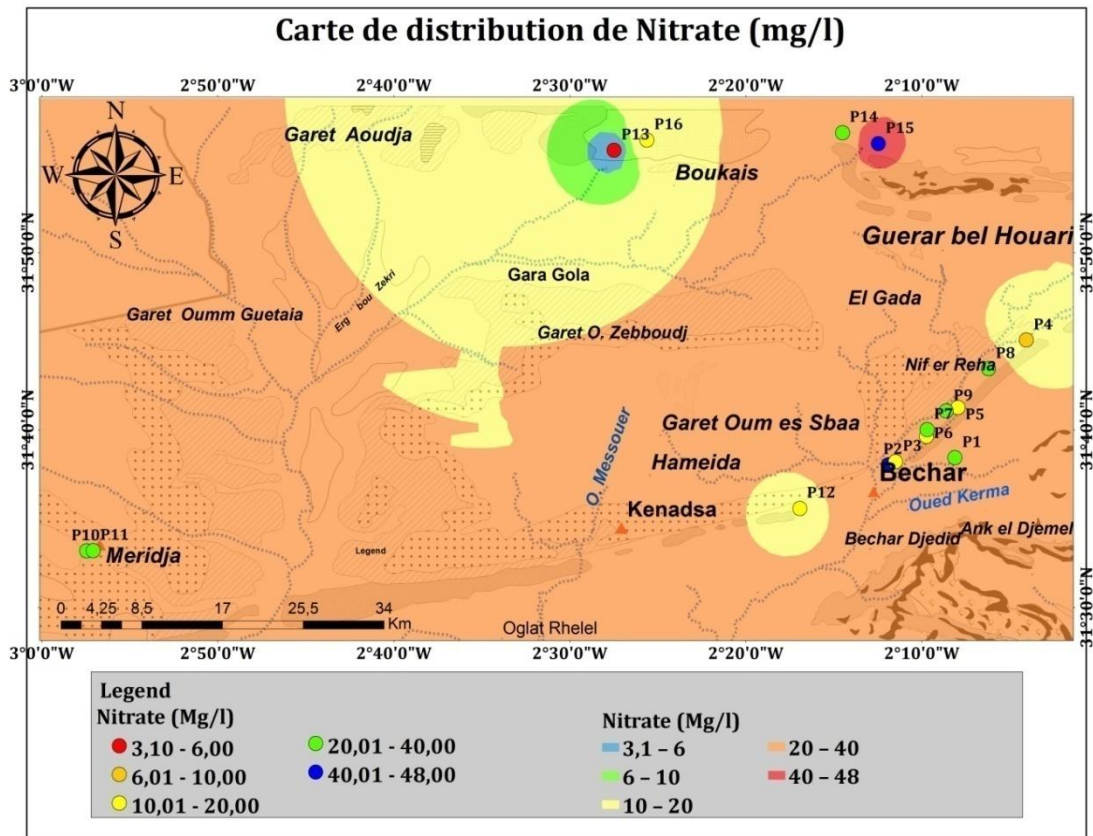
Concentration de Nitrate mg/l	interprétation
0 – 10	Sans danger pour les humains et le bétail. Cependant, des concentrations supérieures à 4 mg / l sont un indicateur de sources de pollution possibles et pourraient entraîner des problèmes environnementaux.
10 - 20	Généralement sans danger pour les adultes humains et le bétail. pas sans danger pour les nourrissons car leur système digestif ne peut pas absorber et excréter le nitrate
21 – 40	Ne doit pas être utilisé comme source d'eau potable mais une utilisation à court terme acceptable pour les adultes et tous les animaux d'élevage, à moins que les sources d'alimentation humaine ou animale soient très riches en nitrates
41 – 100	Risque pour les adultes et les jeunes animaux. Probablement acceptable pour le bétail mature si l'alimentation est lente en nitrates
Over 100	Ne doit pas être utilisé comme eau potable pour les humains ou le bétail

L'application de cette classification sur les points d'eau de la nappe du Turonien illustre une variété des classes selon le degré de concentration de chacune d'elle. On observe ainsi, que seulement un point d'eau (Boukais 2) enregistre une concentration inférieure au seuil de la première classe (0 – 6 mg/l). Pour la seconde, un seul échantillon est enregistré (forage 20km) avec une teneur en nitrate égale à 6.72 mg/l. et plus de 31 % des échantillons sont inclus dans la troisième classe (10 – 20 mg/l).

Selon le diagramme de concentration des nitrates (Fig.VII.12), on peut distinguer que la quatrième classe est la classe dominante dans la zone d'étude (37. 5 %) avec des concentrations qui varient entre 22.08 et 39.6 mg/l. Seul un échantillon (mosquée El Houda) indique des valeurs supérieures à 41 mg/l.



**Figure VII.12:** concentrations des nitrates par points de la nappe de turonien



**Figure VII.13:** Carte des nitrates.

La figure VII.13 illustre la distribution des concentrations de nitrates au niveau de la zone d'étude, on y remarque que la plus grande partie correspond à la quatrième classe (concentrations en de nitrates de 20-40 mg / l) qui stipule que « l'eau ne doit pas être utilisée comme source d'eau potable mais une utilisation à court terme acceptable pour les adultes et tous les animaux d'élevage, à moins que les sources d'alimentation humaine ou animale ne soient très riches en nitrates ».

On observe également sur la carte une tache rouge claire au Nord-est de la zone d'étude qui indique une concentration en nitrates élevée. Cependant, en comparaison avec les résultats obtenus dans le modèle DRASTIC, on remarque que cet endroit coïncide avec une zone classée à très faible vulnérabilité (Fig.VII.10), et par conséquent, ne constitue pas une zone de protection prioritaire, comparée aux autres régions.

La région Boukais et Ouakda enregistrent également des taux de concentrations en nitrates respectivement faibles à moyennes (3,1 mg / l et 18,24 mg / l) ; cependant, elles sont toutes les deux classées en zones de forte vulnérabilité (Fig.VII.10) et devraient par conséquent, constituer une zone de protection prioritaire élevée et faire l'objet de mesures adéquates permettant d'empêcher la propagation de ses polluants dans tout le secteur.



## **5. Conclusion**

Ce chapitre avait pour objectif d'estimer la vulnérabilité de la nappe face au risque de pollution. Pour atteindre cet objectif, la méthode DRASTIC fût utilisée, elle consiste à pondérer sept paramètres qui sont la profondeur des eaux souterraines, la recharge nette, les milieux aquifères, le milieu du sol, la topographie, l'impact de la zone vadose et la conductivité hydraulique ; et de les reclasser individuellement selon un système de pondération et de notation. Les couches de données obtenues ont été superposées et fusionnées.

Le résultat obtenu montre que la zone d'étude est divisée en quatre classes dont la dominante est celle à vulnérabilité très faible exposition qui occupe 39,31% de la zone d'étude. La seconde classe à vulnérabilité faible occupant 31,02% et la troisième classe à vulnérabilité moyenne qui occupe 15,17 % de la zone d'étude. Et enfin la classe la plus vulnérable qui occupe 14,50% qui comprend entre autres la zone agricole d'Ouakda et qui s'explique par la faible profondeur des eaux souterraines, un coefficient de recharge élevé et un sol sableux qui favorisent une forte vulnérabilité des aquifères.

L'étude à également effectuer une analyse de l'indice de pollution aux nitrates et les résultats ont montré que la majorité de la zone d'étude (37%) enregistre une concentration en nitrates comprise entre 22,08 et 39,6 mg / l, ce qui rend cette eau impropre à la consommation humaine ou consommable mais à court terme pour les adultes et tous les animaux d'élevage, sauf dans le cas où les sources d'alimentation humaine ou animale soient très riches en nitrates.

La carte du degré de concentration en nitrates fût comparé à la carte de vulnérabilité DRASTIC pour déterminer avec précision les zones de protection prioritaires et le résultat montre que les zones de Boukais et de Ouakda sont les secteurs les plus exposés au risque de contamination par les nitrates en conséquence de quoi, ces secteurs doivent être une priorité pour les responsables du secteur de la distribution d'eau, qui doivent mettre en place des mesures de protection strictes et immédiats dans ces zones.

La nappe de turonien est hautement vulnérable au risque de pollution. Selon les résultats obtenus par la méthode DRASTIC.

---

# **Partie III- Chapitre VIII**

Les mesures nécessaires pour  
assurer la durabilité des  
ressources hydriques

---

---

# CHAPITRE VIII

## LES MESURES NECESSAIRES POUR LA DURABILITE DES RESSOURCES HYDRIQUES

---

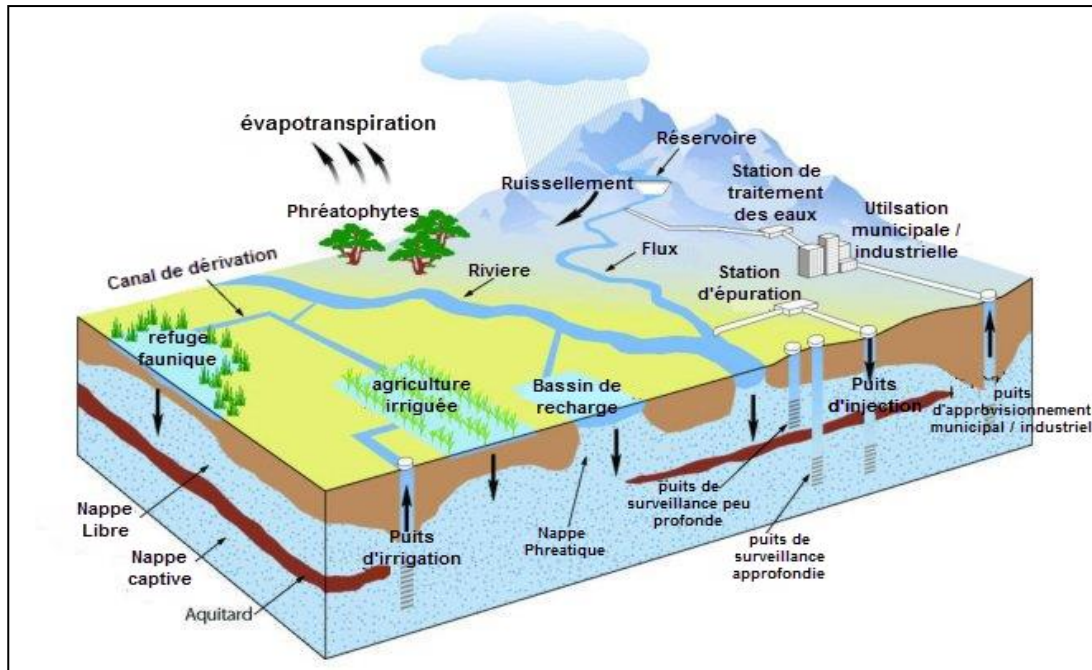
### 1. Introduction

L'eau est essentielle à la vie, non seulement pour répondre aux besoins fondamentaux de l'homme mais aussi pour contribuer à un développement durable. Elle est cruciale pour tout développement socio-économique et est nécessaire pour l'agriculture et de nombreux processus industriels. Cependant, l'augmentation de la population et le développement socio-économique signifient que la quantité d'eau potable aujourd'hui ne répondra pas aux besoins à l'avenir, ce qui entraîne un plus grand besoin d'adopter la technique de réalimentation artificiel des nappes pour compenser le volume manquant dû à la consommation. Cette technique est la plus largement utilisée parmi les techniques utilisées dans la gestion dite active des aquifères

Afin de comprendre ce qu'est la technique de réalimentation artificiel, nous devons d'abord aborder quelques points sur les processus de remplissage naturel des aquifères.

### 2. Réalimentation des aquifères dans la nature

Dans la nature, le processus de reconstitution de la réserve d'eau souterraine se fait par le cycle naturel de l'eau. Alors que les précipitations sont le principal facteur de ce processus, à travers l'infiltration des eaux excédentaires de précipitation, qui représente la partie restante après déduction de la partie de l'eau évaporée et de l'eau courante dans les vallées et les rivières (Taylor et al., 2013) (Fig. VIII.1).



**Figure VIII.1:** les types de la recharge des aquifères dans la nature

### 3. Réalimentation artificielle des nappes

Bien que la méthode de stockage de l'eau par les barrages soit considérée comme la plus courante et la plus largement utilisée, de nombreux chercheurs ont récemment appelé à l'utilisation de la technique de la recharge artificielle des réservoirs souterrains. En raison de son efficacité à fournir des stocks d'eau supplémentaires pour répondre aux besoins croissants des citoyens (Bouwer, 2002). La technique de la recharge artificielle des eaux souterraines dépend de l'utilisation d'outils spécialisés pour introduire de l'eau dans des zones caractérisées par des formations à haute perméabilité.

#### 3.1. Objectifs et applications :

L'application de cette technique est divisée en trois classes principales:

##### 3.1.1. Changement de la qualité des eaux

Le processus de changement de la qualité se déroule sur deux niveaux:

##### a. Épuration :

Parmi les avantages du processus de la recharge artificielle, c'est que l'eau collectée bénéficie d'un processus de purification bactériologique naturel à travers le processus de filtration lente en raison de la qualité du sol utilisé (les alluvions sablo-graveleuses) dans les usines de collecte d'eau (Missimer et al., 2012), et l'eau est également soumise à un processus de purification chimique par échange d'ions résultant du contact avec d'autres composés peu stable.

## **b. Régularisation thermique**

La régularisation thermique est l'un des avantages de la recharge artificielle (Loizeau et al. 2017), car le passage de l'eau à travers des formations géologiques de l'aquifère est capable de modifier thermiquement cette eau de sorte qu'elle soit facile à utiliser dans des usages industriels tels que des opérations de refroidissement dans les usines.

### **3.1.2. Traitement de dommages à une nappe d'eau à la suite de la surexploitation et la restauration de la situation initiale**

La recharge artificielle des eaux souterraines contribue à compenser les déséquilibres causés par une consommation excessive d'eau souterraine, notamment:

- Compenser la forte diminution des niveaux piézométriques résultant de la surconsommation
- La recharge artificielle maintient la qualité de l'eau en évitant la pénétration de solution saline et de polluants en raison du faible niveau des eaux souterraines
- Le déficit résultant d'une consommation excessive doit être compensé par des sources alternatives, représentées par une recharge artificielle, par une distribution directe aux consommateurs pour éliminer ou réduire le processus de pompage, ou en l'injectant dans les formations géologiques de l'aquifère pour acquérir les propriétés chimiques des eaux souterraines. Le recours à l'une des deux options est déterminée sur la base des données techniques et économiques de chaque cas.

### **3.1.3. Amélioration de régime d'exploitation**

L'usage non étudié et irrationnel conduit à une forte baisse des ressources en eau, qui oblige à recourir à des opérations de stockage, que ce soit par barrages ou par recharge artificielle, avec le recours à l'adoption d'une politique de gestion intégrée des ressources en eau pour éliminer la mauvaise répartition de ces ressources, en particulier avec la différence qui apparaît avec le changement des saisons (été, hiver) ou en changeant de localisation (villes ou campagne) afin que ces différences doivent être prises en compte et la mise à disposition d'eau en excès pour de telles circonstances exceptionnelles.

## **4. les conditions d'utilisation de la recharge artificielle**

La nature de l'utilisation ainsi que les caractéristiques géomorphologiques de la zone jouent un rôle majeur dans la détermination de la méthode adoptée pour la méthode d'alimentation artificielle.

### **4.1. Conditions hydrologiques (source d'alimentation)**

La détermination des caractéristiques hydrogéologiques est une priorité avant de se lancer dans la recharge artificielle de la zone (Dillon, 2014) :

- **Débit**

Le débit est un facteur fondamental dans le processus de la recharge artificielle, car la différence entre le débit de l'aquifère ou de la source d'alimentation et le débit distribué (le volume consommé) doit être prise en compte afin de pouvoir maîtriser le processus de régularisation de débit de la recharge artificielle ;

- \* **caractéristiques chimiques et bactériologiques**

Avant de se lancer dans l'adoption de la technique de la recharge artificielle, il faut d'abord s'assurer que la qualité de l'eau à utiliser dans le processus de remplissage se compose de propriétés physico-chimiques homogènes avec les eaux souterraines en plus d'être exempte de tout élément contaminé ;

- **Turbidité**

Afin de s'assurer que le processus de remplissage artificiel se déroule sans perturbations, il faut vérifier que le degré de turbidité est très faible afin d'éviter le colmatage de l'équipement d'injection dû à l'accumulation des matières en suspension dans celui-ci. Surtout si le processus d'injection est adopté sans traitement préalable de l'eau ([Azis et al.,2015](#)) ;

- **Température**

En l'absence de procédé de modification thermique au niveau de l'aquifère à remplir, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de différence significative entre la température de l'eau d'injection et la température de l'eau souterraine car cette différence peut affecter la perméabilité et conduit à des déséquilibres dans le processus de remplissage artificiel.

#### **4.2. Conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques (réservoirs souterrains)**

Il n'est pas possible de penser au processus de remplissage artificiel sans la présence d'un réservoir d'eau souterraine pouvant recevoir l'eau à injecter. Par conséquent, ce réservoir doit être caractérisé par certaines caractéristiques hydrodynamiques et hydrogéologiques:

- **Dimensions géométriques de la nappe**

Les experts et les chercheurs conseillent que le niveau d'eau du réservoir soit relativement profond afin d'éviter que l'eau ne soit rapidement affectée par les polluants, ainsi que d'obtenir un volume de stockage plus important à mesure que la profondeur de toit du réservoir augmente.

- **Transmissivité**

Les formations géologiques épaisses sont plus adaptées au stockage en raison de leurs dimensions qui permettent un processus entre régulation et stockage, et le type du sol est un paramètre important dans le processus de stockage, et cela diffère entre les sols granulaires

qui sont caractérisés par une faible saturation et le sol fracturé qui limite le processus de stockage en raison de la vitesse de circulation de l'eau dans celui-ci (Bouwer , 2002);

• **Diffusivité**

La diffusivité hydraulique est proportionnelle à la vitesse à laquelle une impulsion de pression finie se propage à travers le système aquifère. On peut calculer la diffusivité hydraulique comme le rapport de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement (Ershaidat et al., 2009) . Par conséquent, il s'agit d'une autre façon d'analyser les paramètres de l'aquifère dans une grande zone en utilisant le niveau d'eau observé aux puits de frontière et d'observation. De grandes valeurs de diffusivité hydraulique conduisent à une propagation rapide des signaux

• **Nature du sol**

La qualité du sol est d'une grande importance dans le processus de remplissage artificiel, en particulier ceux liés à la zone non saturée, de sorte que cette dernière ne doit pas contenir un grand pourcentage d'argile de surface, ce qui peut limiter le mouvement de l'eau vers l'aquifère, car il peut changer la nature des endroits choisis pour injecter de l'eau en créant des fissures dues au séchage de cette couche d'argile (Izbicki, et al., 2008) . D'autre part, avoir une quantité adéquate d'argile peut grandement aider à l'adsorption des éléments traces et des métaux lourds du sol. Le sol doit contenir un certain pourcentage de carbone, ce qui contribue à la prolifération de certains organismes bénéfiques contre les agents pathogènes. Le carbone aide également en accélérant le processus de dénitrification du sol.

**5. Les différentes techniques de recharge**

Les techniques utilisées pour la réalimentation artificielle des nappes d'eau relèvent généralement des catégories suivantes (Díaz-Cruz et al., 2008) (Fig. VIII. 2).

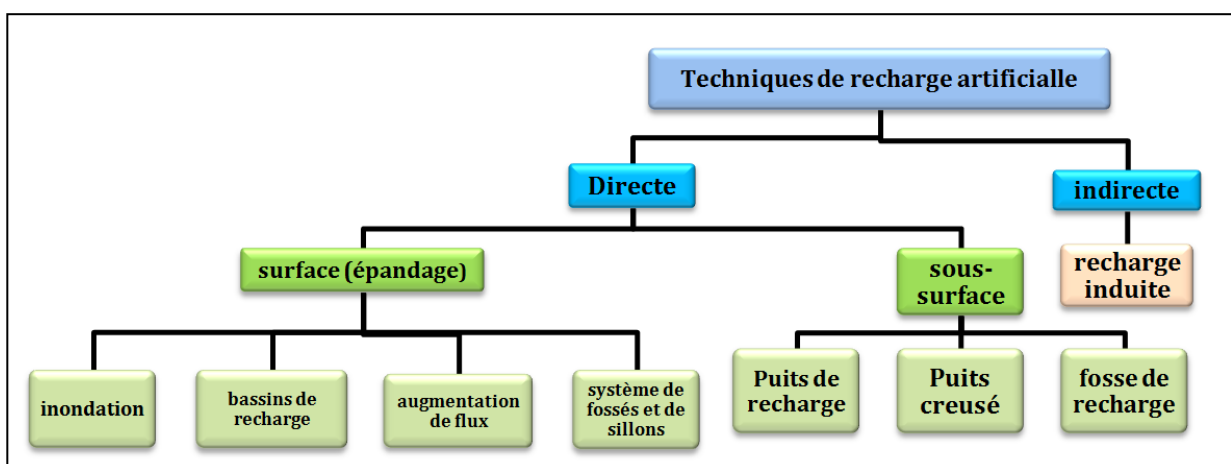
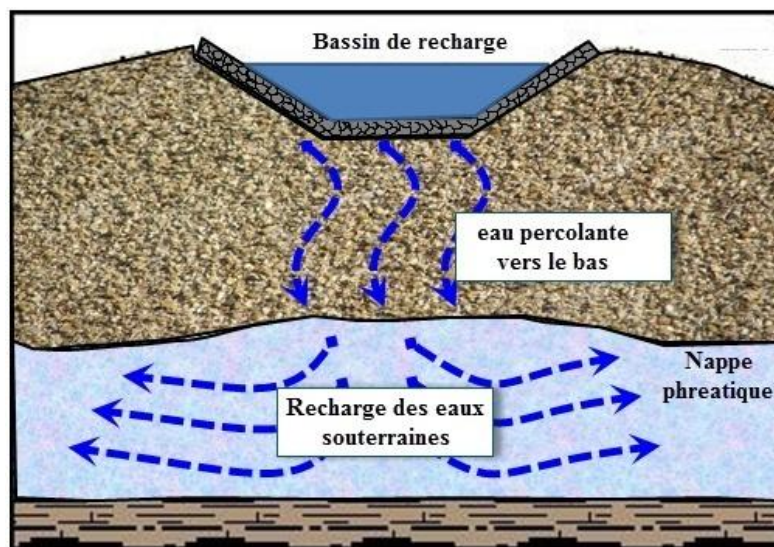


Figure VIII.2: les techniques de recharge artificielle (Díaz-Cruz et al., 2008)

## 5.1. Les techniques directes

### 5.1.1. Techniques d'épandage de surface

Les techniques d'épandage en surface consistent à maintenir l'eau à la surface dans des zones où l'eau peut percoler jusqu'à un aquifère peu profond et non confiné. L'épandage des bassins, les barrages de contrôle dans les chenaux, les sillons, les tranchées et les fossés sont des exemples courants de Recharge Artificielle (Rai et al., 2005) (Fig. VIII. 3). Les zones d'épandage en surface nécessitent un entretien périodique car les sédiments en suspension dans l'eau de source se déposent, obstruent la surface de la zone de recharge et réduisent le taux de recharge. La croissance microbienne dans les sols peu profonds provoque également le colmatage.



**Figure VIII.3:** Technique d'épandage en surface ([www.waterencyclopedia.com](http://www.waterencyclopedia.com))

Selon (Ramasesha et al., 2007), il existe des caractéristiques importantes dans la sélection des sites pour la recharge artificielle par des techniques d'épandage en surface comprennent :

- a) La zone doit avoir un terrain en pente douce sans ravines ni crêtes.
- b) L'aquifère rechargé doit être non confiné, perméable et suffisamment épais pour fournir un espace de stockage.
- c) Le sol de surface doit être perméable et avoir un taux d'infiltration élevé.
- d) La zone Vadose doit être perméable et exempte de lentilles d'argile.
- e) Les niveaux des eaux souterraines dans la zone phréatique doivent être suffisamment profonds pour accueillir l'eau rechargée afin qu'il n'y ait pas de saturation de l'eau.



f) Le matériau de l'aquifère doit avoir une conductivité hydraulique modérée afin que l'eau rechargée soit retenue pendant des périodes suffisamment longues dans l'aquifère et puisse être utilisée en cas de besoin.

Selon le diagramme (Fig. VIII.2), on peut noter qu'il existe quatre types de la technique d'épandage en surface (inondation, bassins de recharge, augmentation de flux et les systèmes de fossés et de sillons).

#### 5.1.1.1. Inondation

Cette technique est très utile dans des zones sélectionnées où l'hydrogéologie favorise la recharge de l'aquifère non confiné en répandant le surplus d'eau de surface des canaux ou des ruisseaux sur de vastes zones pendant une durée suffisante pour recharger la masse d'eau souterraine (Hashemi et al., 2014). La figure VIII.4, montre la méthode par laquelle l'eau excédentaire du canal / ruisseau est détournée à travers un canal de distribution et libérée lorsque la nappe s'écoule sur le sol perméable de la zone. Pour assurer un temps de contact et une répartition de l'eau appropriés, des remblais sont réalisés des deux côtés de la zone. Ils guident l'eau de surface inutilisée vers un canal de retour qui renvoie l'excès d'eau vers le canal d'origine en aval.

Cette technique aide à réduire les pertes par évaporation du système d'eau de surface. L'eau conservée dans le stockage des eaux souterraines peut être pompée pour augmenter l'approvisionnement du canal pendant l'été ou pour fournir de l'eau d'irrigation aux zones adjacentes. C'est la méthode la moins coûteuse de toutes les méthodes d'épandage de l'eau et les coûts d'entretien sont également faibles.

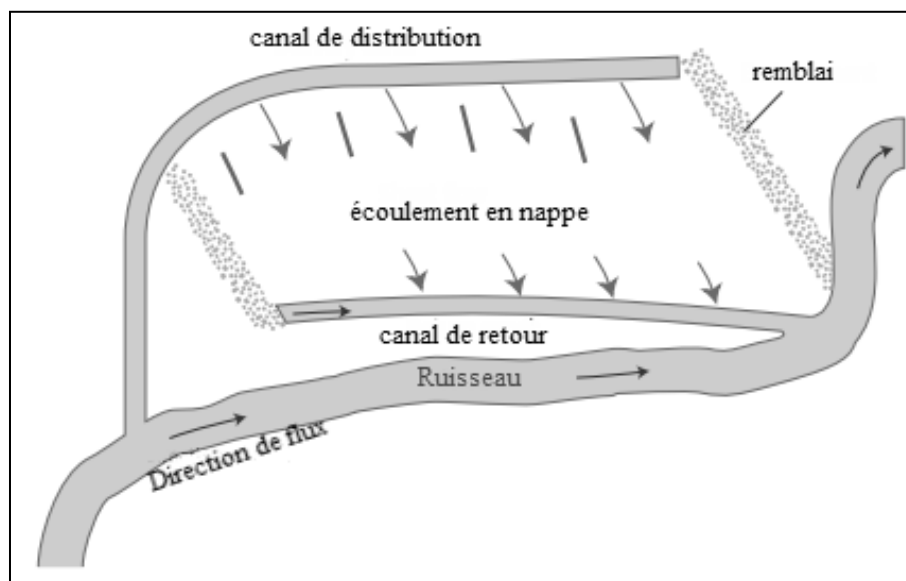


Figure VIII.4: Technique d'inondation (Ramasesha et al., 2007).

### 5.1.1.2. Bassins de recharge

Les bassins de recharge artificielles sont soit excavés, soit entourés de digues. Ils sont généralement construits parallèlement à des canaux de cours d'eau éphémères ou intermittents (Fig. VIII.5). Ils peuvent également être construits à d'autres endroits où un canal ou toute autre source d'eau fournit l'eau (Bhattacharya, 2010).

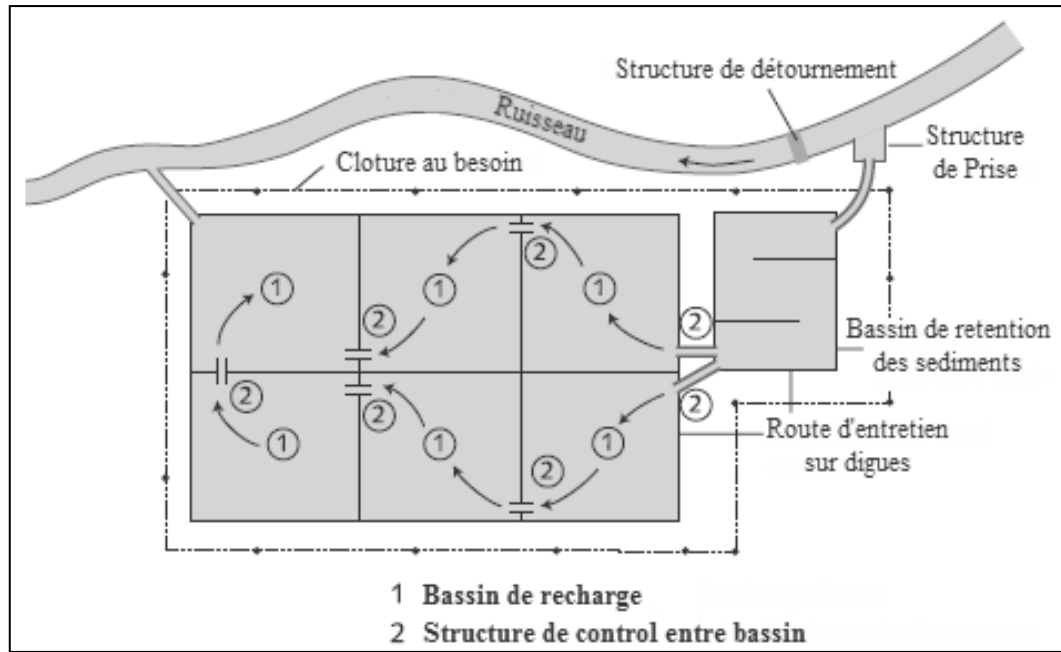


Figure VIII.5: Bassins de recharge

Dans les zones alluviales, de multiples bassins de recharge sont généralement construits parallèlement au cours d'eau. Les avantages de plusieurs bassins sont:

- le temps de contact avec l'eau est plus long pour l'eau stockée;
- les matières en suspension dans l'eau de source sont réduites à mesure que l'eau s'écoule des bassins en amont vers ceux en dessous;
- un entretien périodique tel que raclage, etc. pour restaurer les taux d'infiltration peut être effectué en contournant le bassin concerné.

### 5.1.1.3. Augmentation de flux

Un canal de drainage naturel peut être modifié de manière à augmenter l'infiltration en retenant le débit du cours d'eau et en augmentant la superficie du lit du cours d'eau en contact avec l'eau. Le chenal est tellement modifié que le débit se propage sur une zone plus large, augmentant le contact avec le lit de la rivière en percolation. Le procédé comprend (i) l'élargissement, le nivellement, la scarification ou le fossé du canal d'écoulement; (ii) digues à doigts en forme de L ou digues à crochet construites par bulldozer à la fin de la saison de

débit élevé; et (iii) des barrages de retenue à faible hauteur qui permettent aux crues de passer en toute sécurité (Rao et al., 2019).

Les méthodes de modification des canaux fluviaux sont généralement appliquées dans les zones alluviales. Cependant, ils peuvent également être utilisés efficacement dans les zones de roches dures où de minces alluvions fluviales recouvrent un bon aquifère phréatique ou où les roches sont fortement altérées ou fortement fracturées dans et autour du chenal du cours d'eau, offrant ainsi des possibilités de recharge artificielle.

#### 5.1.1.4. Système de fossés et de sillons

Dans les zones à topographie irrégulière, des fossés ou des sillons peu profonds, à fond plat et rapprochés offrent une surface de contact maximale avec l'eau pour recharger l'eau du ruisseau ou du canal source. Cette technique nécessite moins de préparation du sol que les bassins de recharge et est moins sensible à l'ensablement (Eslamian, 2014). La figure VIII.6, montre un plan typique pour une série de fossés provenant d'un fossé d'alimentation et descendant la pente topographique vers le ruisseau. Généralement, trois modèles de systèmes de fossés et de sillons sont adoptés

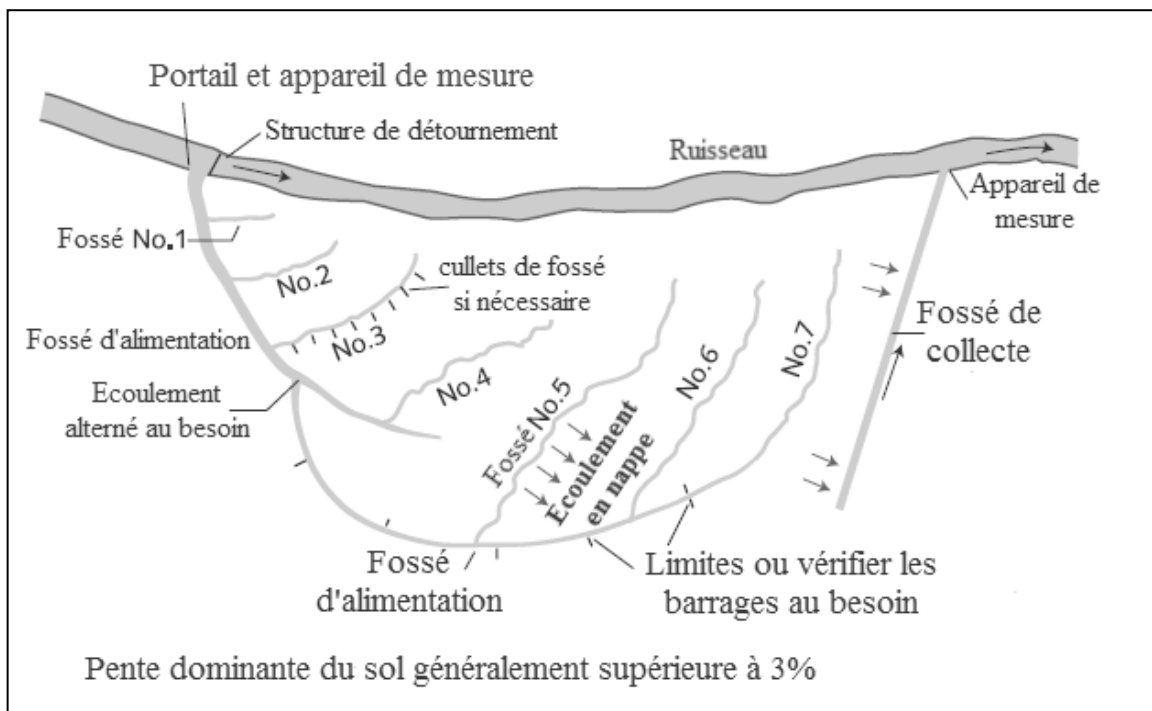


Figure VIII.6: système de fossés et de sillons

#### 5.1.2. Techniques de sous surface

##### 5.1.2.1. Puits de recharge

Les puits d'injection ou les puits de recharge sont des structures similaires aux puits forés / tubulaires, mais construites pour augmenter le stockage des eaux souterraines dans les

aquifères plus profonds grâce à l'approvisionnement en eau soit par gravité soit sous pression. L'aquifère à reconstituer est généralement un aquifère avec une désaturation considérable due à la surexploitation des eaux souterraines (CGWB, 2000). Les schémas d'un puits d'injection typique en terrain alluvial sont présentés sur la figure VIII.7.

L'efficacité de la recharge par les puits d'injection est limitée par les caractéristiques physiques des aquifères. Les tentatives d'augmentation de la recharge peuvent s'avérer contre-productives dans les cas où le matériau de l'aquifère s'érode en raison de la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, en particulier dans les aquifères non consolidés ou semi-consolidés.

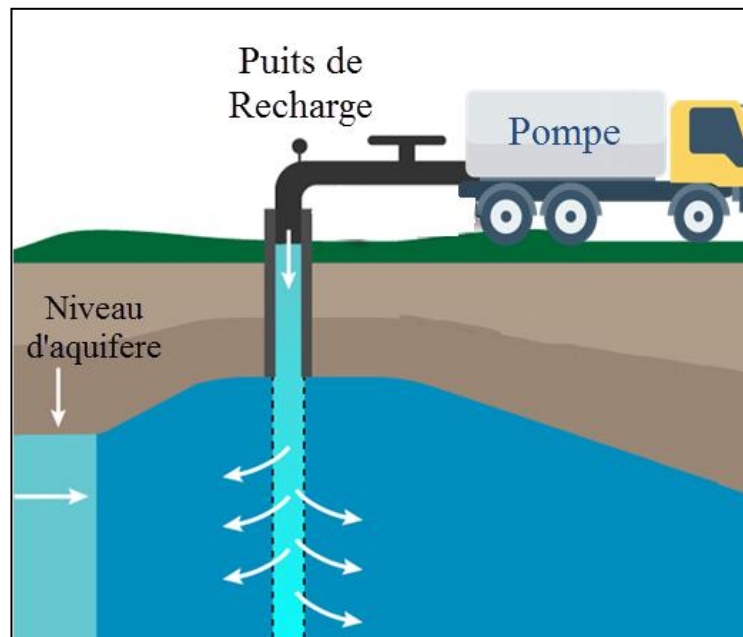
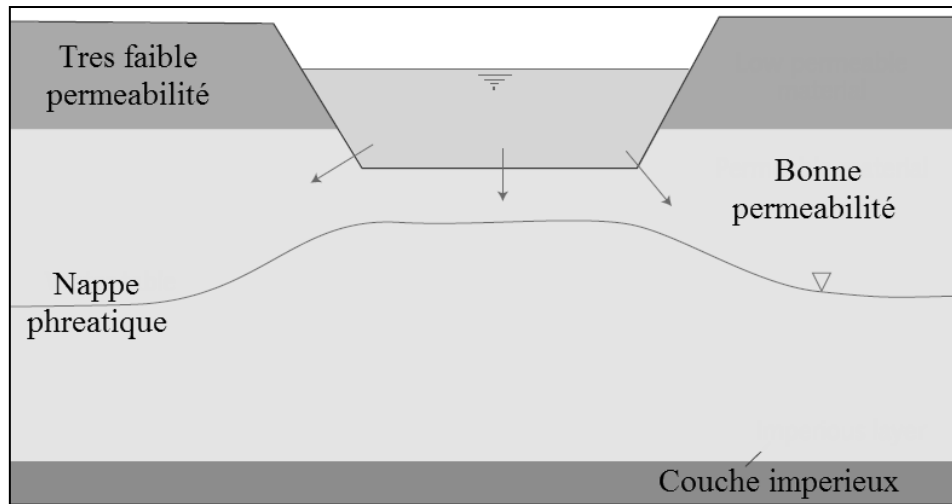


Figure VIII.7: Système de puits de recharge

#### 5.1.2.2. Fossés de recharge

Pour une recharge efficace de l'aquifère peu profond, les horizons les moins perméables doivent être pénétrés pour rendre l'aquifère directement accessible. Les fossés de recharge sont une option. Ce sont des excavations de dimensions variables qui sont suffisamment profondes pour pénétrer des strates moins perméables (Rao et al., 2019) (Fig. VIII.8). Les fossés de recharge diffèrent des puits de recharge par gravité car ces derniers n'atteignent pas nécessairement l'aquifère non confiné et l'eau de recharge doit s'infiltrer à travers la zone vadose.

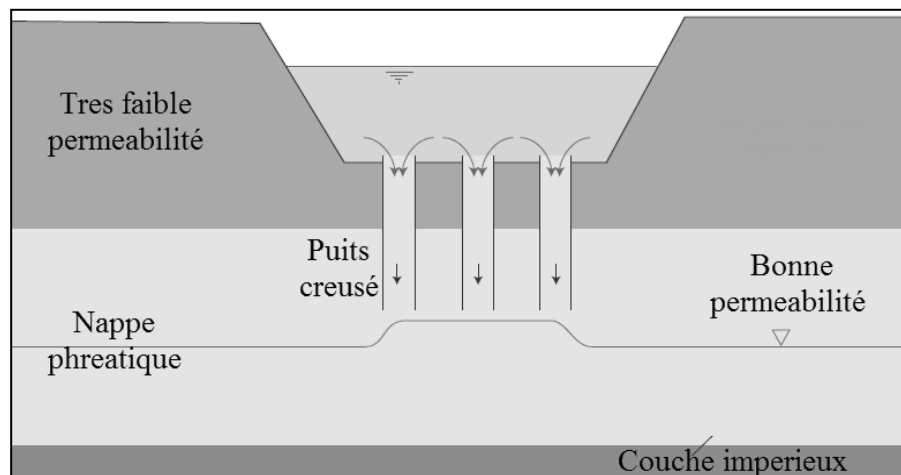


**Figure VIII.8:** Fossé de recharge

Plus la section transversale du fond de la fosse est grande, plus elle sera efficace. La surface réelle requise dépend du volume de recharge prévu et de la perméabilité des strates sous-jacentes. Par conséquent, la perméabilité doit être déterminée.

### 5.1.2.3. Puits creusé

Dans les cas où un aquifère est situé profondément sous la surface du sol et recouvert de strates peu perméables, un puits est utilisé pour la recharge artificielle. Un puits creusé est similaire à un puits de recharge mais beaucoup plus petit en section transversale (CGWB, 2000) (Fig. VIII.9).



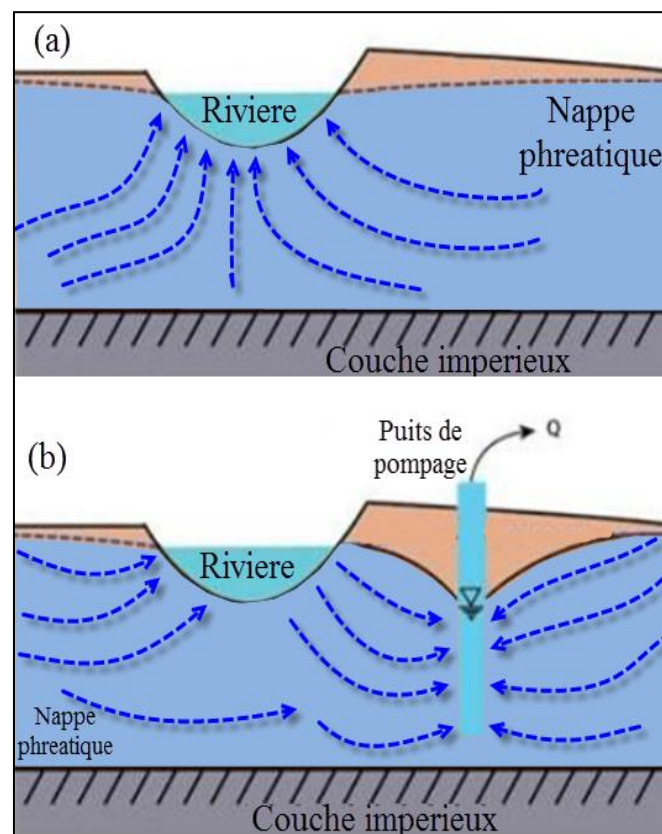
**Figure VIII.9:** Puits creusé

## 5.2 Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes de recharge artificielle des eaux souterraines n'impliquent pas l'approvisionnement direct en eau pour la recharge des aquifères, mais visent à recharger les aquifères par des moyens indirects. La méthode la plus courante de cette catégorie est la recharge induite à partir de sources d'eau de surface.

### 5.2.1. Recharge induite

La recharge induite implique le pompage de l'eau d'un aquifère, qui est relié hydrauliquement à l'eau de surface pour induire une recharge vers le réservoir d'eau souterraine. Une fois la connexion hydraulique établie par l'interception du cône de dépression et de la limite de recharge de la rivière, les sources d'eau de surface commencent à fournir une partie du rendement de pompage (Ramasesha et al., 2007) (Fig.VIII.10). La recharge induite, dans des conditions hydrogéologiques favorables, peut être utilisée pour améliorer la qualité des ressources en eau de surface grâce à son passage à travers le matériau aquifère. Les puits collecteurs et les galeries d'infiltration, utilisés pour l'approvisionnement en eau de très grandes quantités de lits de rivières, de lacs et de zones gorgées d'eau, fonctionnent également sur le principe de la recharge induite.



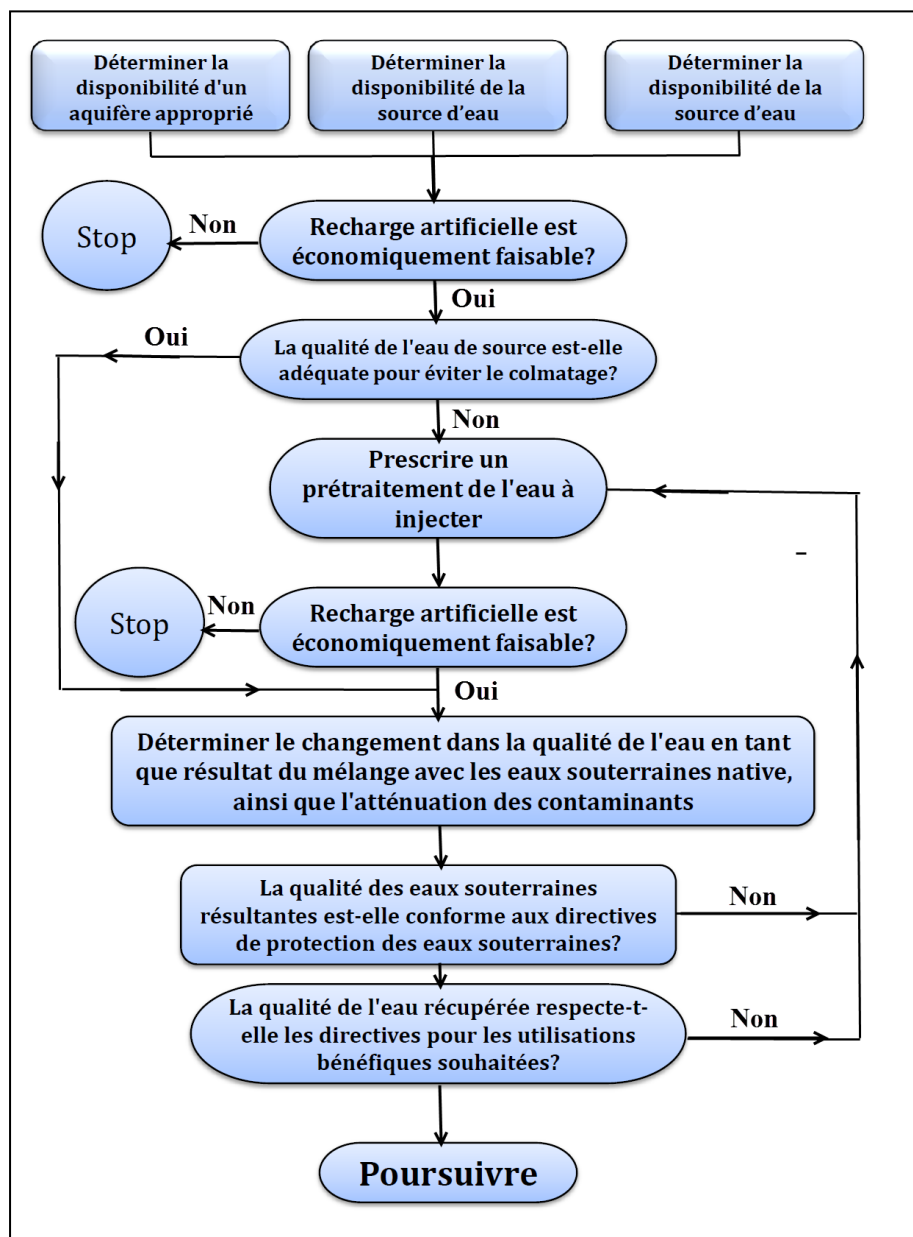
**Figure VIII.10:** Recharge induite

## 6. Schéma décisionnel d'adoption de la technique de recharge artificielle

Afin d'étudier attentivement la possibilité d'appliquer l'une des méthodes de recharge artificielle, cela nécessite de prendre en compte une large connaissance du bassin d'eau à réalimenter à travers les informations obtenues pour ce site, ce qui permettra le bon choix des emplacements des puits d'injection et ainsi obtenir des résultats efficaces, non seulement du point de vue de la durabilité des ressources environnementales, mais aussi du côté lié à la

viabilité économique ou au rendement économique de la réalisation de cette installation sur le site proposé.

Le chercheur (Dillon et al.,1996) a présenté un schéma visant à aider les fonctionnaires dans la gestion des ressources en eau afin de connaître l'efficacité des projets de recharge artificielle en prenant en considération les coûts de traitement et de maintenance technique de ces projets et en les comparant avec les retour environnementale ciblée (Fig. VIII.11), et donc les projets à faible rendement. Il devient inefficace d'un point de vue économique car il n'est pas en mesure de couvrir les coûts résultant de la gestion, de la surveillance et de l'entretien de ces installations



**Figure VIII.11:** schéma de détermination de la faisabilité de la réalisation des ouvrages de la recharge artificielle des aquifères (Dillon and Pavelic, 1996)

## 7. Exemple d'application de réalimentation artificielle sur la nappe de Turonien de la zone d'étude

Afin d'obtenir le meilleur rendement environnemental aux coûts économiques les plus bas, les chercheurs utilisent plusieurs critères en menant une étude hydrogéologique approfondie. Ces critères sont les suivants:

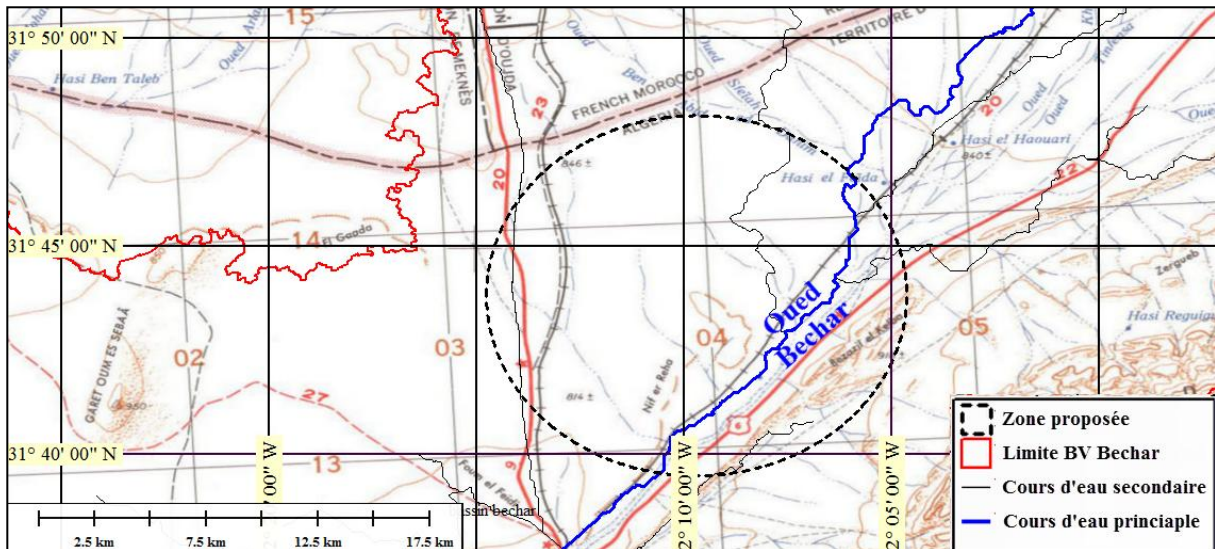
- La nature des reliefs de la zone sélectionnée ;
- les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de cette zone ;
- La qualité de l'eau utilisée dans le processus d'injection (propriétés physico-chimiques) ;
- Les charges financières de cette région (achat de la parcelle, travaux de terrassement, frais d'achèvement des ouvrages de recharge, frais de fonctionnement, d'entretien et de suivi)

La technique de la recharge artificielle a été adoptée par de nombreux pays à travers le monde et a montré des résultats très positifs. Les premiers bassins d'infiltration en Europe sont apparus en 1897 en Suède et en 1899 en France (Richert 1900; Jansa 1952). Actuellement, l'Inde est le plus grand utilisateur de la technologie de La recharge artificielle, avec un volume annuel estimé à 3070 millions de mètres cubes en 2015 (Dillon et al., 2019). Malheureusement, l'Algérie fait partie des pays qui adoptent très tardivement la technique de la recharge artificielle. La seule expérience de cette technique remonte à 1998 au niveau du barrage de Boukerdane, où les lâchers du barrage ont permis d'augmenter le volume de la nappe alluviale de la plaine d'oued el Hashem.

Dans notre zone d'étude, la technique de remplissage artificiel n'a pas été utilisée, c'est pourquoi nous avons essayé de proposer un modèle et une conception préliminaire de cette technologie en exploitant l'oued de Béchar, notamment lors des crues, en dirigeant une partie de cette eau et en l'injectant dans la nappe d'eau de turonien à travers des puits à une profondeur de 40 m Rempli de gravier (2 - 5 mm) dans le but d'augmenter l'infiltration du sol

La parcelle proposée a été choisie sur la base des résultats obtenus en étudiant les valeurs de perméabilité dans la nappe d'eau du Turonien (Chapitre IV / Figure IV.5), car il a été constaté que cette région contient les valeurs de perméabilité les plus élevées ( $3.2 \times 10^{-4}$  m/s) (Fig. VIII.12), ainsi que la zone de Meridja à l'ouest de la zone d'étude.





**Figure VIII.12:** Zone proposée pour la recharge artificielle

### 7.1. La conception de la technique d'alimentation artificielle proposée

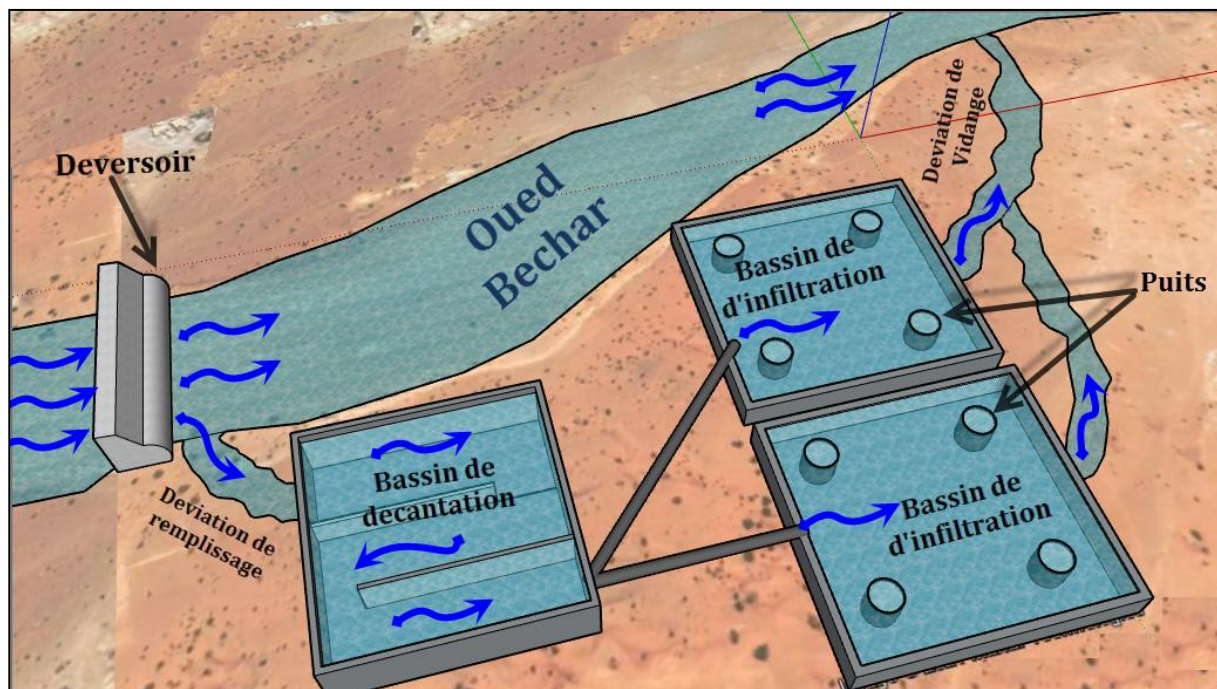
Le plan d'achèvement du projet est divisé comme suit (Fig. VIII.13):

- Veiller sur la de réduction de la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'oued de Béchar lors des crues, en implantant un déversoir de dimensions (20 m de longueur et 2 m de hauteur) dans la partie amont de l'oued de tronçon choisi pour injection ;
- Réalisation d'un bassin de collecte et d'infiltration à côté de l'oued de Béchar avec des dimensions (50 m x 50 m x 2 m) ;
- Fonçage de 4 puits verticaux d'infiltration dans le bassin des profondeurs de 40 m et de diamètre de 60 cm, remplies de graviers ( $\varnothing$  2-5 mm);
- Réalisation d'un bassin de décantation pour les eaux provenant de l'oued où une grande partie des particules en suspension sera éliminé.
- Réalisation d'une tranchée reliant le cours d'eau principal de l'oued au bassin désigné pour la collecte afin de le remplir.
- Réalisation d'une deuxième tranchée pour évacuer les eaux des bassins d'infiltration.

Ce modèle proposé est considéré comme un modèle basique et peut être adapté à presque tous les cas, mais ce modèle peut être développé en fonction de la nature et des caractéristiques de chaque cas en fonction des données environnementale (géologiques, hydrogéologiques et physico-chimiques de l'eau), de sorte qu'une surveillance continue de ces données est nécessaire pour garantir la rentabilité maximale de cette technique.

L'efficacité environnementale de ce projet nous fait penser à proposer la mise en place d'autres stations d'injection le long de l'oued afin d'obtenir un plus grand volume d'eau infiltré

et d'assurer la continuité du processus dans le cas où l'une des stations serait exposée au risque de colmatage dû à l'accumulation de particules fines de sol au fil du temps.



**Figure VIII.13:** Schéma d'installation proposée pour la recharge artificielle en utilisant les bassins d'infiltration

## 8. Conclusion

En raison de la grande importance de la nappe d'eau de Turonien dans la zone d'étude et de la grande dépendance à son égard pour fournir de l'eau potable à la ville de Béchar, cela a conduit à une diminution significative du niveau d'eau dans cette zone. Cela a nécessité de réfléchir à des solutions permettant de compenser le volume consommé afin d'assurer sa pérennité. C'est pourquoi nous avons suggéré d'utiliser la technique de recharge artificielle, qui a prouvé son efficacité dans de nombreux pays, comme en Inde, en Europe et dans d'autres régions du monde.

Le modèle proposé pour la technologie de remplissage artificiel consiste à construire des bassins avec des puits d'infiltration et à les remplir d'eau courante lors des crues, à condition qu'un déversoir de dimensions (20 m de longueur et 2 m de hauteur) soit réalisé afin de réduire la vitesse d'eau, suivi de la construction d'une tranchée reliant l'oued dispose à un bassin de décantation pour se débarrasser des particules de sol en suspension avant d'entrer dans les bassins d'infiltration, afin d'éviter les colmatages au niveau des puits d'infiltration remplies avec le gravier (2–5 mm).

Nous avons également suggéré de choisir plusieurs endroits le long d'oued Béchar afin d'augmenter le volume d'eau infiltré et ainsi accélérer le processus de recharge de la nappe

d'eau, en plus d'éviter l'arrêt du processus de recharge en cas de défaillance d'un des stations en raison d'un blocage pouvant affecter les puits au fil du temps.

Il est à noter que ce modèle proposé peut être amélioré en saisissant des données précises sur les paramètres environnementales de la zone d'étude (géologique , hydrogéologiques et hydrochimique ) et en les actualisant au fil du temps afin d'obtenir une efficacité maximale de la technique de recharge artificielle.

---

# **Conclusion Générale**

---

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Ce travail est une contribution à l'étude des propriétés hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe souterraine du Turonien qui est l'une des nappes d'eau les plus importantes du système aquifère de la région de Béchar. Elle est considérée comme étant le plus grand bassin en termes d'exploitation et garantit environ 20% des besoins en eau potable des habitants de la ville de Bechar. Cette ressource bien qu'importante n'en reste pas moins fragile, face aux différentes sources de pollution potentielles pouvant l'affecter ce qui la rendrait impropre à la consommation humaine et relèverait des milliers de personnes dans la précarité sanitaire. Par conséquent, une étude approfondie de la nappe et de ses caractéristiques est considérée comme primordiale pour faciliter et soutenir la gestion de cette ressource qui est vitale pour les populations locales. Ce travail de thèse se propose donc d'apporter une contribution à l'étude des propriétés hydrogéologiques et hydro-chimiques de la nappe souterraine du Turonien.

La région d'étude appartient au bassin salin créacé de Béchar (wilaya de Bechar) et fait partie de la zone du Grand erg occidental. Elle est constituée de trois principales unités morphologiques à savoir ; djebel Béchar, le plateau d'Oum Sebbaa, et la Chabket Mennouna. D'un point de vue géologique, c'est un bassin sédimentaire formé par des affaissements, en réponse à l'élévation du Haut Atlas et se compose de trois successions géologiques : le créacé discordant sur le sous-sol Carbonifère, le Tertiaire, couché en discordance de ravin sur les argiles de Sénégalaise, et le Quaternaire (15 m à 60 m) avec ses grès graveleux, ses sables fins et son calcaire entrecoupé de marnes et d'argile.

D'un point de vue climatique, la zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride à étés chauds et secs et hivers très froids et une pluviométrie qui n'excède pas les 150 mm par an.

Le volet hydrogéologique et hydrodynamique de la nappe de la zone d'étude a fait l'objet de recherches effectuées sur le terrain et au niveau des services et d'agences nationales dédiées à ce sujet. La caractérisation hydrogéologique et hydrodynamique de la nappe fût réalisée à travers (1) l'élaboration de cartes piézométriques de la région, (2) l'étude de la perméabilité et (3) l'étude de la variation du niveau statique de la nappe en fonction des précipitations. Pour le premier point, l'analyse des cartes piézométriques montre que les courbes isohypses présentent une irrégularité piézométrique. La direction

de l'écoulement est Sud-ouest, montrant une alimentation de la région par les eaux descendant de la zone Nord-est.

L'étude de la perméabilité quant à elle signifie qu'il existe une zone de forte perméabilité au niveau de Ouakda (nappe Turonienne), mais qui diminue à l'Ouest pour atteindre de faibles valeurs au Nord de la zone d'étude. Enfin, le traitement des données piézométriques établit que le niveau statique des deux piézomètres est clairement affecté par le changement d'intensité des précipitations au niveau de la région.

Notre travail de recherche s'est poursuivi par une étude de la qualité des eaux souterraines de la nappe du Turonien à travers deux volets, la qualité hydro chimique puis la qualité bactériologique.

La qualité hydro-chimique de la nappe est réalisée à travers une analyse des paramètres physico-chimiques de cette nappe, qui a permis une évaluation quant à la salubrité de l'eau vis-à-vis de la consommation humaine et de ces répercussions sur la santé. Pour ce faire, nous avons mené une campagne d'échantillonnage sur 16 points de prélèvement (année 2018) et comparés avec des données préexistantes (2013). Certains paramètres physico-chimiques ont été mesurés directement sur terrain et le reste l'a été au niveau du laboratoire d'analyse chimique de l'ADE de Bechar. Les paramètres ont ensuite été comparés aux normes relatives à la qualité de l'eau de l'OMS et des normes algériennes.

Les résultats ont conclu que les eaux de la nappe sont caractérisées par une minéralisation normale, avec une salinité acceptable, dont la concentration croît avec le temps. Les plus fortes concentrations sont enregistrées dans les points d'eau de moyenne profondeur tandis que les eaux de grande profondeur sont plus douces.

L'étude de la représentation minérale des eaux souterraines est effectuée d'abord au moyen du diagramme de Piper qui témoigne de la variation de facies chimique en fonction du temps et de l'espace avec des facies dominants tels que le chlorure sodique, le chlorure calcique et le sulfaté magnésienne. Puis du diagramme de l'échange ionique CAI-1 et CAI2 à partir duquel on s'est aperçu que tous les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude se situent au-dessus de la ligne (0) avec un coefficient  $R^2 = 0,69$  et une pente de  $-1,26$ , ce qui indique l'occurrence d'échange ionique inverse dans la zone d'étude.

La prédiction minéralogique réactive du sous-sol est étudiée par l'analyse de l'indice de saturation des eaux, qui montre qu'en fonction du temps, qu'il existe une saturation

(Phrase reformulée) pour le groupe des carbonatés et une sous-saturation pour le groupe des évaporites.

Pour achever ce volet hydro-chimique, nous avons effectué une analyse des composantes principales afin de déterminer la corrélation des paramètres entre eux. Les résultats indiquent que la plupart des paramètres physico-chimiques étudiés n'influencent pas la conductivité électrique, à l'exception de  $Mg^{+2}$ , TH et des résidus secs (RS), de la somme des cations majeurs et la somme des anions majeurs.

L'étude de la qualité bactériologique des eaux souterraines conclut que les ressources hydriques dans la zone d'étude sont exposées à des risques de contaminations accrues par les différents agents pathogènes des types coliformes totaux et fécaux, avec un degré de risque de contamination varié d'un point d'eau à un autre. L'étude montre aussi que quasiment tous les points d'eau traités ont des valeurs nettement plus élevées que la norme algérienne de potabilité en vigueur ; ce qui exposerait les consommateurs à des complications sanitaires et pathologiques.

Cette thèse s'achève par une étude de la vulnérabilité de la nappe face au risque de pollution par la méthode DRASTIC qui consiste à pondérer et reclasser sept paramètres environnementaux, en fonction des influences de chacun sur la vulnérabilité de la nappe puis à les superposer et les fusionner dans un outil SIG. Cette carte est ensuite comparée à l'indice de pollution aux nitrates, ce qui garantirait une délimitation des zones de protection prioritaires.

La carte de vulnérabilité obtenue montre que la zone d'étude est dominée à 70,33% par des zones de très faible à faible vulnérabilité et à 15,17 % de terrain de vulnérabilité moyenne. Les secteurs les plus vulnérables occupent 14,50% et correspondent entre autres à la zone agricole de Ouakda, notamment parce que dans ce secteur les eaux souterraines sont présentes à de faibles profondeurs, que le coefficient de recharge est élevé et que le sol est constitué de sols sableux.

L'analyse de l'indice de pollution aux nitrates a montré que la majorité de la zone d'étude (37%) enregistre une concentration en nitrates comprise entre 22,08 et 39,6 mg / l, ce qui rend cette eau impropre à la consommation humaine ou consommable mais à court terme pour les adultes et tous les animaux d'élevage, sauf dans le cas où les sources d'alimentation humaine ou animale seraient très riches en nitrates.

En comparant les taux de concentration en nitrates et la carte de vulnérabilité DRASTIC, on s'aperçoit que les zones de Boukais et d'Ouakda sont les secteurs les plus exposés au risque de contamination par les nitrates, par conséquent, ces secteurs doivent être une priorité pour les responsables du secteur de la distribution d'eau afin de garantir la santé des consommateurs.

En conclusion, les travaux de cette thèse nous ont permis de faire un diagnostic du potentiel hydrique de la zone d'étude, en particulier de la nappe d'eau du Turonien. Compte tenu de l'importance hydrogéologique de cette nappe dans l'amélioration de l'approvisionnement de la ville de Béchar en eau potable. Il est donc nécessaire d'approfondir cette étude pour acquérir une meilleure connaissance des caractéristiques des eaux souterraines dans cette région, afin d'établir un système de gestion intégré garantissant la permanence de cette importante ressource. Cela se fait en optant pour utilisation des méthodes et techniques modernes telles que la technologie de recharge artificielle, qui doit être précédée d'analyses isotopiques en vue de connaître l'origine de l'eau et déterminer ainsi les endroits les plus perméables qui doivent être utilisés pour la recharge artificielle. En outre, des lectures piézométriques périodiques régulières doivent être menées pour mieux entrevoir l'efficacité des techniques appliquées. En ce qui concerne la qualité de l'eau et son absence en éléments polluants, un protocole strict doit être mis en place pour protéger les sources et les forages exploités, avec des périmètres de protection à distance éloignée, afin d'assurer leur exploitation continue, et se référer également à des sources dangereuses de pollution représentée dans les décharges publics, ainsi que les rejets des eaux usées, qui doivent être tenus à l'écart de la proximité de la ville. En outre, des systèmes de simulation hydrodynamiques doivent être utilisés pour permettre d'appliquer différents scénarios et parvenir à travers des systèmes hydrogéologiques, lorsqu'il y a des variations de valeurs de débit d'exploitation, ainsi que la recharge artificielle.



---

# **Références bibliographiques**

---

**References**

- **ABDULLAH, T.O., Ali, S.S. & Al-Ansari, N.A.** (2016). Groundwater assessment of Halabja Saidaadiq Basin, Kurdistan region, NE of Iraq using vulnerability mapping. *Arab J Geosci* **9**, 223. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2264-y>
- **ABULUDE, F., Dare F.** (2018). NITRATE IN DRINKING WATER: HOW SAFE IS THIS IN AFRICA AND ASIA?. *Analele Universității din Oradea: Seria Geografie*. 28.
- **AGHLMAND, Reza & Abbasi, Ali.** (2019). Application of MODFLOW with Boundary Conditions Analyses Based on Limited Available Observations: A Case Study of Birjand Plain in East Iran. *Water*. 11. 1904. 10.3390/w11091904.
- **ALDAHAAN, Saadi & Al-Ansari, Nadhir & Knutsson, Sven.** (2016). Influence of Groundwater Hypothetical Salts on Electrical Conductivity Total Dissolved Solids. *Engineering*. 08. 823-830. 10.4236/eng.2016.811074.
- **ALOUI R., MEKKAOUI A., AMERI S., MERZOUGUI T., SADAT S.,** (2015) -La nappe turonienne dans la zone pilote d'Ouakda (Béchar, Sud-ouest, Algérie). Vol. 3, Issue 4, PP 53- 64.
- **AMINREZA & Pradhan, Biswajeet & Pirasteh, Saied & Shafri, Helmi.** (2014). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 71. 10.1007/s12665-013-2690-7.
- **Al-RAWABDEH, Abdulla & Al-Ansari, Nadhir & Al-Taani, Ahmed & Knutsson, Sven.** (2013). A GIS-Based Drastic Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Amman-Zerqa Groundwater Basin, Jordan. *Engineering*. 05. 490-504. 10.4236/eng.2013.55059. Neshat,
- **AMARASIRI Mohan, Daisuke Sano & Satoru Suzuki** (2020) Understanding human health risks caused by antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistance genes (ARG) in water environments: Current knowledge and questions to be answered, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50:19, 2016-2059, DOI: [10.1080/10643389.2019.1692611](https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1692611)
- **ANDRADE, Dahir Ramos de, & Andrade Júnior, Dahir Ramos de.** (2003). Typhoid fever as cellular microbiological model. *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo*, 45(4), 185-191. <https://doi.org/10.1590/S0036-46652003000400002>
- **ANRH / BETA Consults,** (2013) .REALISATION DES PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES DANS LA WILAYA DE BECHAR - BOUKAIS-. Agence nationale des ressources hydriques (Bechar)
- **AWAWDEH, Muheeb & Jaradat, Rasheed.** (2010). Evaluation of Aquifers Vulnerability to Contamination in the Yarmouk River Basin, Jordan, Based on DRASTIC Method. *Arabian Journal of Geosciences*. 3. 273-282. 10.1007/s12517-009-0074-9.
- **Azis, Akhmad & Yusuf, Hamzah & Faisal, Zulfiyah & Suradi, Muhammad.** (2015). Water Turbidity Impact on Discharge Decrease of Groundwater Recharge in

- Recharge Reservoir. *Procedia Engineering*. 125. 199-206.  
10.1016/j.proeng.2015.11.029.
- **BAAHMED D.**, (2015) - Bilan hydrique et evaluation des ressources en eau superficielle du bassin de la macta. Mémoire de doctorat, Université Université de USTO mohamed Boudiaf d'oran, Algérie, 195 p.
  - **BAKER, A.E.** (2002). Florida aquifer vulnerability assessment. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 34(6): 346
  - **BARCELONA, M. J., J. A. Helfrich, and E. E. Garske.** (1985). Sampling Tubing Effects on Ground Water Samples. *Analytical Chemistry* 57, 2, 460-464. (Errata page appears in *Analytical Chemistry* 57, 13, 2752.)
  - **BEKHIRA A., Habu M., Morsli B.** (2019). Management of hazard of flooding in arid region urban agglomeration using HECRAS and GIS software: The case of the Bechar's city. *Journal of Water and Land Development*. No. 42 (VII–IX) p. 21– 32. DOI: 10.2478/jwld-2019-0041.
  - **BELLOULA M.**, (2017) - Evaluation de l'aptitude aux écoulements et risque d'érosion dans le haut cours de la Medjerda par Modélisation. Mémoire de doctorat, Université Mostafa Benboulaïd BATNA-2-, Algérie, 218 p.
  - **BERREZOUG N.**, (2016). Hydrologie et modélisation Pluie-Débit de l'oued Boukiou (NW algérien), Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie, 218 p.
  - **BHATTACHARYA, Amartya.** (2010). Artificial ground water recharge with a special reference to India. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 4.
  - **BOUWER, Herman.** (2002). Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering. *Hydrogeology Journal*. 10. 121-142. 10.1007/s10040-001-0182-4.
  - **CENTRAL GROUND WATER BOARD.** (2000). Guide on Artificial Recharge to Ground Water in India.
  - **CHAVAILLON D.**, (1972) – Etude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara nord occidental : Colomb- Béchar à Reggane. Paris, CNRS. 393 p, 32fig. édit. Cent. Nat. Rech. SC., Paris, 362p, 180 fig.
  - **CHEKHNABA M.**, (2017) - Appréciation des Risques et Potentielle d'érosion Hydrique dans la Région de Naama . Mémoire de Matser 2, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM, Algérie, 82 p.
  - **CIJI, Alexander & Akhtar, M S.** (2019). Nitrite implications and its management strategies in aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture*. 12. 10.1111/raq.12354.
  - **COLINS, J., Sashikkumar, M. C., Anas, P. A., & Kirubakaran, M.** (2016). GIS-based assessment of aquifer vulnerability using DRASTIC Model: A case study on Kodaganar basin. *Earth Sciences Research Journal* 20(1), H1-H8. - doi: <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v20n1.52469>
  - **CORWIN, Dennis & Yemoto, Kevin.** (2017). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. *Salinity: Electrical Conductivity and total dissolved* . 10.2136/msa2015.0039.
  - **DEBBAR H., Chikha Blegacem B.**, (2017) - Etude Hydrologique et Hydrogéologique de la région de Tébessa par application de la télédétection et SIG.

- Mémoire de Master académique, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA, Algérie, 73 p.
- **DELEAU P.** (1951). Les bassins Houillers du Sud Oranais dans la région de Colomb - Béchar- Abadla. Série 2, strat. N°20, Bulletin de service de la carte géologique de l'Algérie, France, 277 p.
  - **DÍAZ-Cruz, Silvia & Barcelo, Damia.** (2008). Trace organic chemicals contamination in ground water recharge. *Chemosphere.* 72. 333-42. 10.1016/j.chemosphere.2008.02.031.
  - **DOBZYNSKI, Dariusz.** (2005). Silica origin and solubility in groundwater from the weathered zone of sedimentary rocks of the Intra-Sudetic Basin, SW Poland. *Acta geologica Polonica.* 55. 445-462.
  - **D.P.A.T,** (2018) -Bulletin de la direction de planification et aménagement du Territoire de la wilaya de Béchar.
  - **DRESNAY R.,** 1975 - Influence de l'héritage structural tardi-hercynien et de la tectonique contemporaine de la sédimentation juras-sique dans le sillon marin du Haut Atlas, Maroc.- Actes du IXème Congrès International de Sédimentologie, Nice, thème 4, p. 103-111.
  - **Earth Explorer,** 2020, LC08\_L1TP\_199038\_20210130\_20210130\_02\_RT; Geological Survey (U.S.)
  - **ENRIQUEZ, Carlos & Nwachuku, N & Gerba, Charles.** (2001). Direct Exposure to Animal Enteric Pathogens. *Reviews on environmental health.* 16. 117-31. 10.1515/REVEH.2001.16.2.117.
  - **ERSHAIDAT, N. & Abu-Jaber, Nizar & Al-Bataina, B. & Shobaki, J. & Jaradat, A..** (2009). Relationship between the effective diffusion coefficient of soil radon and groundwater recharge in semi-arid areas. *Environmental earth sciences.* 59. 261-268. 10.1007/s12665-009-0023-7.
  - **ESLAMIAN Saeid,**2014. Handbook of Engineering Hydrology (Three-Volume Set). published by taylor and francis group.
  - **ESTERHUYSE, S.** (2017). Developing a groundwater vulnerability map for unconventional oil and gas extraction: a case study from South Africa. *Environ Earth Sci* 76, 626. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6961-6>
  - **GALMIER D.,** (1972) -Photogéologie de la région d'Aïn Sefra, Algérie, thèse Doctorat d'état. Fac. Sci. Paris, 320p.
  - **GERBA C. P.** (2015). Environmentally Transmitted Pathogens. *Environmental Microbiology,* 509–550. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394626-3.00022-3>
  - **GHALIB, H.B.** (2017). Groundwater chemistry evaluation for drinking and irrigation utilities in east Wasit province, Central Iraq. *Appl Water Sci* 7, 3447–3467. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0575-8>
  - **GHEISARI Narges.** (2017). Groundwater Vulnerability Assessment Using a GIS-Based Modified DRASTIC Model in Agricultural Areas. Master thesis , University of Ottawa , Canada. pp:1-100

- **GOETHALS S, Gastmans C & Dierckx de Casterle B.** (2010) Nurses' ethical reasoning and behaviour: a literature review. *International Journal of Nursing Studies* 47, 635–650.
- **GORDON, Melita.** (2008). Salmonella infections in immunocompromised adults. *The Journal of infection*. 56. 413-22. 10.1016/j.jinf.2008.03.012.
- **GREEN CE, Freeman D, Kuipers E, Bebbington P, Fowler D, Dunn G, Garety PA.** (2008). Measuring ideas of persecution and social reference: the Green et al. Paranoid Thought Scales (GPTS). *Psychol Med.* Jan;38(1):101-11. doi: 10.1017/S0033291707001638. Epub 2007 Oct 1. PMID: 17903336.
- **GRUSSON Y.** (2016). modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne, Mémoire de Doctorat, Université de Toulouse, France, 382 p.
- **Guowei Liu & Ma, Fengshan & Liu, Gang & Guo, Jie & Duan, Xueliang & Gu, Hongyu.** (2020). Quantification of Water Sources in a Coastal Gold Mine Through an End-member Mixing Analysis Combining Multivariate Statistical Methods. *Water*. 12. 580. 10.3390/w12020580
- **HASHEMI, Hossein & Berndtsson, R. & Persson, Magnus.** (2014). Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modeling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 10.1080/02626667.2014.881485.
- **HARDIE, J & Whiley, Robert.** (1997). Classification and overview of the genera *Streptococcus* and *Enterococcus*. Society for Applied Bacteriology symposium series. 26. 1S-11S.
- **Hijmans J, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A,** (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25 : 1965–1978 (2005).
- **HEM JD.** (1989), Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, vol 2254, 3rd edn. USGS WSP, Washington D.C., pp 1–263
- **HOFFMANN AA, Iturbe-Ormaetxe I, Callahan AG, Phillips BL, Billington K, Axford JK, et al.** (2014) Stability of the *wMel Wolbachia* Infection following Invasion into *Aedes aegypti* Populations. *PLoS Negl Trop Dis* 8(9): e3115. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003115>
- **HENRIOT C. P., Martak D., Cuenot Q., Loup C., Masclaux H., Gillet F., et al.** (2019). Occurrence and ecological determinants of the contamination of floodplain wetlands with *Klebsiella pneumoniae* and pathogenic or antibiotic-resistant *Escherichia coli*. *FEMS Microbiol. Ecol.* 95:fiz097.
- **Hutchinson MF.** 1995. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems* 9: 385–403.
- **ICHALAL A.,** 2013. contribution à l'étude de la variation hydroclimatique du grand bassin versant de la soummam, universite de Jijel, Algérie, 73 p.
- **IDROTECNECO.** 1976. Etude hydrogéologique de la région de Béchar Rapport interne [Hydrogeological study of the Bechar region]. Internal report. [Unpublished]. Bechar, Algeria. DHWB pp. 170.

- **IZBICKI, John & Flint, Alan & Stamos, Christina.** (2008). Artificial Recharge Through a Thick, Heterogeneous Unsaturated Zone. *Ground water*. 46. 475-88. 10.1111/j.1745-6584.2007.00406.x.
- **KABOUR A., HANI A., MEKKAOUI A., CHEBBAH L.** 2015. Évaluation et gestion des ressources hydriques dans une zone aride cas de la ville de Béchar (sud-ouest Algérien) [Assessment and management of water resources in arid zone case of Béchar city (southwest Algeria)]. *Larhyss Journal*. Vol. 9 p. 7–19.
- **KENDOUCI, Mohammed Amin & Kharroubi, Benali & Abdelhak, Maazouzi & Bendida, Ali.** (2013). Study of Physic-Chemical Quality of Wastewater Discharged into the Natural Environment the Case of Bechar River Algeria. *Energy Procedia*. 36. 287-292. 10.1016/j.egypro.2013.07.033.
- **KHASHOGJI MS, El Maghraby MMS.** (2013) .Evaluation of groundwater resources for drinking and agricultural purposes, Abar Al Mashi area, south Al Madinah Al Munawarah City, Saudi Arabia. *Arab J Geosci* 6(10):3929–394
- **KOLAHCHI, Zahra & Jalali, Mohsen.** (2007). Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. *Journal of Arid Environments*. 68. 624-639. 10.1016/j.jaridenv.2006.06.010.
- **LACHACHE S. et Merzougui, T.** (2016). Apport des SIG dans la gestion intégrée des ressources en eau de la région de Béchar (Sud-Ouest Algérien). Thèse de Doctorat LMD . Université de Bechar .pp214
- **LAL-NAG, M., Morin, P.J.** (2009). The claudins. *Genome Biol* 10, 235. <https://doi.org/10.1186/gb-2009-10-8-235>
- **LOIZEAU, Sébastien & Rossier, Yvan & Gaudet, Jean-Paul & Réfloch, Aurore & Besnard, K. & Angulo-Jaramillo, Rafael & Lassabatere, Laurent.** (2017). Water infiltration in an aquifer recharge basin affected by temperature and air entrapment. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 65. 10.1515/johh-2017-0010.
- **LAOUINA A, Nafaa R, Coelho C, Miloud C, Carvalho T, Boulet AK, Ferreira A,** (2000). Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kebir, Maroc. *Bull Réseau Erosion* 2000 ; 20 : 256-74.
- **LARA, R.J. & Islam, Sirajul & Yamasaki, S. & Neogi, Sucharit & Nair, G.B..** (2011). Aquatic Ecosystems, Human Health, and Ecohydrology. 10.1016/B978-0-12-374711-2.01015-9.
- **LUCAS G.,** 1952 - Bordure nord des Hautes Plaines dans l'Algérie occidentale: primaire, Jurassique. Analyses structurales. XIXème Congr. géol. internat. Alger ; Monogr. Région. Algérie, (1) n° 21, 140.
- **MALHOTRA, Hina & Vandana, & Sharma, Sandeep & Pandey, Renu.** (2018). Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess. 10.1007/978-981-10-9044-8\_7.
- **MAHENDRA, Pal & Ayele, Yodit & Hadush, Angesom & Panigrahi, Sumitra & Jadhav, Vijay.** (2018). Public Health Hazards Due to Unsafe Drinking Water. 7. 10.4172/2167-7719.1000138.
- **MAHESHWARI, Mani & Nelapati, Krishnaiah & Kiranmayi, Bindu.** (2011). *Vibrio cholerae* - A Review. *Veterinary World*. 4. 423. 10.5455/vetworld.2011.423-428.

- **MARTÍNEZ-Bastida, J.J., Arauzo, M. & Valladolid, M.** (2010). Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeol J* **18**, 681–698. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0549-5>
- **MATTHESS G** (1982) The properties of groundwater. Wiley, New York
- **MCQUARRIE, D.A., Rock, P.A., Gallogly, E.B.**, 2011. The alkali metals, General chemistry fourth ed. James Vivian, University of Colorado at Colorado Springs pp. D1-D7.
- **MEKIDECHE D.Sai, N.Touat, S. et Younsi, N.** (1995). Carte hydrogéologique de la région de Béchar. Rapport interne, notice explicative, DHWB, Béchar, Algérie, 74 p.
- **MEKKAOUI A.**, (2000) - Bordure du sillon atlasique–plate-forme saharienne, pendant le jurassique inférieur et moyen (Grouz méridional, Charef -Fendi) Algérie Sud Occidentale. Mémoire de magistère, Université d’Oran, Algérie, 210 p.
- **MENCHIKOFF N.** (1930) – Recherches géologiques et morphologiques dans le Nord du Sahara occidental. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, VII, 2, p.139.
- **MERZOUGUI Touhami**, (2007). Élaboration d’un périmètre de protection du champ captant de la ville de Bechar- La plaine d’Ouakda -- Rapport Mars 2007- ANRH Bechar
- **MISSIMER, Thomas & Drewes, Jörg & Amy, Gary & Maliva, Robert & Keller, Stephanie.** (2012). Restoration of Wadi Aquifers by Artificial Recharge with Treated Waste Water. *Ground water*. 50. 514-27. 10.1111/j.1745-6584.2012.00941.x.
- **MJEJRA M**, 2016. Étude de l’évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d’Information Géographique. Doct. Géographie, Univers. Rennes 2 France, 2015, 311p.
- **MORSLI B, Mazour M, Mededjel N, Hamoudi A, Roose E**, (2004). Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse : Science et Changements Planétaires*, 2004, 15 (1) : 96-104. ISSN 1147-7806.
- **NAKAI, Hiromi & Goto, Touichirou & Ichikawa, Takashi & Okada, Yoshiki & Orii, Takaaki & Takeuchi, Kazuo.** (2000). Theoretical study on ammonia cluster ions: Nature of kinetic magic number. *Chemical Physics*. 262. 201-210. 10.1016/S0301-0104(00)00307-4.
- **NG, C.W.W. & Guan, P. & Shang, YJ.** (2001). Weathering mechanisms and indices of the igneous rocks of Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 34. 133-151. 10.1144/qjgeh.34.2.133.
- **OMAROVA, Alua & Berndtsson, R. & Kalishev, Marat & Sharapatova, Kulyash & Tussupova, Kamshat.** (2018). Protozoan Parasites in Drinking Water: A System Approach for Improved Water, Sanitation and Hygiene in Developing Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15. 10.3390/ijerph15030495.
- **OROJI, B.** (2019). Groundwater vulnerability assessment with using GIS in Hamadan–Bahar plain, Iran. *Appl Water Sci* **9**, 196 . <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1082-x>

- **OSUNLA, C. A., & Okoh, A. I.** (2017). Vibrio Pathogens: A Public Health Concern in Rural Water Resources in Sub-Saharan Africa. *International journal of environmental research and public health*, 14(10), 1188. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101188>
- **OUEDRAOGO, Issoufou & Defourny, Pierre & Vanclooster, Marnik.** (2016). Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *Science of The Total Environment*. 544. 939-953. 10.1016/j.scitotenv.2015.11.135.
- **PANAGOPOULOS, George & Antonakos, Andreas & Lambrakis, N..** (2006). Optimization of the DRASTIC Method for Groundwater Vulnerability Assessment Via the Use of Simple Statistical Methods and GIS. *Hydrogeology Journal*. 14. 894-911. 10.1007/s10040-005-0008-x.
- **PANDEY, Pramod & Kass, Philip & Soupir, Michelle & Biswas, Sagor & Singh, Vijay.** (2014). Contamination of water resources by pathogenic bacteria. *AMB Express*. 4. 51. 10.1186/s13568-014-0051-x.
- **PAREYN C.** (1961). Les massifs carbonifères du Sahara Sud Oranais. T. I. Stratigraphie et tectonique [The carboniferous massifs of the South Oran Sahara. Vol. I. Stratigraphy and tectonics]. Publications du Centre de recherches sahariennes. Sér. Géologie, 1. Paris. Centre national de la recherche scientifique pp. 362.
- **PRICE, Robert & Wildeboer, Dirk.** (2017). E. coli as an Indicator of Contamination and Health Risk in Environmental Waters. 10.5772/67330.
- **PYE, Havala & Nenes, Athanasios & Alexander, Becky et al.,** (2020). The acidity of atmospheric particles and clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 20. 4809-4888. 10.5194/acp-20-4809-2020
- **RAI, Shivendra & Singh, V..** (2005). Artificial Recharge of Unconfined Aquifer. 10.1002/047147844X.gw61.
- **RAIBER, Matthias & White, Paul & Daughney, Christopher & Tschirter, Conny & Davidson, Peter & Bainbridge, Sophie.** (2012). Three-dimensional geological modelling and multivariate statistical analysis of water chemistry data to analyse and visualise aquifer structure and groundwater composition in the Wairau Plain, Marlborough District, New Zealand. *Journal of Hydrology*. s 436–437. 13–34. 10.1016/j.jhydrol.2012.01.045.
- **RAMASESHA C.S., , Nandakumaran.P, S.K.Jain, K.R.Sooryanarayana and Y.B.Kaushik.** (2007) . MANUAL ON ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUNDWATER. Government of india , ministry of water resources , central ground water board . pp: 1-198.
- **RAO, C. & Muduli, Ronit & Bardhan, Avijit.** (2019). GROUNDWATER MANAGEMENT THROUGH ARTIFICIAL RECHARGE: ISSUES AND NEW PERSPECTIVES.
- **RVIDAL MONTES, A. M. Martinez-Graña, J. R. Martínez Catalán, P. Ayarza Arribas & F. J. Sánchez San Román** (2016) Vulnerability to groundwater contamination, SW salamanca, Spain, *Journal of Maps*, 12:sup1, 147-155, DOI: 10.1080/17445647.2016.1172271
- **SAATSAZ, Masoud & Sulaiman, Wan & Eslamian, Saeid & Mohammadi, Kourosh.** (2011). GIS DRASTIC model for groundwater vulnerability estimation of



- Astaneh-Kouchesfahan Plain, Northern Iran. *International Journal of Water*. 6. 10.1504/IJW.2011.043313.
- **SAGHRAVANI, Seyed Reza.** (2014). Comparison of water table fluctuation and chloride mass balance methods for recharge estimation in a tropical rainforest climate: a case study from Kelantan River catchment, Malaysia. *Environmental earth sciences*. 73. 10.1007/s12665-014-3727-2.
  - **SANTOS, Wedisson & Mattiello, Edson & Vergutz, Leonardus & Fagundes Costa, Rodolfo.** (2016). Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 179. 10.1002/jpln.201500484.
  - **SARDA, Dr. Purushottam & Sadgir, Parag.** (2015). Assessment of Multi Parameters of Water Quality in Surface Water Bodies-A Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 3. 331-336.
  - **SATOSHI, Ishii & Sadowsky, Michael.** (2008). Escherichia coli in the Environment: Implications for Water Quality and Human Health. *Microbes and environments / JSME*. 23. 101-8. 10.1264/jsme2.23.101.
  - **SERVICE DE GEOLOGIE D'ALGERIE (SGA)** -Coupures régulières des feuilles topographiques à 1/500 000e, 1/200 000e, 1/100 000e. Bulletin synoptique.
  - **SERVICE GEOLOGIQUE DE L'ALGERIE (SGA),** (2000) -Carte géologique de Ben Zireg à 1:200 000 NH-30-XXIII, Ministère de l'industrie et de l'énergie, Office nationale de la recherche géologique et minière, dressée par Arezki Zerrouki.
  - **SHARMA, S., Bhattacharya, A.** (2017). Drinking water contamination and treatment techniques. *Appl Water Sci* 7, 1043–1067. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0455-7>
  - **Taylor, Richard & Scanlon, Bridget & Doell, Petra & Rodell, Matthew & Beek, Rens & Wada, Yoshihide & Longuevergne, Laurent & Leblanc, Marc & Famiglietti, James & Edmunds, Mike & Konikow, Leonard & Green, Timothy & Chen, Jianyao & Taniguchi, Makoto & Bierkens, M.F.P. & Macdonald, Alan & Fan, Ying & Maxwell, Reed & Yechieli, Y. & Treidel, Holger.** (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*. 3. 322-329. 10.1038/nclimate1744.
  - **TIZARD, Ian.** (2004). Salmonellosis in wild birds. *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine - SEMIN AVIAN EXOTIC PET MED*. 13. 50-66. 10.1053/j.saep.2004.01.008.
  - **VALDER, J.F.; Long, A.J.; Davis, A.D.; Kenner, S.J.**(2012). Multivariate statistical approach to estimate mixing proportions for unknown end members. *J. Hydrol.*, 460, 65–76.
  - **VALENZUELA, Mariela, Mondaca, María A., Claret, Marcelino, Pérez, Claudio, Lagos, Bernardo, & Parra, Oscar.** (2009). Assessment of the origin of microbiological contamination of groundwater at a rural watershed in Chile. *Agrociencia*, 43(4), 437-446.
  - **VAN CAILLIE X,** (1989-90). Érodabilité des terrains sableux du zaïre et contrôle de l'érosion. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXV, no 1-2, 1989-90 : 197-208.
  - **VAN ELSAS, Jan & Semenov, Alexander & Costa, Rodrigo & Trevors, Jack.** (2011). Survival of Escherichia coli in the Environment: Fundamental and Public Health Aspects. *The ISME journal*. 5. 173-83. 10.1038/ismej.2010.80.

- **Vittecoq B, Lachassagne P, Lanini S, Maréchal JC**, 2010. Évaluation des ressources en eau de la Martinique : calcul spatialisé de la pluie efficace et validation à l'échelle du bassin versant. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 23, n° 4, 2010 : 361 - 373.
- **WHEELER, Andrea & Hartel, Peter & Godfrey, Dominique & Hill, Jennifer & Segars, William**. (2002). Potential of *Enterococcus faecalis* as a human fecal indicator for microbial source tracking. *Journal of environmental quality*. 31. 1286-93.
- **WHO**. (2011). Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva
- **Winter T., Judson W. Harvey ,O. Lehn Franke , William M. Alley**. (1998), Ground Water and Surface Water A Single Resource, U.S. Geological Survey Circular 1139 . pp : 1 -87
- **Yalçinkaya, Esra & Güler, C.** (2006). The Effects of Electrolyte Concentration, Ion Species and pH on the Zeta Potential and Electrokinetic Charge Density of Montmorillonite. *Clay Minerals - CLAY MINER.* 41. 853-861. 10.1180/0009855064140224.
- **Zhang Qiuwen, Xiaohong Yang, Yan Zhang, Ming Zhong**, (2013). "Risk Assessment of Groundwater Contamination: A Multilevel Fuzzy Comprehensive Evaluation Approach Based on DRASTIC Model", *The Scientific World Journal*, vol. <https://doi.org/10.1155/2013/610390>
- **ZULHAFIZAL othman & Muhamad, Safwan & Wahida, Farah & Latib, Mohd & Bachok, Mohd**. (2019). PERSISTENCE AND OCCURRENCES OF BACTERIA ON WASTEWATER IN SELECTED TREATMENT PLANT OF UITM PAHANG BRANCH, JENGA CAMPUS. 02. 75-80.

---

# **Annexes**

---

**Tableau 1:** variation Interannuelle des stations pluviométriques ONM Bechar et Mougheul (1961-2018)

station	X	Y	1 961	1 962	1 963	1 964	1 965	1 966	1 967	1 968	1 969	1 970
Mougheul	-2,216697	32,02141	110,19	170,76	183,56	151,91	156,65	107,25	157,00	116,07	137,89	68,01
ONM Béchar	-2,222777	31,599684	66,56	94,73	93,08	82,94	82,49	59,54	88,76	59,27	70,72	35,83
			Années									
station	X	Y	<b>1 971</b>	<b>1 972</b>	<b>1 973</b>	<b>1 974</b>	<b>1 975</b>	<b>1 976</b>	<b>1 977</b>	<b>1 978</b>	<b>1 979</b>	<b>1 980</b>
Mougheul	-2,216697	32,02141	196,73	112,93	109,42	151,85	162,84	191,49	151,55	74,91	182,04	158,43
ONM Béchar	-2,222777	31,599684	108,72	58,75	53,42	86,02	85,83	103,38	86,40	37,53	106,90	91,98
			Années									
station	X	Y	1 981	<b>1 982</b>	<b>1 983</b>	<b>1 984</b>	<b>1 985</b>	<b>1 986</b>	<b>1 987</b>	<b>1 988</b>	<b>1 989</b>	<b>1 990</b>
Mougheul	-2,216697	32,02141	63,54	173,43	54,26	61,37	176,75	176,14	141,87	162,33	153,42	124,85
ONM Béchar	-2,222777	31,599684	34,40	95,87	29,61	33,20	106,55	102,91	82,88	99,30	88,63	67,99
			Années									
station	X	Y	<b>1 991</b>	<b>1 992</b>	<b>1 993</b>	<b>1 994</b>	<b>1 995</b>	<b>1 996</b>	<b>1 997</b>	<b>1 998</b>	<b>1 999</b>	<b>2 000</b>
Mougheul	-2,216697	32,02141	184,34	99,47	113,19	151,01	126,10	166,64	138,40	99,65	112,73	108,32
ONM Béchar	-2,222777	31,599684	105,92	54,24	62,97	93,49	74,68	96,61	76,58	59,42	64,41	61,42
			Années									
station	X	Y	<b>2 001</b>	<b>2 002</b>	<b>2 003</b>	<b>2 004</b>	<b>2 005</b>	2 006	2 007	<b>2 008</b>	<b>2 009</b>	<b>2 010</b>
Mougheul	-2,216697	32,02141	96,17	111,40	161,98	147,73	117,74	174,56	135,12	180,18	125,78	149,65
ONM Béchar	-2,222777	31,599684	52,92	61,32	92,50	84,11	71,02	104,23	76,49	99,86	71,37	82,21
			Années									
station	X	Y	<b>2 011</b>	<b>2 012</b>	<b>2 013</b>	<b>2 014</b>	<b>2 015</b>	<b>2 016</b>	<b>2 017</b>	<b>2 018</b>		
Mougheul	-2,216697	32,02141	190,66	195,35	118,52	130,65	131,12	176,10	91,38	168,51		
ONM Béchar	-2,222777	31,599684	111,57	112,07	65,81	75,87	74,01	104,78	52,95	93,71		

**Tableau 2:** les valeurs d'humidité relative des stations de ONM Bechar et de Mougheul ( A'pres les données Global Weather Data for SWAT )

Relative Humidity ONM Bechar												
Date	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
2 000,00	0,52	0,34	0,29	0,23	0,27	0,15	0,12	0,14	0,21	0,33	0,45	0,54
2 001,00	0,48	0,40	0,29	0,22	0,20	0,13	0,11	0,15	0,22	0,27	0,44	0,58
2 002,00	0,51	0,33	0,31	0,31	0,22	0,13	0,14	0,18	0,22	0,30	0,44	0,57
2 003,00	0,48	0,45	0,36	0,26	0,21	0,15	0,12	0,16	0,22	0,44	0,53	0,54
2 004,00	0,51	0,41	0,30	0,28	0,28	0,16	0,13	0,16	0,21	0,28	0,49	0,62
2 005,00	0,51	0,45	0,31	0,22	0,18	0,18	0,13	0,15	0,26	0,33	0,46	0,60
2 006,00	0,67	0,56	0,29	0,23	0,24	0,18	0,13	0,16	0,28	0,31	0,48	0,62
2 007,00	0,50	0,47	0,31	0,33	0,23	0,17	0,13	0,16	0,21	0,37	0,47	0,57
2 008,00	0,60	0,51	0,31	0,22	0,26	0,19	0,14	0,14	0,27	0,56	0,56	0,64
2 009,00	0,61	0,49	0,43	0,33	0,21	0,20	0,14	0,14	0,36	0,33	0,42	0,52
2 010,00	0,49	0,53	0,33	0,28	0,24	0,20	0,15	0,18	0,27	0,37	0,47	0,52
2 011,00	0,49	0,39	0,38	0,27	0,34	0,28	0,15	0,18	0,22	0,40	0,50	0,54
2 012,00	0,49	0,43	0,39	0,36	0,20	0,17	0,14	0,15	0,23	0,44	0,55	0,52
2 013,00	0,42	0,37	0,33	0,26	0,23	0,19	0,18	0,18	0,33	0,25	0,44	0,57
2 014,00	0,52	0,43	0,35	0,24	0,27	0,20	0,14					
moyenne	0,52	0,44	0,33	0,27	0,24	0,18	0,14	0,16	0,25	0,35	0,48	0,57
En %	52,03	43,72	33,22	26,82	23,94	17,88	13,60	15,93	25,04	35,38	47,70	56,83

Relative Humidity Mougheul												
Date	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
2 000,00	0,53	0,34	0,31	0,25	0,29	0,16	0,13	0,15	0,22	0,35	0,48	0,56
2 001,00	0,50	0,42	0,31	0,23	0,23	0,14	0,12	0,16	0,24	0,28	0,46	0,61
2 002,00	0,51	0,35	0,33	0,33	0,24	0,14	0,15	0,20	0,24	0,32	0,46	0,60
2 003,00	0,50	0,47	0,38	0,28	0,23	0,16	0,13	0,17	0,23	0,46	0,55	0,56
2 004,00	0,52	0,42	0,33	0,31	0,32	0,18	0,15	0,18	0,23	0,29	0,51	0,64
2 005,00	0,50	0,47	0,34	0,24	0,20	0,20	0,14	0,17	0,28	0,35	0,48	0,62
2 006,00	0,69	0,57	0,31	0,25	0,26	0,19	0,14	0,18	0,30	0,32	0,50	0,64
2 007,00	0,50	0,49	0,33	0,37	0,25	0,19	0,14	0,17	0,22	0,39	0,49	0,58
2 008,00	0,61	0,54	0,33	0,24	0,29	0,21	0,15	0,15	0,29	0,59	0,58	0,65
2 009,00	0,65	0,52	0,46	0,36	0,24	0,21	0,15	0,16	0,39	0,34	0,44	0,54
2 010,00	0,53	0,57	0,36	0,31	0,27	0,23	0,16	0,20	0,29	0,40	0,49	0,56
2 011,00	0,51	0,40	0,40	0,29	0,36	0,30	0,16	0,19	0,24	0,42	0,53	0,55
2 012,00	0,49	0,44	0,41	0,39	0,21	0,19	0,16	0,16	0,28	0,45	0,57	0,53
2 013,00	0,44	0,39	0,36	0,27	0,25	0,20	0,19	0,20	0,35	0,27	0,46	0,59
2 014,00	0,54	0,45	0,38	0,26	0,29	0,23	0,16					
moyenne	0,53	0,46	0,36	0,29	0,26	0,20	0,15	0,17	0,27	0,38	0,50	0,59
En %	53,46	45,64	35,63	29,22	26,07	19,61	14,91	17,25	27,13	37,50	50,11	58,89

**Tableau 3:** facteurs de correction pour la longueur et le nombre de jours dans un mois pour la formule thornthwaite, lorsque le mois correspond à la durée moyenne possible d'ensoleillement en unités de 30 jours de 12 heures chacune

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.13	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

**Tableau 4:** Variation de niveau piézométrique de champ captant d'Ouakda a travers les deux piézomètres 1 et 2

Régions	Date	x	y	z	02/09/2008	23/09/2008	18/10/2008	17/11/2008	20/12/2008	23/03/2009	26/04/2009
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				29,7	30,4	27,72	28,2	24,7	26,4	25,75
	P2				25,4	26,2	18,9	22,84	18,7	24,1	22,35
Années											
Régions	Date	x	y	z	19/05/2009	20/07/2009	21/10/2009	24/11/2009	20/12/2009	21/01/2010	24/02/2010
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				26,2	26,3	25,3	21,3	24,7	24,5	23,9
	P2				23,8	21,3	21	15,4	18,7	25,15	24
Années											
Régions	Date	x	y	z	04/03/2010	04/04/2010	24/05/2010	24/06/2010	04/07/2010	31/08/2010	21/09/2010
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				24,28	24,28	24,45	27	24,28	25,08	25,08
	P2				25,22	25,22	25,25	23,9	25,22	23,04	25,3
Années											
Régions	Date	x	y	z	26/10/2010	29/11/2010	10/01/2011	22/02/2011	20/03/2011	17/04/2011	09/05/2011
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				25	21,27	24,8	24,7	24,9	25	25
	P2				25,22	15,33	25	25,1	25,1	25,2	25,1
Années											
Régions	Date	x	y	z	29/06/2011	29/07/2011	29/09/2011	31/10/2011	23/11/2011	28/12/2011	01/01/2012
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				21,8	22	24,68	24,6	24,4	24,3	24,7
	P2				25,05	25,1	24,98	21,9	24,9	25	24,8
Années											
Régions	Date	x	y	z	01/02/2012	15/03/2012	04/04/2012	06/06/2012	10/07/2012	05/08/2012	15/09/2012
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				24,4	24,1	24,4	24,85	24,7	24,95	24,99
	P2				24,8	24,8	25	24,95	24,9	24,8	24,85
Années											
Régions	Date	x	y	z	02/10/2012	12/11/2012	06/12/2012	21/01/2013	17/02/2012	17/03/2013	25/04/2013
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Ouakda	P1				25	25,1	24,76	24,55	24,45	24,2	25,2
	P2				24,56	25,05	23,9	24,5	24,4	24,8	25
Années											
Régions	Date	x	y	z	17/05/2013	27/06/2013	29/07/2013	29/08/2013	25/09/2013		
	Nom				NS	NS	NS	NS	NS		
Ouakda	P1				25,05	25,05	26,3	26,1	26,4		
	P2				25,1	23,7	23,5	24,3	24,7		

Tableau 5: Paramètres physico-chimiques des forages (campagne 2013)

Nom	Lon	lat	Z_	Exploitant	Prof.	temp	Niv_Sta	Niv_Dyn	PH	COND	RS_	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	HCO3	NH4	No2	PO4	Sio2	TDS	Miné	salinité	Date	nappe
MERIJA P3	-2,95	31,55	791	APC	12	11	4.3	0	7,55	2830	1780	82	116	310	1,4	430	595	23	207	0,009	0	0	11	1782	1755	1965	2013	TURONIEN
MERIJA P2	-2,95	31,55	794	APC	9	9,25	4.4	0	7,57	1666	1040	62	77	160	1,1	315	205	25	156	0,08	0	0	9,25	1016	1033	1001	2013	TURONIEN
MERIJA P1	-2,95	31,55	796	APC	10	9,8	22.9	5	7,48	2200	1380	87	88	230	1,3	470	240	20	201	0,004	0	0,2	9,8	1353	1364	1374	2013	TURONIEN
MOSQUE ELHODA P	-2,20	31,63	820	MOSQUE	15,2	10,7	0	0	7,55	2080	1300	103	101	157,5	1,1	240	440	50	226	0,006	0	0,009	8,5	1332	1290	1318	2013	TURONIEN
BECHAR F5	-2,19	31,64	846	ADE	200	19,05	0	0	7,38	1040	660	70	41	80	1	145	100	15	253	0	0,002	0	18	734	645	705	2013	TURONIEN
BECHAR F2	-2,19	31,64	816	ADE	25	12,7	0	0	7,46	1024	650	70	39	80	0,9	155	60	25	244	0	0,011	0	17	701	635	674	2013	TURONIEN
PZ 01	-2,19	31,64	813	ANRH	80	13,03	24.75	0	7,55	1620	1080	74	103	130	4,4	210	380	41	186	0,01	0	0,32	9,3	1144	1007	1129	2013	TURONIEN
Ouakda hycobar 3	-2,16	31,66	828	ADE	83	17,71	0	0	7,68	980	680	78	41	77	2,9	120	150	20	223	0	0,75	0,3	6,09	1687	712	750	2013	TURONIEN
PZ 02	-2,16	31,67	823	ANRH	80	13,81	24.3	0	4,55	35830	20000	20	663	579,7	5,5	780	420	26	61	1,1	0,45	0	1,5	1720	5225	1859,5	2013	TURONIEN
Forage 14 km	-2,14	31,68	823	ADE	81	16,93	0	0	7,56	1360	860	58	57	140	1,9	280	100	34	201	0	0,005	0,22	8,5	886	842	872	2013	TURONIEN
Ouakda hycobar 4	-2,14	31,68	838	ADE	80	14,59	0	0	7,06	990	630	57	33	90	2,2	130	130	12	171	0,02	0,03	0,01	10,4	642	615	625	2013	TURONIEN
PIEZO 4 ANCIEN HYCOBAR	-2,14	31,68	835	ANRH	83	17,89	0	0	7,06	990	630	57	33	90	2,2	130	130	12	171	0,024	0,03	0,01	10,4	642	615	625	2013	TURONIEN
PZ 03	-2,13	31,69	836	ANRH	80	14,67	14.4	0	7,74	1090	690	48	48	100	2,4	150	120	19	192	0,024	0,01	5,2	13	705	673	679	2013	TURONIEN
PZ 04	-2,10	31,72	845	ANRH	80	15,15	20.2	0	7,63	1080	690	82	28	91	2,5	155	98	27	217	0	0,005	0	10,75	718	672	700	2013	TURONIEN
Forage 20 km	-2,07	31,75	852	ADE	87	18,37	0	0	7,2	1037	660	62	41	88	2,1	140	130	7	186	0	0	0,36	9,25	671	643	656	2013	TURONIEN



Tableau 6: Paramètres physico-chimiques des forages (campagne 2018)

Nom	Lon	lat	Z	Niv. Stati	Prof.	Niv. Piéz.	Temp.	Niv. Dyn	Débit	PH	COND	RS	Ca	Mg	Na	K	CL	SO4	NO3	HCO3	NH4	NO2	PO4	SiO2	Miné	TDS	salinité	Date	nappe
Piezo 1 ouakda	-2,14	31,64	802	34,78	80	767,22	14,94	0		7,51	1 441,80	1 166,40	90,28	89,61	118,3	3,17	201,6	311,6	39,36	165,54	0,03	-	0,23	15,95	1 024,57	1 145,00	1024,57	2018	
MOSQUE ELHODA	-2,20	31,63	784	16,39	15,2	767,61	12,1	0	0	7,3	1 851,20	1 404,00	125,66	87,87	143,33	0,79	230,4	360,8	48	201,14	0,02	-	0,01	14,57	1 312,51	1 221,00	1312,51	2018	TURONIEN
BECHAR F5	-2,19	31,64	783	13,90	200	769,103	19,26	0	35	7,34	925,6	712,8	85,4	35,67	72,8	0,72	139,2	82	14,4	225,17	-	0,01	-	30,86	656,25	905	656,25	2018	TURONIEN
Forage 20 km	-2,07	31,75	823	15,83	87	807,16	18,18	0	15	7,52	922,93	712,8	71,64	35,67	80,08	1,71	134,4	119,6	6,72	175,54	-	-	0,26	15,86	654,22	651	654,22	2018	TURONIEN
PZ 03	-2,13	31,69	810	23,37	80	786,62	15,48	0	0	7,66	970,1	745,2	53,56	41,76	91	1,73	144	103,4	18,24	170,88	0,07	0,03	3,72	22,29	684,74	764	684,74	2018	TURONIEN
Ouakda hycobar 3	-2,16	31,66	807	30,62	83	776,38	17,64	0	6	7,37	872,2	734,4	87,16	35,67	70,07	2,09	115,2	133	19,2	207,47	-	2,1	0,21	14,22	724,42	795	724,42	2018	TURONIEN
PZ 02	-2,16	31,67	813	33,53	80	779,46	16,02	0	0	5,55	31 888,70	21 600,00	24,4	576,81	527,50	3,42	753,30	367,40	24,96	54,29	3,07	1,26	-	2,57	5 264,02	1 962,00	5264,023	2018	TURONIEN
PZ 04	-2,10	31,72	820	18,31	80	801,68	16,56	0	0	7,37	961,2	745,2	93,04	24,36	82,81	1,8	148,8	80,36	25,92	193,13	-	0,01	-	18,43	683,72	780	683,72	2018	TURONIEN
Forage 14 km	-2,14	31,68	809	23,73	81	785,26	17,1	0	0	7,54	1 210,40	928,8	70,76	49,59	127,4	1,37	268,8	82	32,64	178,89	-	0,01	0,16	14,57	856,69	835	856,69	2018	TURONIEN
Mebarki el hassan	-2,96	31,55	793	12,14	14	780,86	11,5	/	/	7,47	2 518,70	1 922,40	100,04	100,92	282,1	1,01	412,8	487,9	22,08	184,23	0,03	-	-	18,86	1 785,62	1 621,00	1785,62	2018	TURONIEN
MERIIJA P3	-2,95	31,55	784	4,17	12	779,83	11,2	/	/	7,65	1 482,74	1 123,20	75,64	66,99	145,6	0,79	302,4	168,1	24	138,84	0,22	-	-	15,86	1 051,02	948,00	1051,02	2018	TURONIEN
hassi equilibre 2	-2,28	31,59	764	13,65	45	750,35	13,5	10,47	/	7,8	3978	2700	135	117	472	7,1	833	1020	15	134	0,17	0,003	0,017	15,7	2513	2755	2513	2018	TURONIEN
boukais 2	-2,46	31,93	852	11,76	120	840,23	18,72	12,2	/	7,37	1463	971	97	63	9,1	1,34	231	210	3,1	252	0	0,047	0,37	12,37	923	1119	923	2018	TURONIEN
p 1 Laameur//	-2,24	31,95	870	11,43	45	858,57	13,7	/	/	8,2/2	1 051,20	677	69,6	56,1	14,8	2,1	84,1	183	39,1	83,1	0,04	0,63	2,3	11,54	682	553	682	2018	
P4 SAFFSIFA	-2,21	31,94	863	6,88	60	856,11	14,4	/	/	7,13	854,00	571	71,2	61,2	18,6	5,42	58,2	88,2	42,1	273,7	0	0,053	0,045	10,71	516	734	516	2018	
p 1 Boukais	-2,43	31,94	858	9,12	30	848,87	12,9	/	/	7,71	1 113,00	743	92	53	15	1,05	114	161,5	14,7	304,7	0	0,36	1,02	9,88	692	877	692	2018	