



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
UNIVERSITE ABBES LAGHROUR KHENCHELA  
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE  
DEPARTEMENT D'ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
MASTER en Ecologie et Environnement  
Option: Protection des Ecosystèmes

Thème

**Évaluation de la qualité des eaux et son  
adéquation à des fins d'irrigation.  
Cas de la région de Yabous, Khenchela  
(NE Algérien)**

Présenté par :

*M<sup>elle</sup>: SEKKAOUI Hadil*

*M<sup>elle</sup>: MOUSSAOUI Loubna*

Devant le Jury

Président: Dr ADDAD Dalila

MCAUnivAbbès Laghrouur -Khenchela-

Promoteur :Dr HALIMI Samia

MCAUnivAbbèsLaghrouur -Khenchela-

Examinatrice : Dr BERKANI Cherifa

MCBUnivAbbèsLaghrouur -Khenchela-

Année : 2022/2023

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout de nos études.*

*Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif d'un certain nombre de personnes que nous tenons à remercier.*

*Nous exprimons notre grande reconnaissance et nos vifs remerciements à Dr Halimi Samia, pour la confiance qu'elle nous témoigné en nous dirigé tout au long de ce projet. Malgré vos importantes obligations, vous aviez toujours été présente pour encadrer nos recherches dans la bonne direction et ceci été fondamental dans la bonne réalisation de ce travail. Ainsi que sa patience et ses conseils judicieux qui ont permis la réalisation de notre modeste travail.*

*Nous tenons donc à remercier les membres du jury: Dr Addad et Dr Berkani pour avoir accepté de présider et examiner cet humble travail et ont apporté des commentaires et corrections très importants.*

*Nous remercions toute l'équipe du laboratoire El Hamma et Mr. Chouf Lkheder, représentant de la ville de Yabous, pour leurs précieux conseils et leur disponibilité.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes, proches et lointaines, pour ce modeste travail.*

# *Dédicace*

*A mon honoraire, soutien et mon aide toute ma vie*

*Père révérent Rachid*

*Au cœur tendre et plus cher que mon âme,*

*Ma chère mère Aïcha*

*A qui Dieu a fortifié mes bras, mes frères*

*Meroua, Racha, Taha, Mohamed Mahdi et Seif Eddine*

*Dieu vous bénisse, je vous aime*

*A l'amie de ma vie Abba, à mon binôme et le compagnon de piste Loubna et sa famille,*

*chacun en son nom.*

*Merci d'être dans ma vie*

*A tous mes professeurs tout au long de mon parcours académique*

*A tous ceux qui ont bien prié pour moi*

*Je te dédie ce travail.*

*Hadil. S*

# Dédicace

*En tout premier, je remercie Dieu qui m'a donné la santé, et la volonté pour poursuivre mes études.*

*Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail à tous ce qui m'est chers,*

*A mes chers parents : Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance.*

*A mes pères « Hacen et Abdellah » les mots me manquent pour exprimer toute l'affection et toute la reconnaissance que j'éprouve pour vous, merci pour vos sacrifices et vos précieux conseils qui m'ont mené au succès dans tout ce que j'entreprends. Ce travail est avant tout pour vous.*

*A la lumière de mes jours, source de mes efforts, de ma vie et de mon bonheur, aucune dévotion ne peut exprimer mon respect, mon amour et ma reconnaissance pour les sacrifices que vous avez faits pour mon éducation et mon bien-être. Vous n'avez jamais cessé de me prodiguer des conseils et de prier pour moi, mes très chères mères « Djamila et Nassira » qui m'ont toujours apporté votre amour et votre affection, que dieu les protèges.*

*A mes soutiens à la vie, mes chers frères Ismail et Mouhamed Chakib :*

*A l'autre partie de mon cœur, mes belles sœurs Ardjouna, Nafissa, Afaf et ma puce Uham :*

*A mon cher oncle, Athman et à tous ma famille :*

*Une dédicace spéciale à les personnes chère à mon cœur, mes neveux « Djad, Iyad et Yazen » et ma nièce « Malak » :*

*A ma binôme « Hadil » et sa famille :*

*Aux personnes qui ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, à tous mes amis particulièrement: Maha, Ryhem, Rayen, Chaima, Halima, Zohra et Alima. Votre amitié est un honneur et une fierté pour moi, je vous remercie pour les moments inoubliables que nous avons partagés ensemble et pour le plaisir dont j'ai jouis avec vous.*

*A tous mes enseignants, qui m'ont suivie de mes premières années d'école jusqu'ici.*

*Enfin à moi-même.*

*Loubna.M*

## Résumé

L'eau est le secret de la vie et la base de toute activité humaine. Par conséquent, les villes agricoles dépendent de la qualité de l'eau en irrigation pour une bonne récolte, comme c'est le cas la région de Yabous (wilaya de Khenchela), surtout après les changements climatiques, la pollution et la consommation irrationnelle de cette ressource.

Située au Nord Est du territoire Algérien; la commune de Yabous appartient à l'ensemble des hautes plateaux constantinoise avec une superficie de 157 km<sup>2</sup>. Elle est soumise à un climat semi-aride, avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec qui peut influencer sur la qualité des eaux.

C'est dans ce sens que ce travail a été proposé et qui vise à identifier tous les caractéristiques chimiques des eaux de la région, en étudiant la variation des différents paramètres physico-chimiques et du processus (Température, Conductivité, pH, anions et cations) une campagne des eaux (de surface et souterraine) a été réaliser avec une analyse complète des paramètres physico-chimiques pour expliquer l'origine et l'évolution de chaque élément durant la période d'Avril 2023.

Après les interprétations des résultats d'analyse, on a constaté que les eaux de la commune de Yabous varient de bonne à admissible selon les corrélations et les représentations graphiques entre les différents éléments chimiques.

**Mots clés :** Yabous, hautes plateaux constantinoise, climat semi-aride, qualité des eaux.

## **Abstract**

Water is both the foundation of all human activity and the secret to life. In order to produce a successful crop, agricultural towns rely on the quality of water used for irrigation, as is the case in the region of Yabous (Khenchela), particularly in light of climate change, pollution, and irrational consumption of this resource.

The commune of Yabous, which spans 157 km<sup>2</sup> and is situated in the north eastern region of Algeria, is a part of the Constantine high plateaus. It experiences a semi-arid environment with cold, rainy winters and scorching, dry summers, which can have an impact on the quality of the water.

A water campaign (surface and underground) was conducted with a thorough analysis of the physico-chemical parameters to explain the origin and evolution of each the period of study. This work has been proposed in this context and aims to identify all the chemical characteristics of the waters of the region by studying the variation of the different physico-chemical parameters and of the process (Temperature, Conductivity, pH, anions and cations). According to the connections and visual representations between the various chemical constituents, the waters of the municipality of Yabous range from good to acceptable, according to the interpretations of the analysis results.

**Keywords:** Yabous, the Constantine Highlands, a semi arid environment, water quality.

## ملخص

الماء هو سر الحياة وأساس كل نشاط بشري. لذلك، تعتمد المدن الزراعية على جودة مياه الري للحصول على محصول جيد ، كما هو الحال في منطقة يابوس (ولاية خنشلة) ، خاصة بعد تغير المناخ والتلوث والاستهلاك غير الرشيد لهذا المورد.

تقع بلدية يابوس في الشمال الشرقي من الجزائر ؛ تنتمي إلى مجموعة المرتفعات القسطنطينية بمساحة 157 كم<sup>2</sup> تخضع المنطقة لمناخ شبه جاف ، مع شتاء بارد وممطر وصيف حار وجاف يمكن أن يؤثر على جودة المياه. تم اقتراح هذا العمل والذي يهدف إلى تحديد جميع الخصائص الكيميائية لمياه المنطقة، من خلال دراسة تباين الخصائص الفيزيائية والكيميائية المختلفة والعملية (درجة الحرارة ، الموصلية ، الأس الهيدروجيني ، الأيونات والكاتيونات) تم اخذ عينات للمياه (السطحية والجوفية) مع تحليل كامل للمعلمات الفيزيائية والكيميائية لشرح أصل وتطور كل عنصر خلال فترة أبريل 2023.

بعد تفسيرات نتائج التحليل ، وجد أن مياه بلدية يابوس تختلف من جيدة إلى مقبولة وفقا للارتباطات والتمثيلات الرسومية بين العناصر الكيميائية المختلفة.

**الكلمات المفتاحية:** يابوس ، هضاب قسطنطينية عالية ، مناخ شبه جاف ، جودة المياه .



# Table des matières

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

## Chapitre I: Présentation de la région de Yabous

I. Présentation générale et localisation de la zone d'étude .....3

I.1. Situation géographique .....3

I.2. Les coordonnées géographiques.....3

II. Caractéristique socio-économiques.....5

II.1. Population :.....5

II.2. Contexte Agricole dans la Zone d'étude.....5

II.2.1. Répartition des terres agricoles.....6

II.2.2. Production animale.....7

III. Géomorphologie de la zone d'étude.....8

III.1. Le relief.....8

III.2. Les pentes.....8

## Chapitre II : Caractéristique hydro climatique de la région d'étude

Introduction.....9

|   |          |
|---|----------|
| <b>I. Climatologie de la zone de Yabous.....</b>              | <b>9</b> |
| <b>II. Etude des variations des facteurs climatiques.....</b> | <b>9</b> |
| II.1. Variation des températures.....                         | 9        |
| II.2. Variation des précipitations.....                       | 11       |
| II.2.1. Répartition mensuelle des précipitations.....         | 11       |
| II.2.2. Répartition annuelle des précipitations.....          | 12       |
| III. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN.....                 | 13       |
| IV. Classification du climat.....                             | 15       |
| V. Le bilan hydrique.....                                     | 17       |
| V.1. L'évapotranspiration.....                                | 18       |
| V.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP).....            | 18       |
| V.1.2. L'évapotranspiration réelle (ETR).....                 | 18       |
| V.2. Le ruissellement.....                                    | 19       |
| V.3. L'infiltration.....                                      | 19       |
| VI. Calcul du bilan hydrique.....                             | 19       |
| VI.1. Interprétation du bilan hydrologique.....               | 21       |
| VII. Le vent.....   | 21       |
| VIII. L'Humidité.....   | 21       |

### **Chapitre III : Etude géologique et hydrogéologie de la zone**

|   |           |
|---|-----------|
| Introduction.....   | 23        |
| <b>I. Géologie générale de la Willaya de Khenchela.....</b> | <b>23</b> |
| <b>II. Géologie locale.....</b>                             | <b>24</b> |
| II.1. Le Trias.....   | 24        |
| II.2. Le Crétacé.....                                       | 24        |

|   |    |
|---|----|
| II.2.1. Le Crétacé supérieur.....               | 24 |
| II.2.2. Le Crétacé moyen.....                   | 25 |
| II.2.3. Le Crétacé inférieur.....               | 25 |
| II.3. Le Quaternaire.....                       | 26 |
| III. La tectonique de la région de Yabous ..... | 27 |
| IV. La perméabilité.....                        | 29 |
| V. Hydrogéologie de Yabous.....                 | 29 |

#### **Chapitre IV : Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation**

|  |           |
|--|-----------|
| Introduction.....  | 32        |
| <b>I. Etude des variations des paramètres physicochimiques des eaux de Yabous.....</b> | <b>35</b> |
| I.1. Variation des températures.....   | 35        |
| I.2. Variation de potentiel d'hydrogène (pH).....                                      | 36        |
| I.3. Variation de la conductivité électrique (CE).....                                 | 37        |
| I.4. Variation du Sodium ( $\text{Na}^+$ ).....  | 38        |
| I.5. Variation du Potassium ( $\text{K}^+$ ).....                                      | 39        |
| I.6. Variation du Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ).....                                    | 39        |
| I.7. Variation du Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ).....                                  | 40        |
| I.8. Variation des Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ).....                                    | 41        |
| I.9. Variation des Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).....                                | 42        |
| I.10. Variation des Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ).....                              | 43        |
| I.11. Variation des Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ).....                                  | 43        |
| I.12. Variation des Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).....                                  | 44        |
| <b>II. Etude de la composition chimiqueset les facies des eaux .....</b>               | <b>45</b> |
| II.1. Diagramme de PIPER.....  | 45        |

|  |           |
|--|-----------|
| II.2. Diagramme de SchöellerBerkaloff.....   | 45        |
| <b>III. Etude des processus hydrogéochimiques des eaux.....</b>                          | <b>47</b> |
| III.1. Corrélations des éléments chimiques majeurs.....                                  | 47        |
| III.1.1. Corrélation : Cl vs Ca.....   | 47        |
| III.1.2. Corrélation : Cl vs Na.....   | 47        |
| III.1.3. Corrélation Ca vs SO <sub>4</sub> .....   | 48        |
| III.1.4. Corrélation Ca, Ca/Mg vs HCO <sub>3</sub> .....                                 | 48        |
| III.1.5. Corrélation: Na/Ca vs SO <sub>4</sub> .....                                     | 50        |
| III.1.6. Correlation: Ca/(HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> ) vs Na/Cl.....              | 51        |
| <b>IV. Saturation vis-à-vis des phases minérales (Indices de saturation, Is).....</b>    | <b>51</b> |
| IV.1. Variation de l'indice de saturation.....   | 52        |
| IV.2. Corrélation des indices de saturation Is vis-à-vis TDS des eaux souterraines.....  | 53        |
| IV.3. Corrélation des indices de saturation Is vis-à-vis éléments chimiques majeurs..... | 53        |
| IV.4. Correlations: Is calcite vs Is Aragonite et Is anhydrite vs Is Gypse.....          | 55        |
| V.1. L'IEB (Indice d'Echange de Base ou Indice chlore alcalin).....                      | 56        |
| <b>VI. Aptitude des eaux de Yabous a l'irrigation.....</b>                               | <b>57</b> |
| VI.1. Risque de sodicité et de salinité.....   | 57        |
| VI.2. Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) ou Indice d'adsorption de sodium (IAS).....       | 60        |
| VII. Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau (SEQ-Eau).....                          | 61        |
| <b>Conclusion générale.....</b>  | <b>63</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>   | <b>65</b> |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure.01</b> : Situation géographique de la zone d'étude.....  | 4  |
| <b>Figure.02</b> : Production végétale de la commune de Yabous(2021/2022).....                                   | 5  |
| <b>Figure.03</b> : Répartition des terres dans la commune de Yabous (2021/2022).....                             | 6  |
| <b>Figure.04</b> : Production animal de la commune de Yabous (2021/2022).....                                    | 7  |
| <b>Figure.05</b> : Courbe de variation des températures moyennes (ST El Hamma, 1990-2020)....                    | 10 |
| <b>Figure.06</b> : Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelles (St El Hamma, 1990-2020)..... | 12 |
| <b>Figure.07</b> : Histogramme de variation des précipitations moyennes annuelles (1990-2020)..                  | 13 |
| <b>Figure.08</b> : Diagramme Ombrothérmique de Gaussen.....  | 14 |
| <b>Figure.09</b> :Climagramme d'Emberger.....  | 16 |
| <b>Figure.10</b> : Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite (1990-2020).....                   | 20 |
| <b>Figure.11</b> : Courbe de variation de L'humidité enregistrée à la station la période (2004-2018).....        | 22 |
| <b>Figure.12</b> : Carte géologie de la région de Khenchela. (Source : DEW, 1992).....                           | 26 |
| <b>Figure.13</b> : Colonne stratigraphique synthétique de l'Atlas saharien orientale .....                       | 28 |
| <b>Figure.14</b> : Coupe hydrogéologique schématique.....  | 30 |
| <b>Figure.15</b> : Carte des nappes aquifères (DHW. Khenchela, 1992).....  | 31 |
| <b>Figure.16</b> : Carte d'inventaire des points de prélèvements des eaux dans Yabous (Avril, 2023).....         | 33 |
| <b>Figure.17</b> : Photos des ressources en eau de la région de Yabous.....                                      | 34 |
| <b>Figure.18</b> :Echantillonnage d'eau et mesure des paramètres in situ (Avril 2023).....                       | 34 |
| <b>Figure.19</b> : Courbe de variation des températures (Avril, 2023).....                                       | 36 |
| <b>Figure.20</b> : Courbe de variation du pH (Avril, 2023).....  | 36 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure.21</b> : Courbe de variation de la Conductivité électrique (Avril, 2023).....  | 37 |
| <b>Figure.22</b> : Courbe de variation du sodium (Avril, 2023).....  | 38 |
| <b>Figure.23</b> : Courbe de variation du potassium (Avril, 2023).....   | 39 |
| <b>Figure 24</b> : Courbe de variation du calcium (Avril, 2023).....   | 40 |
| <b>Figure.25</b> : Courbe de variation du magnésium (Avril, 2023).....   | 41 |
| <b>Figure.26</b> : Courbe de variation des chlorure (Avril, 2023).....   | 42 |
| <b>Figure.27</b> : Courbe de variation de sulfate (Avril, 2023).....   | 42 |
| <b>Figure.28</b> : Courbe de variation des bicarbonate (Avril, 2023).....  | 43 |
| <b>Figure.29</b> : Courbe de variation des nitrites (Avril, 2023).....   | 44 |
| <b>Figure.30</b> : Courbe de variation des nitrates (Avril, 2023).....   | 44 |
| <b>Figure 31</b> : Facies chimique des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....  | 46 |
| <b>Figure.32</b> : Corrélation ionique Cl vs Ca des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....   | 47 |
| <b>Figure.33</b> : Corrélation ionique Cl vs Na des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....   | 48 |
| <b>Figure.34</b> : Corrélation ionique Ca vs SO <sub>4</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....                            | 48 |
| <b>Figure.35</b> : Corrélation ionique Ca, HCO <sub>3</sub> et SO <sub>4</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....          | 49 |
| <b>Figure.36</b> : Corrélation ionique Ca/Mg vs HCO <sub>3</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....                        | 50 |
| <b>Figure.37</b> : Corrélation ionique Na/Ca vs SO <sub>4</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....                         | 50 |
| <b>Figure.38</b> : Corrélation ionique Ca/(HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> ) vs Na/Cl des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)..... | 51 |
| <b>Figure.39</b> : Courbes de variation des indices de saturation des minéraux (Avril, 2023).....  | 52 |
| <b>Figure.40</b> : Corrélation des indices de saturation Is vis-à-vis TDS des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....               | 53 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure.41</b> : Variation des indices de saturation (Is) en fonction des principaux éléments constitutifs du minéral concerné (minéraux carbonatés) (Avril, 2023).....   | 54 |
| <b>Figure.42</b> : Variation des indices de saturation(Is) en fonction des principaux éléments constitutifs du minéral concerné (minéraux évaporitiques) (Avril, 2023)..... | 55 |
| <b>Figure.43</b> : Variation des indices de saturation (Avril, 2023).....   | 56 |
| <b>Figure.44</b> : Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Wilcox des eaux de Yabous (Avril, 2023).....  | 59 |
| <b>Figure.45</b> : Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Riverside des eaux de Yabous (Avril, 2023).....   | 60 |
| <b>Figure.46</b> : Courbe de variation des SAR calculés des eaux de la région de Yabous.....  | 61 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau.01</b> : Production végétale de la commune de Yabous (2022).....  | 5  |
| <b>Tableau.02</b> : Répartition des terres dans la commune de Yabous (2021/2022).....  | 6  |
| <b>Tableau.03</b> : Production animal de la commune de Yabous(2021/2022).....  | 7  |
| <b>Tableau.04</b> : Les coordonnées géographiques de la station météorologique.....  | 9  |
| <b>Tableau.05</b> : Température moyenne mensuelle (1990-2020).....   | 10 |
| <b>Tableau.06</b> : Précipitation moyenne mensuelle (1990-2020). ....  | 11 |
| <b>Tableau.07</b> : Précipitation moyenne annuelle (1990-2020).....  | 12 |
| <b>Tableau.08</b> : Précipitation et la température moyenne mensuelle (1990-2020). ....  | 14 |
| <b>Tableau.09</b> : Classification des climats selon l'indice de De Martonne.....  | 15 |
| <b>Tableau.10</b> : Correspondances entre les étages bioclimatiques et les précipitations d'après..                                | 17 |
| <b>Tableau.11</b> : Tableau récapitulatif des paramètres climatiques : P, I, R, ETP et ETR.....                                    | 19 |
| <b>Tableau.12</b> : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite. ....  | 19 |
| <b>Tableau.13</b> : Vitesse du vent (m/s) enregistrée à la station d'El Hamma (2004-2018).....                                     | 21 |
| <b>Tableau.14</b> :Variation de l'humidité relative à la station d'El Hamma (2004-2018). ....                                      | 21 |
| <b>Tableau.15</b> : Caractéristiques de matériaux de bassin versant de point de vue( perméabilité –<br>résistance).....            | 29 |
| <b>Tableau.16</b> : Statistiques élémentaires des différents paramètres physico-chimiques des eaux<br>de Yabous (Avril, 2023)..... | 35 |
| <b>Tableau.17</b> : Rapport entre la conductivité et la minéralisation. ....   | 38 |
| <b>Tableau.18</b> :Les faciès chimiques des eaux de Yabous. ....   | 45 |
| <b>Tableau.19</b> : Evolution des indices de saturation des minéraux (Avril, 2023).....  | 52 |
| <b>Tableau.20</b> : Valeurs calculées des Indices d'Echange de Base(IEB) des eaux de Yabous<br>(Avril, 2023).....                  | 58 |
| <b>Tableau.21</b> : Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation (méthode de SAR). .                                | 60 |
| <b>Tableau.22</b> : Grille de qualité des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023).....   | 62 |

## Liste des abréviations

| <b>Abréviations</b>                | <b>Explication</b>                      | <b>Abréviations</b>                | <b>Explication</b>                |
|------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>°C</b>                          | Degré Celsius                           | <b>m/s</b>                         | Mètre par seconde                 |
| <b>µS/cm</b>                       | Micro Siemens par centimètre            | <b>Max</b>                         | Maximum                           |
| <b>BH</b>                          | Bilan Hydrique                          | <b>mg/l</b>                        | Milligramme par litre             |
| <b>Ca<sup>2+</sup></b>             | Calcium                                 | <b>Mg<sup>2+</sup></b>             | Magnésium                         |
| <b>CE</b>                          | Conductivité électrique                 | <b>Min</b>                         | Minimum                           |
| <b>Cl<sup>-</sup></b>              | Chlorures                               | <b>mm</b>                          | Millimètre                        |
| <b>DA</b>                          | Le déficit agricole                     | <b>Moy</b>                         | Moyenne                           |
| <b>DHW</b>                         | Direction de l'Hydraulique de la Wilaya | <b>Na<sup>+</sup></b>              | Sodium                            |
| <b>etc</b>                         | Et cetera                               | <b>NE-SW</b>                       | Nord-Est/Sud-Ouest                |
| <b>ETP</b>                         | L'évapotranspiration potentielle        | <b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>  | Nitrites                          |
| <b>ETR</b>                         | L'évapotranspiration réelle             | <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>  | Nitrates                          |
| <b>E-W</b>                         | Est-Ouest                               | <b>N-W</b>                         | Nord-Ouest                        |
| <b>EXC</b>                         | Excédent                                | <b>NW-SE</b>                       | Nord-Ouest/Sud-Est                |
| <b>GPS</b>                         | Global Positioning System               | <b>OMS</b>                         | Organisation Mondiale de la Santé |
| <b>Ha</b>                          | Hectare                                 | <b>P</b>                           | Précipitation                     |
| <b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> | Bicarbonate                             | <b>P</b>                           | Puits                             |
| <b>I</b>                           | Infiltration                            | <b>pH</b>                          | Potentiel hydrogène               |
| <b>I</b>                           | Indice d'aridité                        | <b>Q2</b>                          | Quotient pluviométrique           |
| <b>IEB</b>                         | Indice d'Echange de Base                | <b>Qx</b>                          | Quintaux                          |
| <b>Is</b>                          | Indice de saturation                    | <b>R</b>                           | Ruissellement                     |
| <b>K</b>                           | Kelvin                                  | <b>SAR</b>                         | Sodium Absorption Ratio           |
| <b>K<sup>+</sup></b>               | Potassium                               | <b>S-E</b>                         | Sud-Est                           |
| <b>Km<sup>2</sup></b>              | Kilomètre carré                         | <b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> | Sulfate                           |
| <b>M</b>                           | Température maximale                    | <b>ST</b>                          | Station                           |
| <b>m</b>                           | Température minimal                     | <b>T</b>                           | Température                       |
| <b>m</b>                           | Mètre                                   | <b>TDS</b>                         | Total Dissolved Solids            |



# *Introduction générale*



## Introduction générale

---

L'eau est l'un des éléments les plus essentiels à la survie sur terre et constitue un élément constitutif majeur des mondes minéral et organique. Il est impliqué dans toutes les activités quotidiennes notamment, domestiques, industrielles et agricoles. Sans cette substance simple mais complexe, la vie sur terre n'aurait jamais existé.

Sur terre, 97 % de l'eau de surface est salée ; les 3 % restant constituent les réserves d'eau douce de la planète. On a approximativement la répartition suivante : 2/3 d'eau douce enfermée dans les calottes polaires, les glaciers ou le roc profond et le reste sous forme d'eau douce accessible (**Boutebba et al. 2022**).

La molécule d'eau est l'association d'un atome : d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène sous le symbole H<sub>2</sub>O. L'eau en tant que liquide est considérée comme un solvant universel, il se congèle à 0, il peut devenir vapeur à 100C qui est sa température d'ébullition, mais ces principales caractéristiques sont qu'il est inodore, incolore et sans goût (**Mourdi et al. 2022**).

L'augmentation rapide de la population et l'amélioration du niveau de vie des populations favorisent le développement économique et social et nécessitent une augmentation proportionnelle de la demande en eau. Cependant, des années successives de sécheresse couplées à des apports annuels épars et irréguliers d'eaux de surface et souterraines ralentissent le développement et créent de sérieux problèmes pour la gestion de ces ressources. Cela se reflète clairement en Algérie, où le développement économique repose en grande partie sur une agriculture nécessitant une forte mobilisation des ressources en eau, alors qu'en revanche, cela coïncide avec les effets d'une sécheresse persistante depuis le début des années 1980 (**Boulahia, 2016**).

La situation agricole en Algérie est désastreuse ; la production agricole n'a que légèrement augmenté et a eu une influence considérablement réduite sur l'économie. Les ressources en eau sont relativement rares et diminuent avec le temps. Actuellement, une grande partie des terres irriguées ne dispose pas d'un approvisionnement en eau adéquat pour soutenir la culture de plantes productives ou délicates, c'est pourquoi un seul souci des marais peut être cultivé chaque année sur une seule parcelle de terrain qui est parfois désignée pour la culture de plusieurs variétés.

Dans le district de Yabous de la province de Khenchela, l'eau est une ressource rare, fragile et inégalement répartie dans la zone. La demande en eau ne cesse d'augmenter et l'utilisation des eaux de surface et des eaux souterraines est incontournable.

Cette étude s'articule autour du plan de travail suivant:

## **Introduction générale**

---

- Dans un premier temps, nous avons procédé à une synthèse bibliographique représentant une étude générale des caractéristiques géomorphologiques, géologiques, et les principales caractéristiques climatologiques et hydrogéologiques.
- Ensuite nous avons enchainé par une partie expérimentale, où on a représenté puis interpréter l'évolution des éléments chimiques et les paramètres physiques des eaux de la région de Yabous pour voir l'origine du mécanisme de la chimie des eaux enfin une conclusion vient clore notre travail par une conclusion qui résume tous ce qu'on a fait en détail dans les chapitres précédents.

### **OBJECTIFS DU TRAVAIL**

Une fois en contact avec la roche réservoir, l'eau de la nappe peut s'enrichir de nouveaux éléments provenant du réservoir géologique. Cette interaction (eau/roche réservoir) est d'autant plus importante que le temps de résidence est long.

La détermination de l'origine de la minéralisation des eaux souterraines et la compréhension de ses comportements hydrologiques et géochimiques, ont été approchées par l'étude des corrélations établies entre les principaux éléments majeurs d'une part et entre ces derniers et le résidu sec d'autre part ainsi que par la saturation de l'eau vis-à-vis des minéraux et de la charge saline.

Donc l'objectif de ce travail est d'avoir une idée sur l'évolution des éléments chimiques des eaux de la région de Yabous, afin de cerner les différents mécanismes qui sont à l'origine de la minéralisation des eaux du site, en se basant sur les différentes corrélations: éléments majeurs ( $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$  et  $SO_4^{-2}$ ), indices de saturation (Is) vis-à-vis de certains minéraux et le taux des sels.

Pour l'adéquation des eaux de Yabous à l'irrigation des cultures sachant que la zone d'étude est à vocation agricole, on a projeté nos résultats sur deux diagrammes : Wilcox et Richard, dans le but d'évaluer les risques liés à la salinisation et l'alcalinisation des eaux sur le rendement agricole, sur la structure et la qualité du sol.



## **Chapitre I**

# ***Présentation de la région de Yabous***



## I. Présentation général et localisation de la zone d'étude

La commune de Yabous appartient à la tribu de BaniOjana, qui comprend quatre communes, dont trois sont administrativement subordonnées au district de Bouhmama, notamment a été crier dans le découpage communal de 1984.

Le mot Yabous est le nom donné à une région des Aurès qui a joué un rôle important de l'éternité à l'état nomade jusqu'à l'ère de l'indépendance et de ce que l'histoire a préservé, c'est le théâtre de la bataille entre les byzantins sous la direction de Solomon en 539 et la population. Amazigh sous la direction de Bidas ou Jana (FTY, 2022).

### I.1. Situation géographique

La commune de Yabous est l'une des communes de la wilaya de Khenchela, située à l'Ouest du chef-lieu de la wilaya à distance de 60 km, elle s'étale sur une superficie 157 km<sup>2</sup>, son climat semi-aride sec et froid (FTY, 2022).

La commune de Yabous est limitée :

- Au Nord par les communes de Taouziant et Ouled Fadel,
- Au Sud par la commune d'Ichemoul et Bouhmama,
- A l'Est par la commune de Chelia et Taouzianet,
- A l'Ouest par les communes de Foum Toub et Timgad.

### I.2. Les coordonnées géographiques

- La latitude: 35.4081.
- La longitude: 6.64184.
- L'Altitude:1167 m.
- 35° 24' 29" Nord, 6° 38' 31" Est.

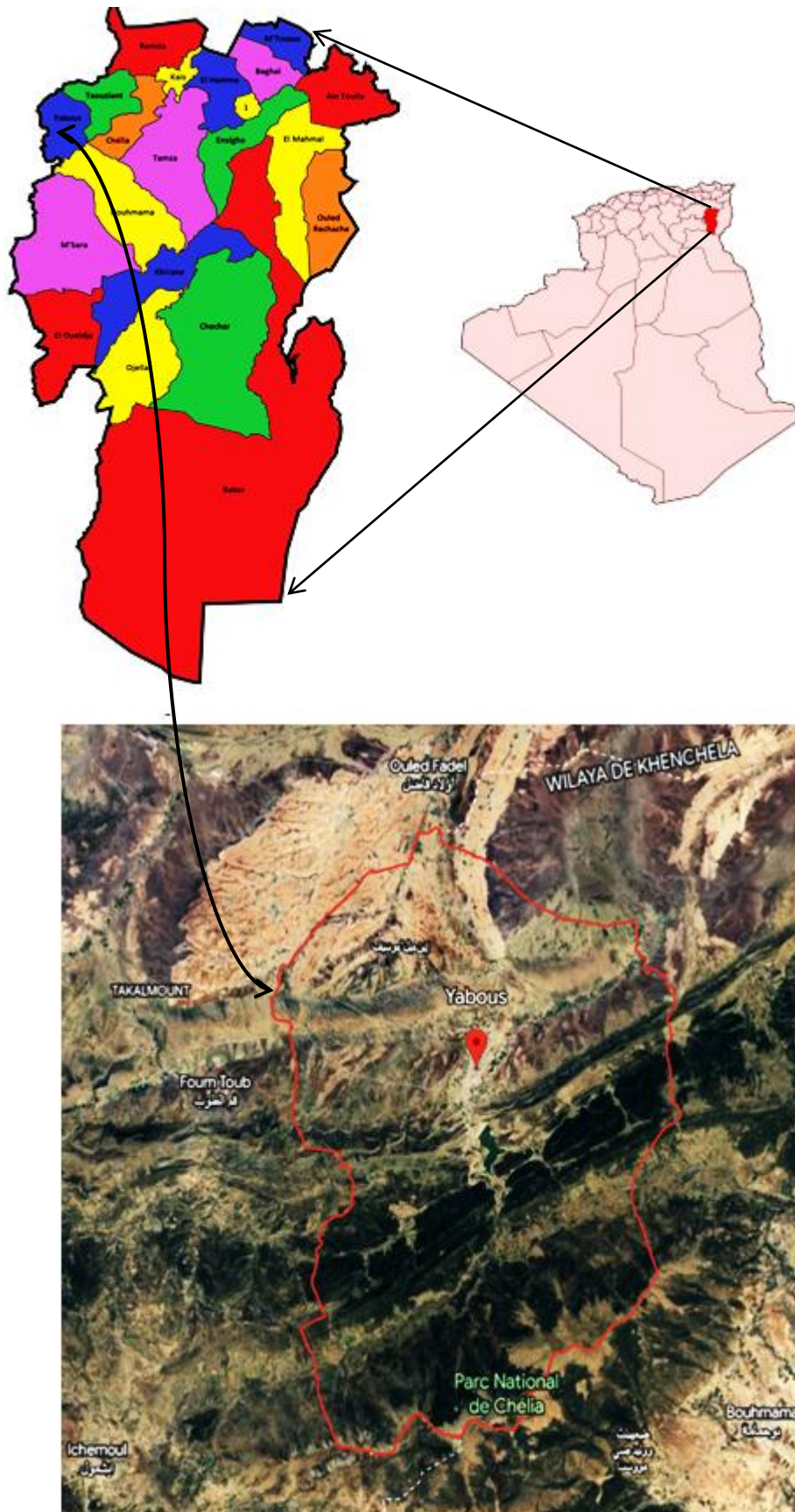


Figure.01 : Situation géographique de Yabous (Google, Earth, 2023)

## II. Caractéristique socio-économiques

### II.1. Populations

Au 31/12/2022 et selon l'annuaire statistique service de planification statistique de Yabous, la surface totale de Yabous a été estimée à 157 km<sup>2</sup>. La commune de Yabous comptait 14000 habitants (FTY, 2022).

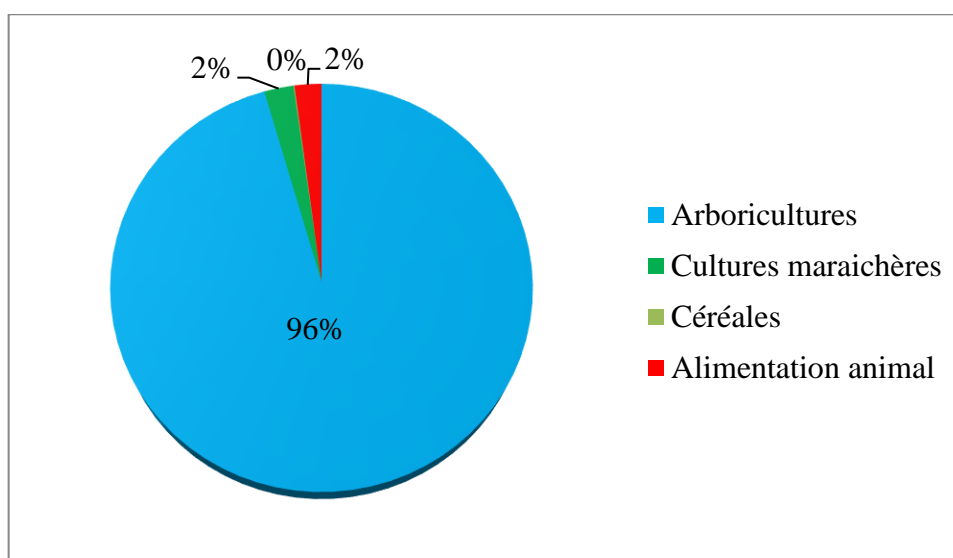
### II.2. Contexte Agricole dans la Zone d'étude

La région de Yabous est à une vocation agricole, dominé par la culture de céréales et de l'élevage qui ont été pratiqué d'une manière traditionnel. Malgré les conditions naturelles et climatiques pénibles de la région, Yabous a connu un essor ces dernières années par le développement d'une nouvelle spéculation qui prend plus de place de jour en jours, c'est l'arboriculture qui a connu une extension de superficie importante et surtout le pommier.

**Tableau.01:** Production végétale de la commune de Yabous (2021/2022)

| Espèces              | Production (Q <sub>x</sub> ) | Superficie (Ha) |
|----------------------|------------------------------|-----------------|
| Arboricultures       | 145410                       | 512             |
| Cultures maraichères | 3531                         | 27              |
| Céréales             | 122                          | 749.2           |
| Alimentation animal  | 3224                         | 31              |

(Source : DAY, 2022)



**Figure.02 :** Production végétale de la commune de Yabous (2021/2022)

Cette nouvelle spéculation a contribué au développement de l'activité agricole dans la région, de ce fait a donné un souffle de développement dans la région et des revenus aux paysans de la zone, ce qui a une incidence positive sur le niveau de vie la population.

La commune de Yabous a connu un développement très important ces dernières années en termes de développement de la production végétale et plus spécifiquement une nouvelle spéculation d'importance croissante en arboriculture. Cette nouvelle activité spéculative a donné lieu au développement d'activités agricoles dans la région.

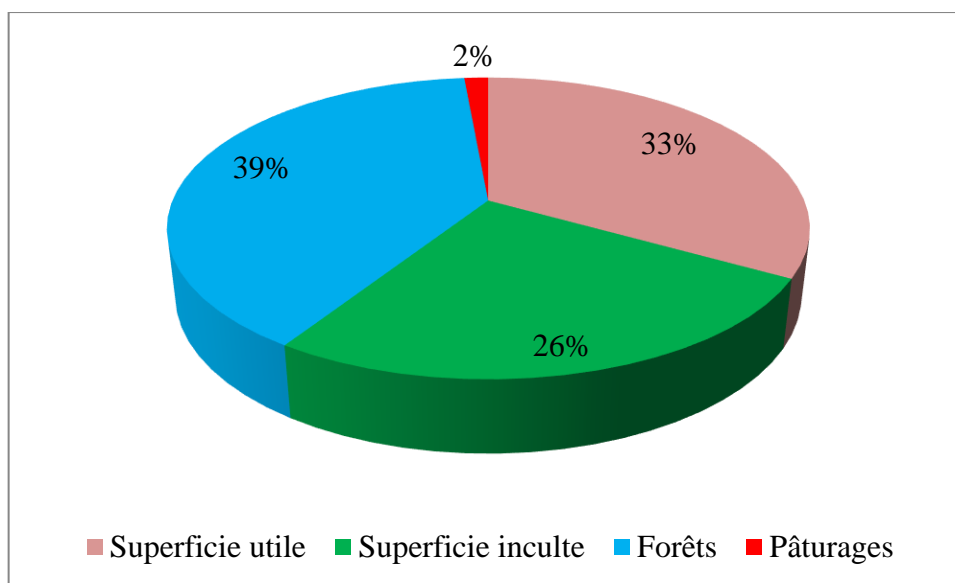
**II.2.1. Répartition des terres agricoles**

Yabous occupe une superficie totale appréciée 16010 ha, est divisé en trois catégories. D'après le tableau 02, nous remarquons que la superficie importante est occupée par des forêts (7349ha). Deuxièmement, la superficie utile à l'agriculture est 6176 ha, et la superficie ne convient pas à l'agriculture est occupée 4856.8 ha.

**Tableau.02 :** La répartition des terres dans la commune de Yabous (2021/2022)

| Terres             | Superficie (ha) |
|--------------------|-----------------|
| Superficie utile   | 6176            |
| Superficie inculte | 4856,8          |
| Forêts             | 7349            |
| Pâturages          | 267             |

(Source : DAY, 2022)



**Figure.03 :** La répartition des terres dans la commune de Yabous (2021/2022)

**II.2.2. Production animale**

La production animale de la commune de Yabous dépend de l'écart quantitatif des différents animaux, puisqu'elle a atteint l'année 2021-2022 :

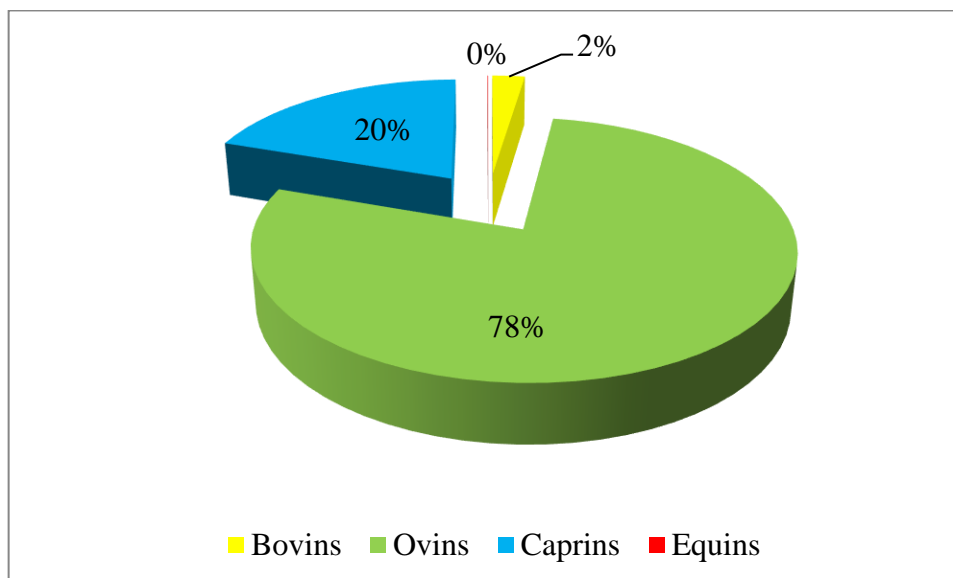
- Nombre de bovins : 416 têtes avec une production laitière 681395 litres.
- Nombre d'ovins : 13630 têtes avec une production laitière 238182 litres et la laine 166 Qx.
- Nombre de caprins : 3442 têtes avec une production laitière 10595 litres.
- Nombre d'équins : 07 têtes.

Il dépend également de l'apiculture d'environ 850 essaims avec une quantité estimée de miel de 23,4 Qx (DAB, 2022).

**Tableau.03** : Production animal de la commune de Yabous (2021/2022)

| Animaux        | Nb de Tête |
|----------------|------------|
| <b>Bovins</b>  | 416        |
| <b>Ovins</b>   | 13630      |
| <b>Caprins</b> | 3442       |
| <b>Equins</b>  | 07         |

(Source : DAB, 2022)



**Figure.04** : Production animale de la commune de Yabous (2021/2022)

### III. Géomorphologie de la zone d'étude

#### III.1. Le relief

Le relief est un facteur essentiel qui détermine en grande partie la capacité de ruissellement, d'infiltration et d'évaporation du sol. C'est un facteur majeur du comportement hydrologique d'un bassin versant. La plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont des fonctions de l'altitude car la hauteur du terrain dépend des précipitations et du gradient de température, et la vitesse d'écoulement est en principe plus élevée en montagne qu'en plaine.

Le plan physique, le territoire de la commune de Yabous est constitué :

- Par un relief montagneux au Sud totalisant une superficie 9677 ha soit 62,2% la superficie totale.
- Par des plaines au Nord avec 5025 ha, soit 32% de la superficie totale.
- Un réseau hydrographique constitué essentiellement par des Oueds au régime torrentiels dont le principal est l'Oued Talha (**Rouibi et Bouazizi, 2015**).

#### III.2. Les pentes

La forme en bas-relief de la commune de Yabous se caractérise par une pente dans une grande partie du Sud, il est généralement supérieur à 25 %. Alors que le nord présente un relief plat ou quasi plat (les pentes comprises entre 0 et 03% représentent des plaines), la zone de transition entre le sud vallonné et les parties plates du nord (partie centrale de la commune) correspond au caractère des contreforts (pente entre 03 et 25%) (**Badis, 2011**).



**Chapitre II**  
***Caractéristique***  
***hydroclimatique de la région***  
***de Yabous***



## Introduction

La recherche sur le climat est un élément important pour comprendre le comportement des rivières, l'évolution des stocks, les mécanismes naturels d'approvisionnement et de circulation de l'eau, afin d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique, avec des effets immédiats ou à long terme sur l'évolution de la nappe.

L'objectif principal de toute étude hydro climatique est d'établir un bilan hydrique sur une période donnée, et les principaux paramètres nécessaires à son établissement sont les précipitations et la température.

### I. Climatologie de la zone d'étude

Pour étudier le climat de la zone d'étude, nous avons exploité des données recueillies au niveau de la station météorologique d'El Hamma gérée par l'office national de la météorologie, et dont la période d'observation va de 1990 à 2020 pour la station d'El Hamma, a servi pour l'évaluation des facteurs du bilan. Cette station est située selon les coordonnées suivantes :

**Tableau.04** : Les coordonnées de la station météorologique d'El Hamma

| Station  | Longitude | latitude | altitude | Période d'observation |
|----------|-----------|----------|----------|-----------------------|
| El Hamma | 7°05'E    | 35°28'N  | 928.5 m  | 1990-2020             |

## II. Etude des variations des facteurs climatiques

### II.1. Variation des températures

La température est un facteur physique fondamental dans les milieux aquatiques superficiels et terrestres. Elle conditionne grandement la répartition des organismes végétaux et animaux et influence l'activité physique des êtres vivants. Elle contrôle aussi l'évolution et la transformation dans le milieu aquatique, de nombreux facteurs chimiques dont l'oxygène dissous, facteur indispensable aux organismes aquatiques. Les variations de température influent en particulier sur la dynamique des populations de crustacés (Ounissi,2022).

Tableau.05 : Températures moyennes mensuelles (1990-2020)

| Mois      | T (°C) Moy min | T (°C) Moy max | T (°C) Moy | Amplitude M-m |
|-----------|----------------|----------------|------------|---------------|
| Septembre | 18,69          | 23,78          | 21,22      | 5,09          |
| Octobre   | 14,19          | 19,89          | 16,48      | 5,7           |
| Novembre  | 8,28           | 12,24          | 10,31      | 3,96          |
| Décembre  | 4,60           | 8,37           | 6,49       | 3,77          |
| Janvier   | 3,14           | 7,85           | 5,57       | 4,71          |
| Février   | 2,5            | 10,30          | 6,39       | 7,8           |
| Mars      | 7,5            | 13,37          | 9,44       | 5,87          |
| Avril     | 9,8            | 15,11          | 12,70      | 5,31          |
| Mai       | 13,14          | 20,56          | 17,37      | 7,42          |
| Juin      | 18,78          | 24,96          | 22,32      | 6,18          |
| Juillet   | 22,43          | 28,36          | 26,08      | 5,93          |
| Aout      | 23,04          | 28,85          | 25,95      | 5,81          |

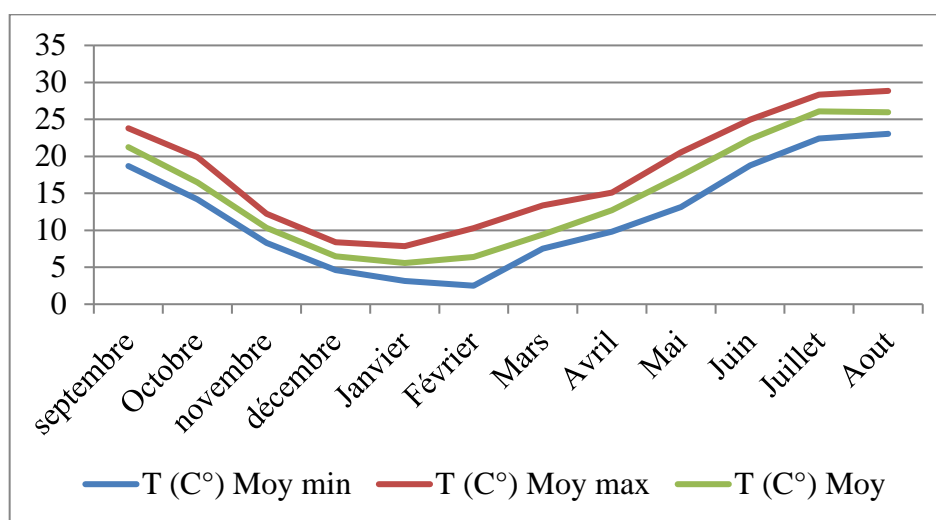


Figure.05 : Courbe de variation des températures moyennes

(El Hamma, 1990-2020)

La figure (05) représente les variations mensuelles des températures sur une période de 30 ans, à partir du graphique, on remarque que le mois le plus froid c'est le mois de Février avec une valeur de température basse de l'ordre de 2,5 °C, le mois le plus chaud dans la région d'étude est celui d'Aout avec une moyenne max de 28,85 °C.

## II.2. Variation des précipitations

Les précipitations constituant le facteur principal dans l'établissement du bilan hydrique. Quel que soit leur nature (pluie, grêle, neige ou autre forme de condensation), les précipitations jouent un rôle essentiel dans l'alimentation des nappes souterraines et aussi dans le comportement hydrologique des cours d'eau de la région que nous essayerons d'étudier à l'échelle du mois, de la saison et de l'année. L'altitude et l'éloignement de la mer des stations d'observation, sont les principaux facteurs qui constituent la répartition dans l'espace et le temps de pluie (Saoudi, 2017).

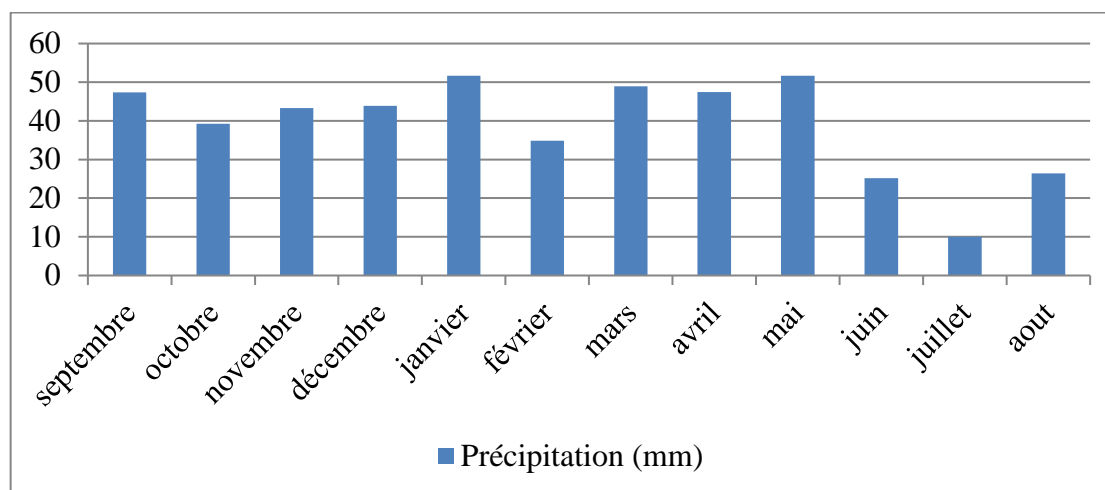
### II.2.1. Répartition mensuelle des précipitations

Pour mesurer la répartition mensuelle des précipitations, il est nécessaire de connaître la quantité de précipitations dans les années successives.

**Tableau.06** : Précipitation moyenne mensuelle (1990-2020)

| Mois      | Précipitations (mm) |
|-----------|---------------------|
| Septembre | 47,40               |
| Octobre   | 39,27               |
| Novembre  | 43,34               |
| Décembre  | 43,85               |
| Janvier   | 51,71               |
| Février   | 34,88               |
| Mars      | 48,95               |
| Avril     | 47,47               |
| Mai       | 51,70               |
| Juin      | 25,16               |
| Juillet   | 10,05               |
| Aout      | 26,43               |

Les données pluviométriques (Figure.06) montrent une moyenne mensuelle des précipitations d'environ 40 mm. Le mois le moins pluvieux est Juillet avec 10,05 mm d'eau, cependant, les quantités les plus élevées sont observées au mois de Janvier avec 51,71 mm.



**Figure.06:** Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelles (1990-2020)

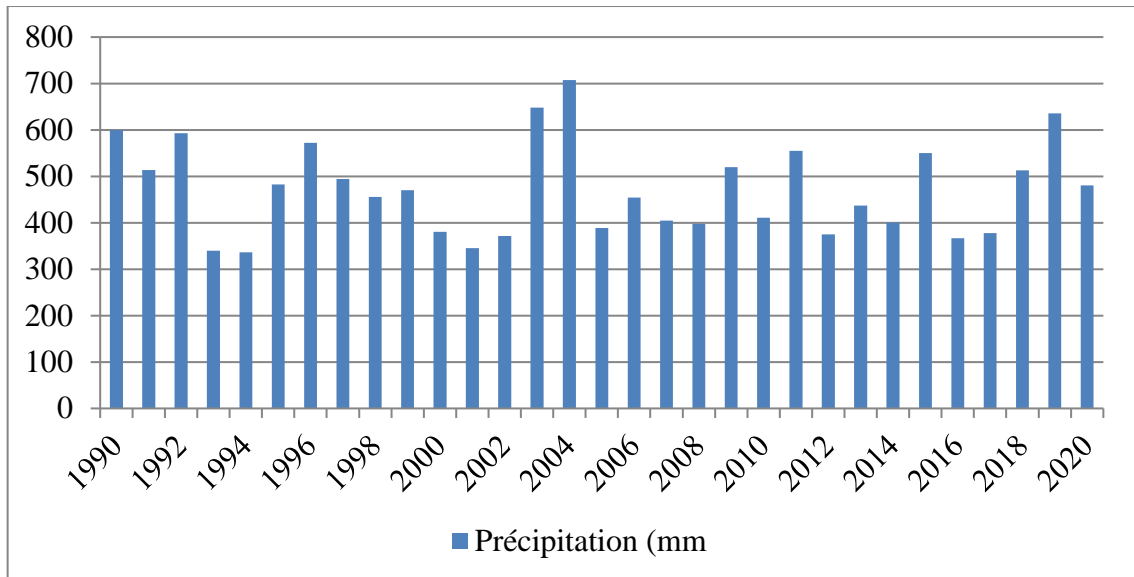
### II.2.2. Répartition annuelle des précipitations

Pour la répartition des précipitations annuelles de la station pluviométrique d'El Hamma durant la période d'observation de 30 ans qui s'étale du 1990 au 2020.

**Tableau.07 :** Précipitation moyenne annuelle (1990-2020)

| Années | Précipitation (mm) | Années | Précipitation (mm) |
|--------|--------------------|--------|--------------------|
| 1990   | 599,66             | 2006   | 454,6              |
| 1991   | 513,78             | 2007   | 404,96             |
| 1992   | 592,81             | 2008   | 398,05             |
| 1993   | 339,8              | 2009   | 519,5              |
| 1994   | 336,28             | 2010   | 410,99             |
| 1995   | 482,74             | 2011   | 554,73             |
| 1996   | 571,92             | 2012   | 374,89             |
| 1997   | 494,59             | 2013   | 436,84             |
| 1998   | 455,93             | 2014   | 400,63             |
| 1999   | 470,4              | 2015   | 550,46             |
| 2000   | 380,18             | 2016   | 366,86             |
| 2001   | 345,45             | 2017   | 377,41             |
| 2002   | 371,45             | 2018   | 512,94             |
| 2003   | 648,38             | 2019   | 635,88             |
| 2004   | 707,18             | 2020   | 480,66             |
| 2005   | 388,51             |        |                    |

On remarque qu'il y'a une irrégularité de la répartition annuelle des précipitations, l'année la plus pluvieuse est celle de 2004 avec une quantité de 707,18 mm d'eau ; alors, que le minimum est enregistré en 1994, avec une valeur de précipitation de 336,28mm.



**Figure.07:** Histogramme de variation des précipitations moyennes annuelles (1990-2020)

### III. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen est un mode de représentation classique du climat d'une région nous permet de connaître les caractères des saisons dans une région donnée et d'évaluer l'intensité et la durée de la période de sécheresse.

Pour ce diagramme, les mois de l'année sont représentés sur l'axe des abscisses, il regroupe en même temps la courbe des précipitations (P) représentés en ordonnée à droite en (mm) selon une échelle double de celle des températures (T) représentées à gauche en (°C) (Kerdoud, 2017).

Selon Gaussen une période sèche est une période pendant laquelle les précipitations totales inférieures ou égales au double de la température :  $P \leq 2T \Rightarrow$  période sèche.

Une période humide est une période pendant laquelle les précipitations totales égales au double de la température :  $P = 2T \Rightarrow$  période humide.

**Avec :**

P : précipitations moyenne mensuelle en (mm).

T : température moyenne mensuelle en (°C).

Tableau.08 : Précipitation et la température moyenne mensuelle (1990-2020)

| Mois      | P (mm) | T (°C) |
|-----------|--------|--------|
| Septembre | 47,40  | 21,93  |
| Octobre   | 39,27  | 17,03  |
| Novembre  | 43,34  | 10,65  |
| Décembre  | 43,85  | 6,74   |
| Janvier   | 51,71  | 5,75   |
| Février   | 34,88  | 6,61   |
| Mars      | 48,95  | 9,76   |
| Avril     | 47,47  | 13,12  |
| Mai       | 51,70  | 17,95  |
| Juin      | 25,16  | 23,06  |
| Juillet   | 10,05  | 26,95  |
| Aout      | 26,43  | 26,82  |

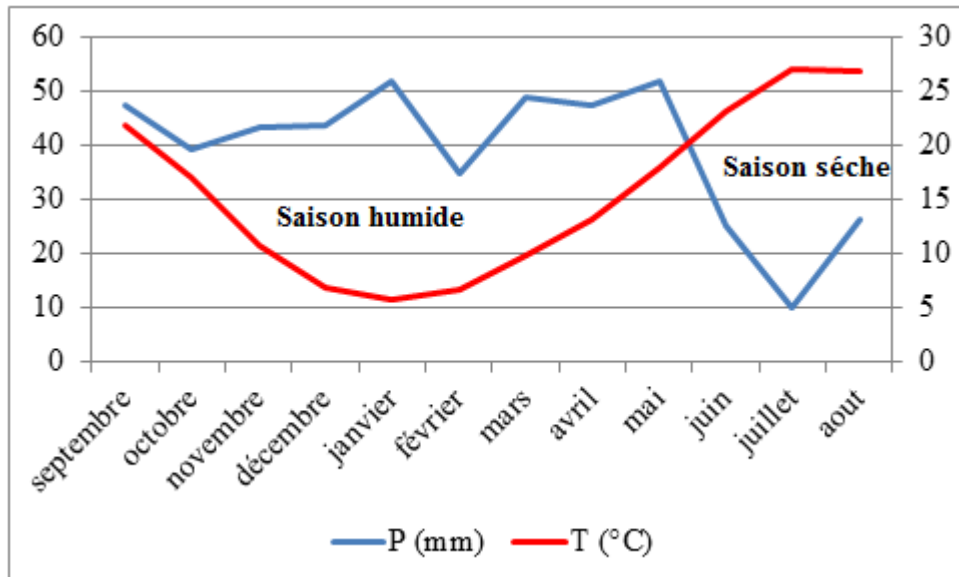


Figure.08: Diagramme Ombrothermique de Gaussen

L'analyse de la courbe gaussienne donne le commentaire suivant :

- Une période de sécheresse de trois mois, allant du début Juin jusqu'à la fin d'Aout, elle coïncide avec la période la plus chaude (été).

- Une période humide plus longue, de neuf mois commence du mois de Septembre et se prolonge jusqu'à la fin du mois de Mai, alors que cette période correspond essentiellement l'hiver et le printemps.

#### IV. Classification du climat

Le coefficient d'aridité est déterminé à partir de la formule de De Martonne en 1950, par la formule suivante :

$$I = P/(T+10)$$

Avec :

**I** : Indice d'aridité ;

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

**T** : Température moyenne annuelle en °C.

Pour la région de Yabous : P = 470.21mm, T = 15,53 °C, donc :

$$I = P/(T+10) = 18,42$$

**Tableau.09** : Classification des climats selon l'indice de De Martonne

| INDICE D'ARIDITE                      | TYPE DE CLIMAT    |
|---------------------------------------|-------------------|
| $0 < I < 5$                           | Hyper aride       |
| $5 < I < 10$                          | Aride             |
| <b><math>10 &lt; I &lt; 20</math></b> | <b>Semi-aride</b> |
| $20 < I < 30$                         | Semi-humide       |
| $30 < I < 55$                         | Humide            |

On peut aussi connaître le type de climat en fonction du climagramme de Sauvage L'indice pluviométrique (Q2) d'Emberger, qui fait intervenir la moyenne des maxima du mois le plus chaud (M), la moyenne des minima du mois le plus froid (m) et la moyenne des précipitations annuelles (P), permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une région donnée et de la situer dans le climagramme d'Emberger.

Cet indice pluviométrique est une synthèse des précipitations et des températures. Plus le climat est sec, plus le Q2 est faible, ainsi à chaque station, on peut associer deux grandeurs Q2 et m, et les représenter par un point sur un plan à deux axes, à la répartition

géographique des stations, on lui substitue une répartition climatique (Aribi et Lahmar, 2019).

Cette formule s'écrit:

$$Q2 = 2000 P / (M^2 - m^2)$$

Avec :

**Q2**: coefficient pluviothermique d'EMBERGER ;

**P** : désigne la précipitation moyenne annuelle, exprimée en mm ;

**M** : désigne le maximum du mois le plus chaud en Kelvin (K) ;

**m** : désigne le minimum du mois le plus froid en Kelvin (K).

$$T (K) = T (C^{\circ}) + 273.15$$

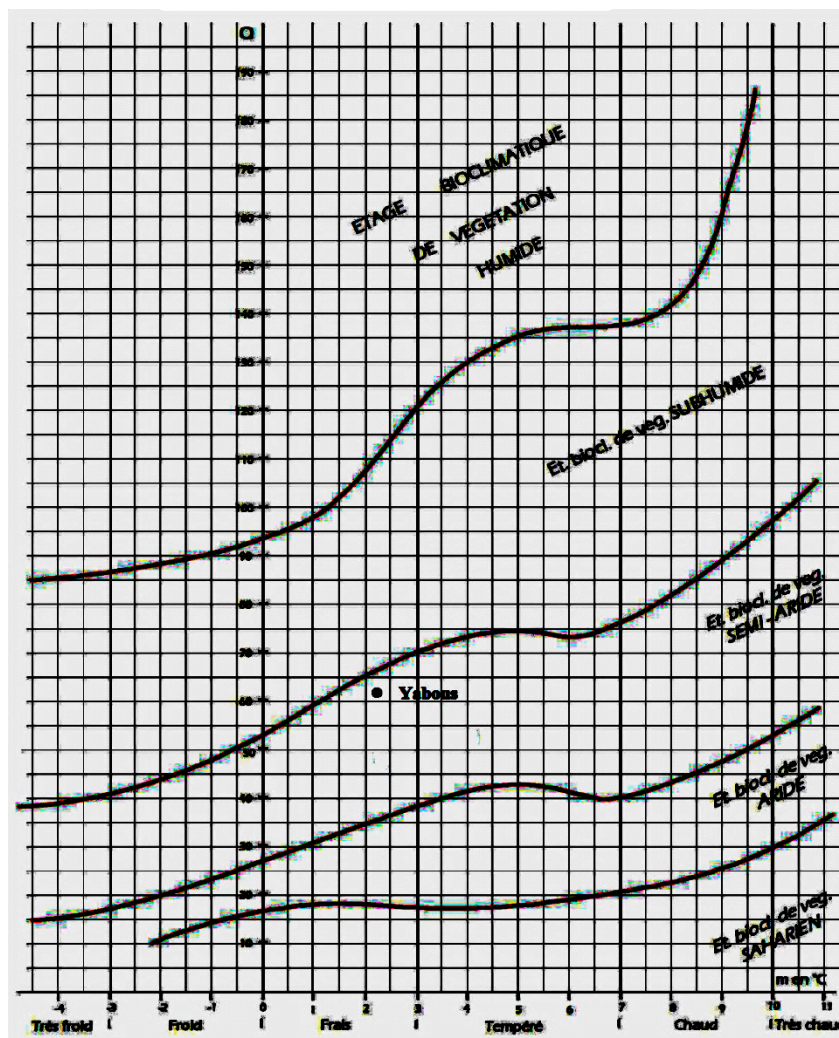


Figure.09:Climagramme d'Emberger

En Algérie, Stewart (1969-1975) a proposé le quotient pluviothermique Q3 après simplification du Q2 d'Emberger,

Il s'écrit :

$$Q3 = 3.43 P / (M-m)$$

Avec: M et m en °C.

Pour notre cas :

$$P = 470,21 \text{ mm}$$

$$M = 28,85 \text{ °C} + 273.15 = 302 \text{ K}$$

$$m = 2,5 \text{ °C} + 273.15 = 275,65 \text{ K}$$

$$Q2 = 2000 P / (M^2 - m^2) = 61,78$$

$$Q3 = 3.43 P / (M-m) = 62,20$$

**Tableau.10** : Correspondances entre les étages bioclimatiques et les précipitations d'après Le Houerou et *al* (1975)

| Etages bioclimatiques | Quotients pluviométriques | Précipitation    |
|-----------------------|---------------------------|------------------|
| Saharien              | $Q2 < 10$                 | $P < 100$        |
| Aride                 | $10 < Q2 < 45$            | $100 < P < 400$  |
| Semi-aride            | $45 < Q2 < 70$            | $400 < P < 600$  |
| Subhumide             | $70 < Q2 < 110$           | $600 < P < 800$  |
| Humide                | $110 < Q2 < 150$          | $800 < P < 1200$ |

**Source** : Lemouchi et Kolli (2020).

## V. Le bilan hydrique

Le bilan hydrologique a pour but principal d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la région d'étude, il est indispensable d'évaluer ses composantes : infiltration, ruissellement et évapotranspiration (**Bounab, 2017**).

L'équation du bilan hydrologique peut s'écrire pour une période donnée :

$$P = ETR + I + R$$

Avec :

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

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

**I** : infiltration moyenne annuelle (mm) ;

**R** : Ruissellement moyen annuel (mm).

### V.1. L'évapotranspiration

Le terme d'évapotranspiration désigne la quantité de vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol lui-même que par transpiration des organes aériens des plantes. L'étude de l'évapotranspiration exige que soient définis deux concepts essentiels : l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) (Bourbia, 2018).

#### V.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales. Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, nous avons appliqué la formule de Thornthwaite (Staifi, 2017).

$$ETP = 16 (10t / I)^a \cdot K$$

**Avec :**

**t** : température moyenne mensuelle du mois considéré,

**I** : indice thermique annuel, somme de douze indices thermiques mensuels  $i$ ,

$$i = (T / 5)^{1.514}$$

**a**: fonction complexe de l'indice I,

$$a = 0.016I + 0,5$$

**K**: coefficient d'ajustement mensuel en fonction de la latitude.

#### V.1.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

C'est la quantité d'eau généralement exprimée en mm évaporée ou transpirée par : le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant (mer, lac, cours d'eau...) et se manifeste de fait en conditions naturelles dans un site donné, compte tenu de la demande climatique de l'air et de la disponibilité en eau du sol (Khelifa, 2021).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$\text{Où } L = 300 + 25T + 0.5 T^2$$

**Avec :**

**ETR** : évapotranspiration réelle (en mm/an) ;

**P**: la hauteur annuelle de pluie (en mm) ;

$t$  : la température annuelle (en °C).

### V.2. Le ruissellement

Le ruissellement de surface représente la quantité d'eau des pluies qui coule à la surface du sol et rejoint les cours d'eau (Latifi, 2018). Le ruissellement est estimé par :

➤ **Méthode de Tixeront-Berkaloff**

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

### V.3. L'infiltration

L'infiltration est la quantité d'eau qui parvient à la nappe. En effet au cours de son trajet, entre la surface du sol et la surface de la nappe. L'eau d'infiltration subit des pertes par l'évapotranspiration (Sedrati, 2011).

$$P = ETR + R + I \text{ donc } I = P - ETR - R$$

Avec :

$I$  : L'infiltration en (mm) ;

$P$  : Précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

$ETR$  : Evapotranspiration réelle annuelle en (mm) ;

$R$  : Ruissellement en (mm).

**Tableau.11:** Tableau récapitulatif des paramètres climatiques : P, I, R, ETP et ETR.

| P(mm)  | I (mm) | R (mm) | ETP(mm) | ETR(mm) |
|--------|--------|--------|---------|---------|
| 470,21 | 110,41 | 43,94  | 888,1   | 324,86  |

## VI. Calcul du bilan hydrique

Les tableaux ci-dessous résument le bilan hydrique, établies selon la méthode de Thornthwaite.

**Tableau.12:** Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite

| Mois | P<br>(mm) | T<br>(°C) | i    | K    | ETP<br>(mm) | BH<br>(mm) | RFU<br>(mm) | ETR<br>(mm) | DA<br>(mm) | EXC<br>(mm) |
|------|-----------|-----------|------|------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Sep  | 47,40     | 21,93     | 9,38 | 1,05 | 104,64      | -57,24     | 00          | 47,40       | 57,24      | 00          |
| Oct  | 39,27     | 17,03     | 6,39 | 0,91 | 59,6        | -20,33     | 00          | 39,27       | 20,33      | 00          |
| Nov  | 43,34     | 10,65     | 3,14 | 0,75 | 22,53       | 20,81      | 20,81       | 22,53       | 00         | 20,81       |

|             |        |       |       |      |        |         |       |        |        |       |
|-------------|--------|-------|-------|------|--------|---------|-------|--------|--------|-------|
| <b>Déc</b>  | 43,85  | 6,74  | 1,57  | 0,70 | 9,84   | 34,01   | 34,01 | 9,84   | 00     | 34,01 |
| <b>Jan</b>  | 51,71  | 5,75  | 1,23  | 0,73 | 7,88   | 43,83   | 43,83 | 7,88   | 00     | 43,83 |
| <b>Fév</b>  | 34,88  | 6,61  | 1,52  | 0,78 | 10,62  | 24,26   | 24,26 | 10,62  | 00     | 24,26 |
| <b>Mar</b>  | 48,95  | 9,76  | 2,75  | 1,02 | 26,51  | 22,44   | 22,44 | 26,51  | 00     | 22,39 |
| <b>Avr</b>  | 47,47  | 13,12 | 4,31  | 1,15 | 48,85  | -1,38   | 00    | 47,47  | 1,38   | 00    |
| <b>Mai</b>  | 51,70  | 17,95 | 6,92  | 1,32 | 94,34  | -42,64  | 00    | 51,70  | 42,64  | 00    |
| <b>Juin</b> | 25,16  | 23,06 | 10,12 | 1,33 | 144,07 | -118,91 | 00    | 25,16  | 118,91 | 00    |
| <b>Juil</b> | 10,05  | 26,95 | 12,81 | 1,33 | 186,62 | -176,57 | 00    | 10,05  | 176,57 | 00    |
| <b>Aout</b> | 26,43  | 26,82 | 12,72 | 1,24 | 172,6  | -146,17 | 00    | 26,43  | 146,17 | 00    |
| <b>Tot</b>  | 470,21 | 15,53 | 72,86 |      | 888,1  | -417,89 |       | 324,86 | 563,24 | 145,3 |

Avec :

- $P < ETP$  :  $ETR = P$  et  $RFU = 0$
- $P > ETP$  :  $ETR = ETP$  et  $RFU = P - ETP$
- $DA = ETP - ETR$
- $BH = P - ETP$
- $EXC = P - ETR$

Notre bilan est vérifié ( $P = EX + ETR = 145,3 + 324,86 = 470,16$  mm)

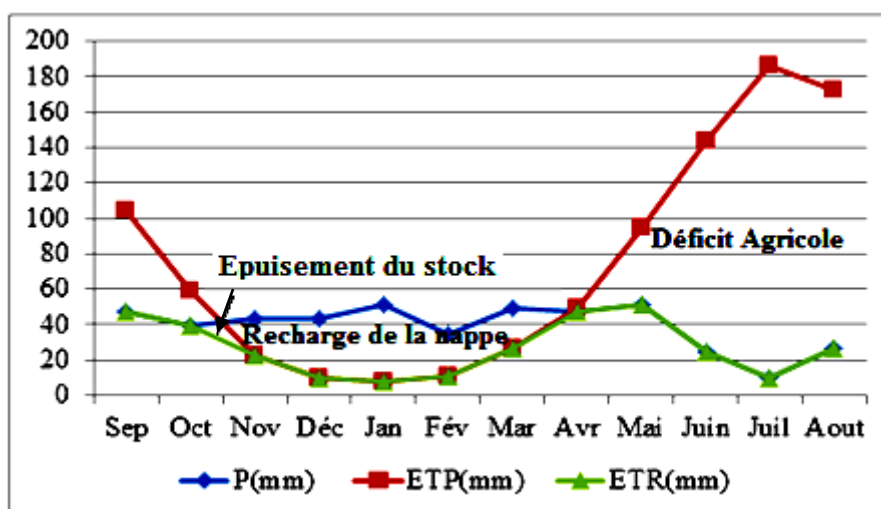


Figure.10: Représentation graphique du bilan hydrique de Thornthwaite (1990-2020)

### VI.1. Interprétation du bilan hydrologique

L'ETP atteint son maximum au mois de Juillet et Août ce qui produit un déficit agricole et nécessite une irrigation des terres agricoles. Du mois de Novembre à Avril la nappe se recharge pour l'ETR, il atteint son maximum au mois de Mai.

### VII. Le vent

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques du climat car la sensation de chaleur ou le transfert d'énergie dépend principalement dans une large mesure de sa force, lui confère un intérêt important en matière de connaissance des vitesses maximal dont la région est soumise.

Les potentialités d'évapotranspiration sont également liées aux mouvements de l'air qui conditionnent les variations du bilan hydrique à l'échelle des valeurs moyennes mensuelles et annuelles (**Babana et Sebaa, 2018**).

**Tableau.13** : Vitesse du vent (m/s) enregistrée à la station d'El Hamma (2004-2018)

| Mois                  | Jan   | Fév   | Mar   | Avr   | Mai   | Jui   | Juil  | Août  | Sép   | Oct   | Nov   | Déc   | Tot   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vitesse du vent (m/s) | 51,89 | 60,07 | 63,13 | 55,15 | 50,06 | 49,32 | 44,88 | 43,36 | 41,92 | 41,36 | 48,04 | 43,43 | 49,38 |

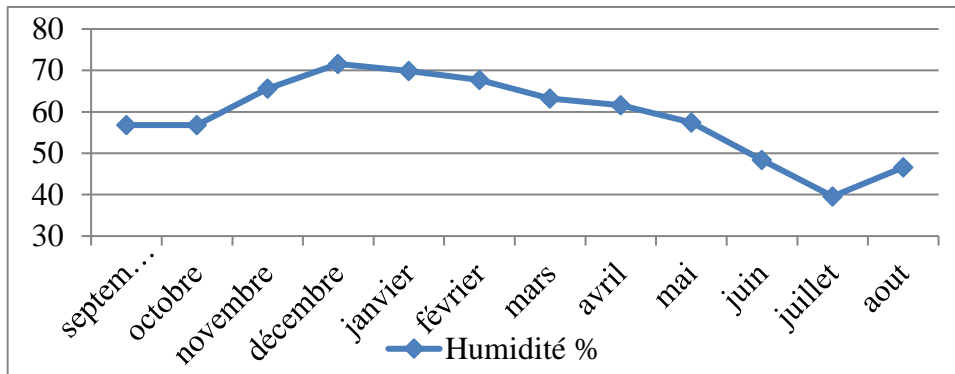
### VIII. L'Humidité

L'humidité représente la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, sans compter l'eau liquide et la glace. On doit distinguer l'humidité relative et l'humidité absolue. L'humidité relative joue un rôle sur la formation du brouillard, de la rosée et des nuages (**Hasnaoui et Ben Amara, 2019**).

**Tableau.14** : Variation de l'humidité relative à la station d'El Hamma (2004-2018)

| Mois      | Humidité % |
|-----------|------------|
| Septembre | 56,83      |
| Octobre   | 56,80      |
| Novembre  | 65,59      |
| Décembre  | 71,57      |
| Janvier   | 69,89      |
| Février   | 67,71      |
| Mars      | 63,18      |
| Avril     | 61,61      |

|                |       |
|----------------|-------|
| <b>Mai</b>     | 57,41 |
| <b>Juin</b>    | 48,37 |
| <b>Juillet</b> | 39,58 |
| <b>Aout</b>    | 46,62 |



**Figure.11:** Courbe de variation de L'humidité enregistrée à la station la période (2004-2018)

Les valeurs d'humidité relative sont relativement homogènes, variant entre 39,58% et 71,57%. L'humidité de l'air de Yabous est caractéristique, lors d'une journée d'été (Juin, Juillet et Aout) où la température est plus élevée, nous avons une humidité moyenne quotidienne plus faible à moyenne 39,58 à 48,37 % et inversement la nuit car la température ambiante se dissipe et l'humidité a tendance à augmenter. Par contre, en hiver (Décembre, Janvier et Février) les températures sont plus basses et l'humidité est plus élevée à moyenne 67,71 à 71,57 %.



## **Chapitre III**

# ***Etude géologique et hydrogéologie de Yabous***



**Introduction**

La géologie est une partie essentielle de toute étude de l'hydrologie et de la chimie de l'eau. La lithologie et la structure géologique jouent donc un rôle crucial dans la qualité de l'eau après la dissolution des minéraux dans les roches et la quantité d'eau qui s'écoule ou s'infiltre selon le type de sol (perméabilité ou imperméable).

**I. La géologie générale de la Wilaya de Khenchela**

Le comportement géologique de la région d'étude a été inspiré des travaux et études Antérieurs réalisés sur le massif des Aurès, sur les hautes plaines steppiques et sur les zones Humides.

La plupart de ces études ont été axées sur les caractères stratigraphiques, géomorphologiques, sédiment logiques et structurales. D'après l'inventaire stratigraphique dressé par plusieurs Géologues et en particulier par les terrains les plus anciens sont attribués au Trias et les plus récents au Quaternaire.

Selon depuis le Trias, la région est le Siège de dépôts épicontinentaux à faciès divers et d'épaisseur variable. Dans cette période, la Région présaharienne représentait une plate-forme qui se caractérisait par l'accumulation de Différents sédiments.

Du point de vue tectonique, la région présaharienne se rapporte à l'Atlas Tunisien séparé de l'Atlas saharien par le massif des Aurès avec un point culminant à 2328 m. La région de Khenchela se caractérise par la présence de trois (03) zones différentes qui Peuvent être distinguées comme suit :

- Au Nord: on a le bassin miocène de Timgad et de Douffana. C'est une zone plate, steppique qui correspond à la bordure méridionale de la grande dépression de Garat El Taref ;
- Les parties occidentales et centrales constituent la terminaison périclinale Nord-Est de la chaîne des Aurès, région caractérisée par les Diapirs triasiques ;
- La zone méridionale au Sud constitue les monts des Nememcha; et plus au Sud, c'est la zone plate qui correspond à la bordure septentrionale du pays des chotts.

Du point de vue tectonique, le territoire de la Wilaya de Khenchela est situé au Nord de la Flexure Sud atlasique. Les reliefs montagneux sont très accidentés caractérisée par la présence De plusieurs failles. On rencontre deux principales familles: la première correspond aux plus Grandes failles de direction Est-Ouest à Nord-Est / Sud-Ouest.

La seconde celle des plus Petites failles de direction Nord-Ouest / Sud-Est. Ces deux types de failles sont verticaux. Il est à noter que les Diapirs ou dômes triasiques se trouvant dans la Partie orientale, empruntent Généralement les zones de failles et de faible

résistance pour remonter à la surface du sol et Affleurer. Du point de vue lithologie, on rencontre des calcaires, des marnes, des argiles, du Gypse, des sables, des grès et des conglomérats La géologie de la région d'étude (**Salhi et Ounassi, 2022**).

## **II. La géologie locale**

Les formations représentées dans la zone d'étude sont :

### **II.1. Trias**

Cet étage est caractérisé par la présence de marne accompagnée de gypse et de sel gemme, et se situe sur les flancs des anticlinaux.

Le Trias affleure en masse chaotique, sans aucune stratification. Dans ces masses, divers éléments sont reconnaissables (dolomies noires, grès, gypses marneux et gypses fibreux) et emballés dans des argilites vertes. Les pointements Triasiques sont en contact anormal à Khenchela avec l'Aptien, le Cénomaniens et le Coniacien.

### **II.2. Le Crétacé**

Le Crétacé a été subdivisé par Laffite (1939). En Crétacé inférieur ou série gréseuse (Berriasien à l'Albien) et en Crétacé supérieur ou série marnocalcaires (Cénomaniens à Maestrichtien). Les formations crétacées présentent une masse énorme de calcaire marneux, de marno-calcaire et de marne qui s'allonge depuis les plis de Khenchela, les monts de Delaa et ceux de F'kirina jusqu'aux montagnes bordant Garaet Tarf suivant des directions NE-SW (**Aouidane, 2017**).

#### **II.2.1. Le Crétacé supérieur**

Il occupe une grande superficie à l'affleurement dans les Aurès et forme l'essentiel des affleurements Mésozoïques des confins des Aurès. Dans la région, il affleure au Djebel Aurès, Djebel Djahfa, Khenchela, Djebel Chettaia.

Le Maestrichtien supérieur est une assise constante et homogène de calcaires massifs blanchâtres grumeleux, en bancs décimétriques ou métriques, à large stratification oblique avec les empreintes d'inocérames. Cette formation contient des modules de silex et des tests de lamellibranches.

Les principaux affleurements constituent le Djebel Tadleste et Djebel Bouzendag et le sommet de Djebel Djahfa. L'épaisseur de ces formations ne dépasse pas les 95 m. Cependant, le Maestrichtien inférieur est constitué par une alternance de marnes beiges et de calcaires ocre ou beiges avec une épaisseur de 40 m.

Tandis que le Campanien comporte à sa base une barre de marnes crayeuses, en bancs décimétriques ou métriques. A la fin on a un passage de marne avec une épaisseur de 65 m.

Au-dessus se développe 150 m de marne noire à microfaune comparable qui est bien visible dans les différentes parties du bassin versant surtout sur les limites Sud.

Le Santonien et le Coniacien comportent de la marne avec à la base et au sommet quelques barres de marno-calcaires. Cette formation se trouve essentiellement sur le flanc Sud du Djebel Djehfa et ne dépasse pas les 100 m.

### **II.2.2. Le Crétacé moyen**

Le Turonien occupe des intercalations calcaires et crée une barre bien visible dans la morphologie au Nord-Ouest du bassin. Le Turonien comporte, en effet, au-dessus des marno-calcaires de base, un ensemble de marnes beiges et des calcaires. Le Turonien est schisteux à la base, calcaire dans la partie moyenne et marno-calcaire au sommet.

L'épaisseur du Turonien peut atteindre 800 m dans les faciès marno-calcaires se trouvant du cœur des Aurès. Tandis que, le Cénomaniens, il est présent dans tous les grands anticlinaux des Aurès. Il est essentiellement calcaire-marneux.

La partie inférieure est surtout marneuse. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massifs mais peu épais. L'épaisseur de cette formation est très variable, elle peut atteindre 500 à 600 m au cœur des Aurès.

Le Cénomaniens comporte une série de marnes grises dans lesquelles s'intercalent des calcaires fins argileux, une partie médiane formée de marnes grises, verts ou ocres, contenant parfois du gypse diffus ainsi que des passées argileuses. Une série terminale constituée de marne et de calcaires formant une corniche.

### **II.2.3. Le Crétacé inférieur**

Il couvre une grande partie des anticlinaux du Djebel Chelia, il affleure aussi au Kef Tifekressa, Ras Serdoun, Djebel Chenntgouma, Djebel Faraoun et Djebel Aidel. Laffitte (1939) a soigneusement décrit la plupart des faciès et c'est à partir de ses descriptions, modifiées ou complétées en quelques points, par Guiraud (1973) qui résume de façon schématique les principales variations observables.

Le Barrémien affleure au Nord-Ouest du bassin versant à (Dj. Aidel) sous forme d'une petite bande locale. Sa lithologie est constituée essentiellement de matériaux détritiques (grés, calcaires, gréseux, grés quartzeux, conglomérat et marnes vertes ou rouges).

Cependant, l'Albien entoure régulièrement l'anticlinal de Khenchela en formant une ceinture plus au moins continue au-dessus de l'Aptien. Il s'agit d'une alternance de grés et de marne grise, des dolomies et des argiles grises. La limite inférieure correspond à une surface minéralisée dans les limites Nord-Ouest du bassin à Djebel El Aidel et Tadlist avec une épaisseur totale de 160 m.

Alors que, l’Aptien est formé essentiellement à la partie basse par une alternance d’omicrite, d’oosparite et de calcaire marneux. Cet étage est caractérisé par des calcaires dolomitiques fortement minéralisées (fer, azurite, malachite, barytine) largement développés au sommet des montagnes au N-W avec une épaisseur totale est de 330 m (Gaagai, 2017)

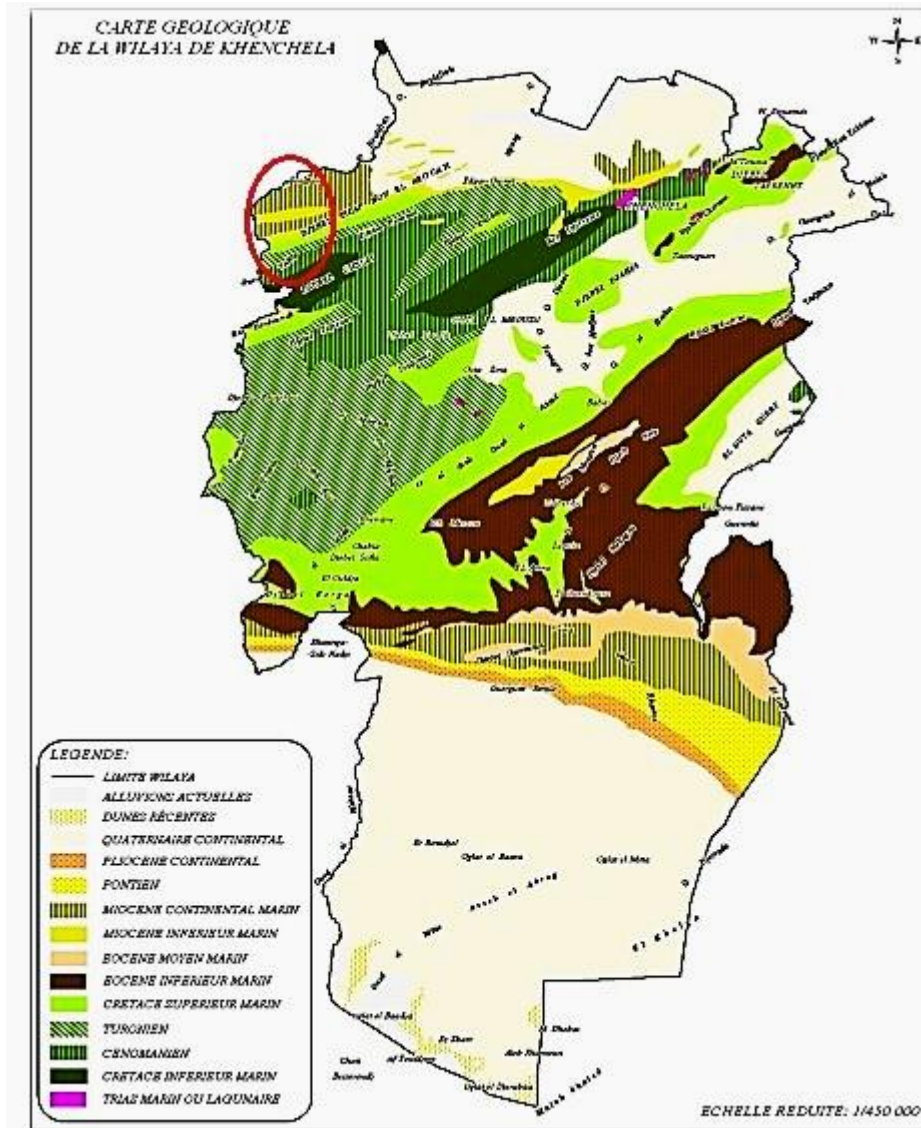


Figure.12 : La carte géologique de la région de Khenchela (Source : DEW, 1992)

### II.3. Le Quaternaire

Les formations récentes sont aussi largement répandues à la périphérie de l'Aurès qu'ils sont rares dans le centre du massif : ils sont représentés uniquement par des éboulis et des terrasses, tandis qu'ils forment en périphérie, de larges et d'épaisses nappes alluviales.

Les dépôts quaternaires recouvrent le majeur parti des plaines, ce sont des éboulis à bloc, alluvions récentes ou actuelles, terres arables, alluvions anciennes, glacis polygénique nappant les reliefs et des croutes calcaires.

Les dépôts de quaternaires sont tout d'origine continentale et occupent d'importantes surfaces dans notre région, principalement dans les plaines d'étude, il s'agit du (Vila, 1977).

### III. La tectonique de la région de Yabous

La région présaharienne se rapporte à l'Atlas Tunisien séparé de l'Atlas saharien par le massif des Aurès avec le plus haut sommet à 2328 m où la direction des plis change de Nord-Est au Nord-Nord-Est. À partir de la carte géologique de Khenchela, on peut remarquer une opposition entre deux secteurs: à l'Ouest, le style tectonique ressemble à celui des Aurès. À l'Est, l'organisation plissée perd sa prédominance et les structures sont compliquées par la présence de diapirs triasiques.

À la lumière des résultats acquis dans les domaines de la chaîne Atlasiques, principalement par (Guiraud, 1973 et Vila, 1977) et en particulier, les divers documentations publiés par Laffitte (1939) font état d'un très petit nombre de failles affectant les anticlinaux de Khenchela, Djebel Aidel et Chelia), orientées presque exclusivement NWSE (Bouafia, 2015). En fait les structures sont nombreuses dans cette zone et elles se répartissent très généralement suivant des directions voisines de NW-SE (les plus fréquents), E-W. Du Nord vers le Sud on a :

- **Les grands plis de l'Ouest :** On a l'anticlinal de Djebel Chelia dont la voûte est visible à l'Est, et au Sud-Est du Djebel Tirkabine. Cet anticlinal paraît effondré et son extrémité Sud-Est est affectée par des accidents cassants orientés selon une direction NW-SE qui peuvent être d'anciens coulissements alpins. Le synclinal des Aurès s'enfonce sous le Miocène gréseux sans terminaison périclinale visible. On signale également l'anticlinal de Khenchela, puissamment fracturé par des failles directionnelles ou sensiblement E-W.
- **Les diapirs de l'Est et du Nord-Est :** Ce sont des zones en forme d'anticlinale. Il s'agit: du diapir de Khenchela qui a une forme très allongée. Le Trias recoupe des terrains allant du Cénomaniens inférieur au Coniacien; du diapir de Djebel El-Kroume et Knif qui possèdent une forme plus complexe qui peut être induite par la présence des corps récifaux et des compartiments bousculés par la phase Alpine. Le Trias découpe des terrains allant de l'Albien au Maestrichtien supérieur; du diapir d'ElMahmal qui est le plus développé malgré le recouvrement Quaternaire qui empêche d'évaluer son tracé et ses dimensions. Le Trias n'est en contact qu'avec le Crétacé supérieur. Entre ces diapirs, les terrains ont gardé une disposition subtabulaire ou faiblement synclinale comme Djebel Djehfa.

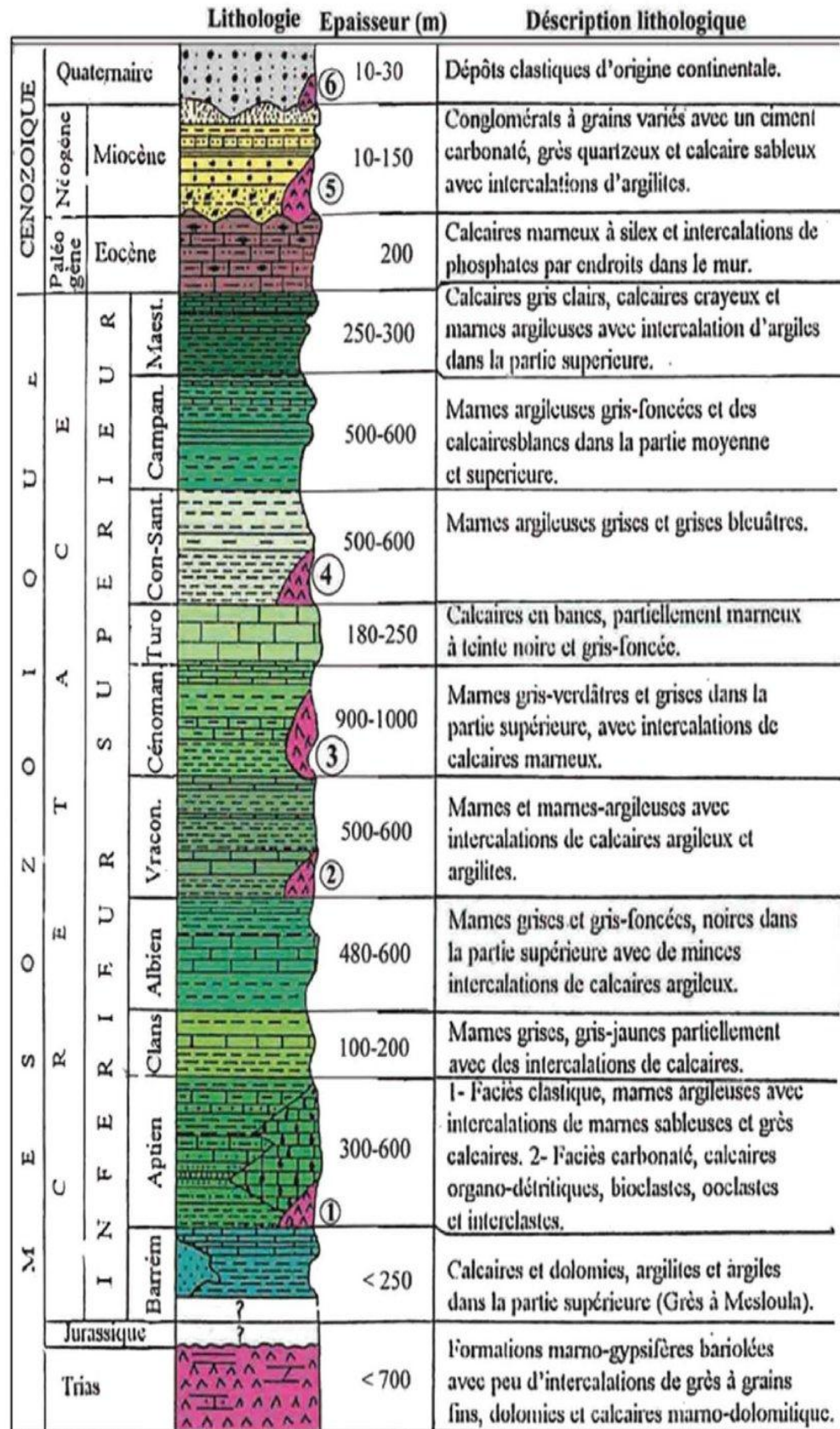


Figure.13 : Colonne stratigraphique synthétique de l'Atlas saharien orientale (Achi, 2021)

- **Synclinal de TihézaFerradj /Djehfa** : Il se trouve au centre du bassin et parallèle à l’anticlinal de Khenchela. Il prolonge la partie Sud du synclinal de Rhassira. Il est formé par le Turonien supérieur (calcaires à rudistes). Plus au Nord, c’est le Sénonien avec des marnes noires et des marnes crayeuses (**Gaagai, 2017**).

**IV. La perméabilité**

D’après la carte litho géologique de bassin versant de Taghrist, le sous bassin est formés essentiellement par des formations perméable à semi perméable qui occupent presque la totalité de a superficie du bassin, ce qui favorise l’infiltration des eaux de surface. Toutefois, les formations perméables sont des alluvions quaternaires surtout les marnes et grés miocènes qui affleurent au niveau de la plaine de Yabous (**DHW. Khenchela, 2016**).

**Tableau.15** : Caractéristiques de matériaux de bassin versant de point de vue perméabilité et résistance

| Formation géologique | Formation lithologique       | La résistance à l'érosion | La perméabilité     |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|
| <b>Campanien</b>     | Marnes noires                | Non résistant             | Perméabilité faible |
| <b>Maestrichtien</b> | Marnes crayeuses             |                           |                     |
| <b>Oligocène</b>     | Marne rouge a gypse          |                           |                     |
| <b>Coniacien</b>     | Marne et calcaire            | Moyennement résistante    | Semi-perméable      |
| <b>Quaternaire</b>   | Alluvion ancienne et récente |                           | Perméable           |
| <b>Cénomaniien</b>   | Marno-calcaire               |                           | Semi-perméable      |
| <b>Turonien</b>      | Calcaires et marnes          | Résistent                 | Imperméable         |
| <b>Miocène</b>       | Calcaire, grés               | Très résistant            |                     |
| <b>Albien</b>        | Calcaire massif              |                           |                     |
| <b>Aptien</b>        | Dolomie                      |                           |                     |
| <b>Barrémien</b>     | Grés                         |                           |                     |

Source : DHW. Khenchela, 2016

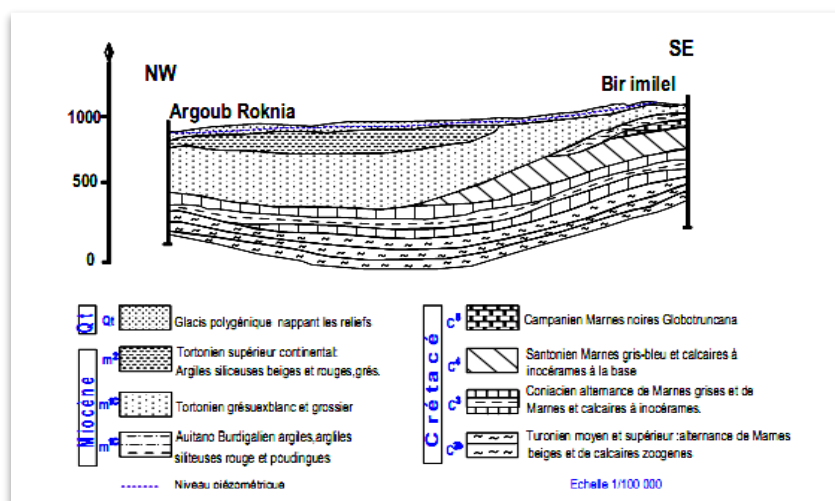
**V. Hydrogéologie**

L'hydrogéologie des zones arides et semi-aride de l'Algérie, est un thème complexe. La région de Khenchela, qui se trouve touchée par une sècheresse chronique et un bilan climatique toujours négatif ne permet pas de justifier ou de préciser l'existence d'une recharge des nappes aquifères. Or cette recharge, même si elle est limitée, existe souvent dans ces

régions arides où l'irrégularité du climat peut provoquer certaines années quelques événements pluvieux exceptionnels (Castany, 1982).

L'étude hydrogéologique repose sur l'identification du système aquifère, sa géométrie, ses limites et son alimentation. L'ensemble du système d'écoulement souterrain est défini par la piézométrie des différentes structures et unités géologiques représentées par quatre (04) types de nappes qui constituent le système aquifère de Khenchela :

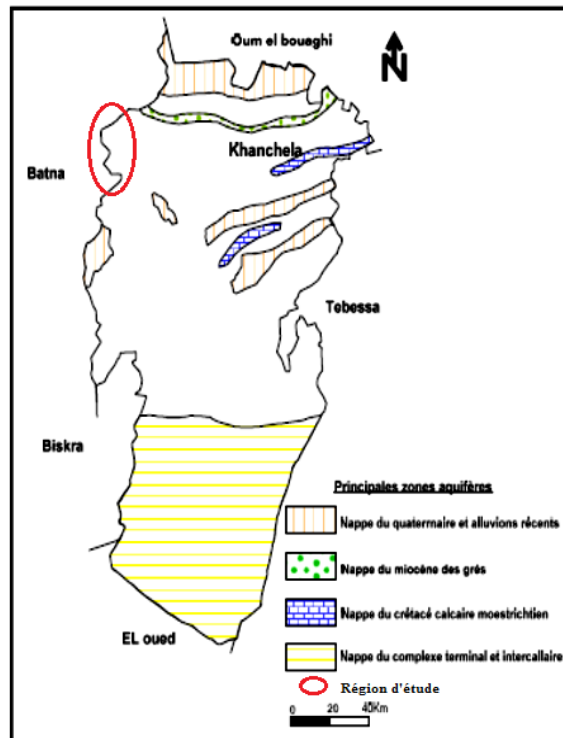
- **La nappe superficielle** : Il s'agit des nappes phréatiques dont la profondeur moyenne varie de 5 à 30m et sont exploitées essentiellement par des puits.
- **La nappe des plaines d'effondrement** : Comblées par un remplissage d'alluvions importantes alimentées par les précipitations et les oueds qui les traversent. Leurs profondeurs variant de 100 à 200 m et son d'âge mi pliocène. Dans ces plaines d'effondrement on peut associer les nappes des calcaires fissurés du Turonien et du Miocène dont la profondeur dépasse les 300m.
- **La nappe des calcaires fissurés** : L'épaisseur de certaines formations carbonatées dépassent les 250m et constituent la nappe des calcaires maestrichtiens.
- **La nappe des formations continentales** : Localisées essentiellement dans la région Sud de la wilaya, leurs profondeurs varient de 200 à 600m (Chaffai *et al*, 2013).



**Figure.14** : Coupe hydrogéologique schématique

Cette coupe de direction NW-SE est réalisée grâce à la carte géologique de Toufana (J.M Vila, au 1/50 000) et la carte piézométrique. La coupe hydrogéologique montre l'aquifère superficielle du Mio-Quaternaire qui est constitué par des Glaciaires polygéniques du Quaternaire et des grès blancs grossiers du Tortonien Supérieur. Cela traduit, un aquifère à nappe libre dont le niveau piézométrique est subhorizontal et s'incline vers le Sud-Est (30m

au NW et 5m au SE), il s'approche de plus en plus de la surface en s'avancant vers le massif du Djebel Islafbor el Arouah.



**Figure.15:** Carte des nappes aquifères (DHW. Khenchela, 1992)

D'après les données de la DHW, l'analyse de la carte hydrogéologique de la région montre que la région de Yabous a un potentiel appréciable en ressources en eau souterraine au niveau de la commune, où on distingue deux nappes phréatiques :

- Nappe du quaternaire et alluvions récents.
- Nappe de miocène des grès.



## **Chapitre IV**

# ***Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation***



### Introduction

Pour mieux comprendre le modèle de fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère de la région de Yabous (NW de Khenchela), il a été indispensable d'entreprendre une approche hydrochimique intéressant tous les points d'eau accessible à l'échantillonnage afin d'analyser les caractéristiques physicochimiques de l'eau de la région d'étude et de déterminer l'origine de sa minéralisation, de définir les différents faciès chimiques, relier les eaux à leurs réservoirs et étudier la possibilité de mélange entre différentes eaux.

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée sur 08 puits, une source et eau de barrage en Avril 2023. Une analyse complète des paramètres physico-chimiques pour expliquer l'origine et l'évolution de chaque élément est nécessaire.

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire d'El Hamma, ces dernières sont fondées sur les paramètres suivants :

1. Paramètres physiques in situ : T, pH et Conductivité Electrique ;
2. Elements chimiques majeure :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ .

Les points d'échantillonnages, sont déterminés après repérage à l'aide d'une carte topographique et carte Google Earth de la zone d'étude. Cependant, leurs positions géographiques ont été déterminées par un GPS sur terrain (Figure.16).

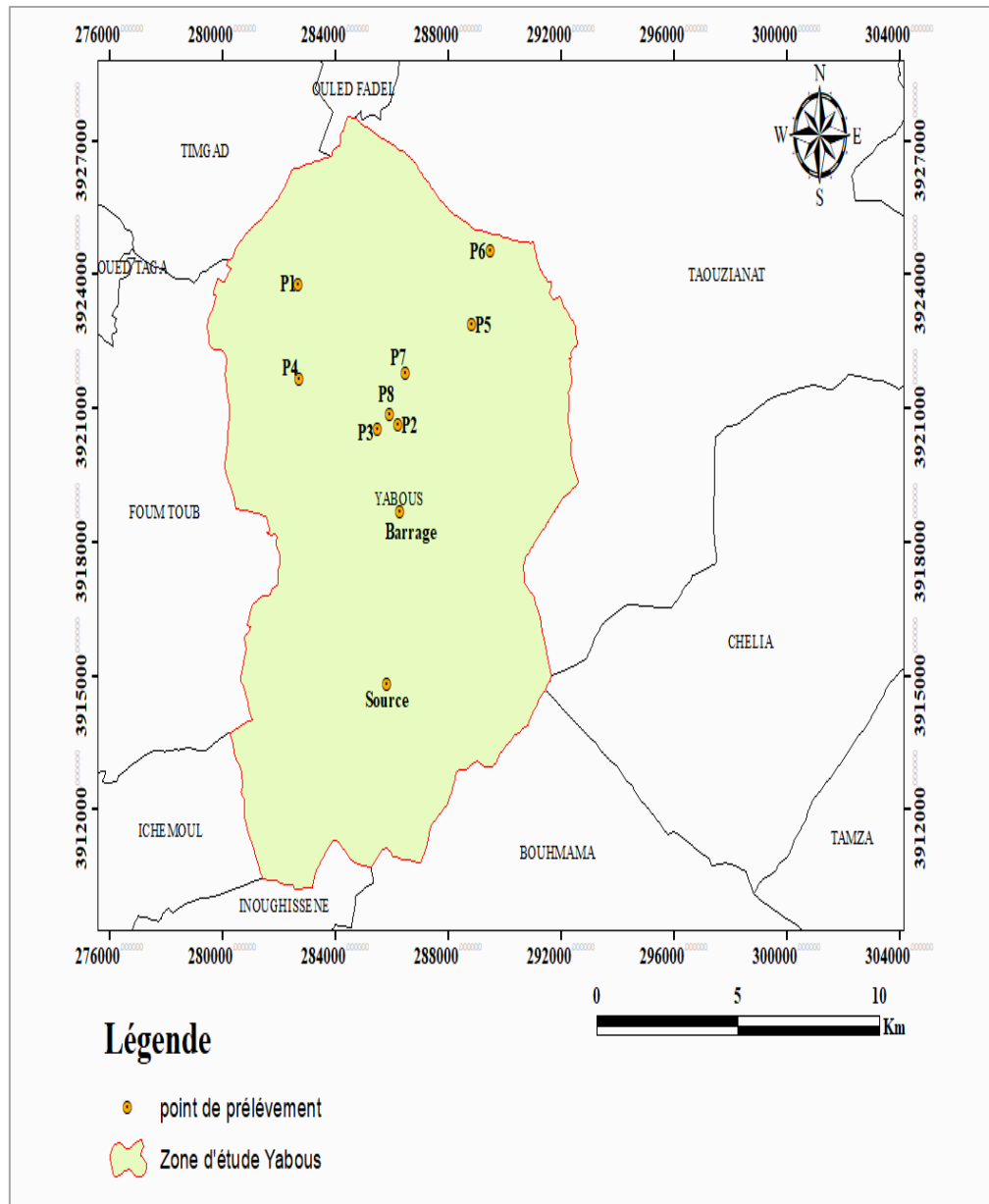


Figure.16 : Carte d'inventaire des points de prélèvements des eaux de Yabous (Avril, 2023)



La source



Puits



Barrage Tagharist

Figure.17 : Photos des points d'eau dans la région Yabous (Avril 2023)



Figure.18 : Echantillonnage d'eau et mesure des paramètres in situ (Avril 2023)

### I. Etude des variations des paramètres physicochimiques des eaux de Yabous

Les eaux souterraines ont une composition stable dans le temps, peu influencée par la pollution. Sauf pour certaines nappes phréatiques polluées, elles sont souvent proches des normes de qualité, mais peuvent contenir, en fonction de la nature du terrain de stockage, des éléments à un taux dépasse les normes. Les eaux superficielles sont souvent riches en matières organique et en matières en suspension. Leur composition est plus variable et elles sont sensibles aux pollutions du milieu extérieur (Franck, 2002).

Le tableau (16), montre la variabilité et l'ordre de grandeur des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à l'échelle de tout le secteur étudié.

Les valeurs de l'écart type sont élevées pour la plupart des éléments et dépassent parfois celles des moyennes cela indique une certaine variabilité dans la qualité des d'eau.

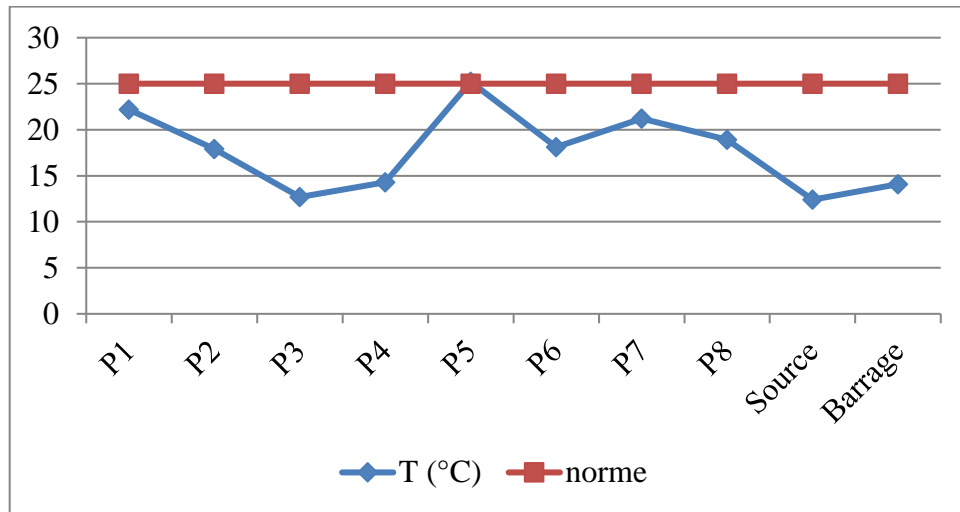
**Tableau.16:** Statistiques élémentaires des différents paramètres physico-chimiques des eaux de Yabous (Avril, 2023)

| Paramètres                               | Min    | Max     | Moy     | Ecart type |
|--|--------|---------|---------|------------|
| Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ )        | 434    | 1762    | 1098    | 442,03447  |
| Température ( $^{\circ}\text{C}$ )       | 12,4   | 25,2    | 18,8    | 4,3223497  |
| PH                                       | 6,71   | 7,74    | 7,225   | 0,2914714  |
| $\text{Cl}^{-}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )   | 71     | 269,8   | 170,4   | 76,527915  |
| $\text{SO}_4^{-2}$                       | 38     | 155,2   | 96,6    | 41,847263  |
| $\text{HCO}_3^{-}$                       | 73,2   | 274,5   | 173,85  | 72,336387  |
| $\text{Ca}^{+2}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )  | 34     | 120     | 77      | 73,136431  |
| $\text{Mg}^{+2}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )  | 30,41  | 239,7   | 135,055 | 74,780555  |
| $\text{Na}^{+}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )   | 63     | 170     | 116,5   | 70,950556  |
| $\text{K}^{+}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ )    | 1      | 3       | 2       | 77,7042    |
| $\text{NO}_2^{-}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) | 0      | 0,03    | 0,015   | 0,0111095  |
| $\text{NO}_3^{-}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) | 13     | 28      | 20,5    | 5,2596811  |
| TDS                                      | 290,78 | 1180,54 | 735,66  | 12,698163  |

#### I.1. Variation des températures

La température de l'eau est un paramètre important pour la vie aquatique. En effet la majorité des paramètres physico-chimiques et biochimiques sont dépendants de la température. La température de l'eau varie en fonction de la température extérieure (l'air), des

saisons, de la géologie et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol (Gaagai, 2017).

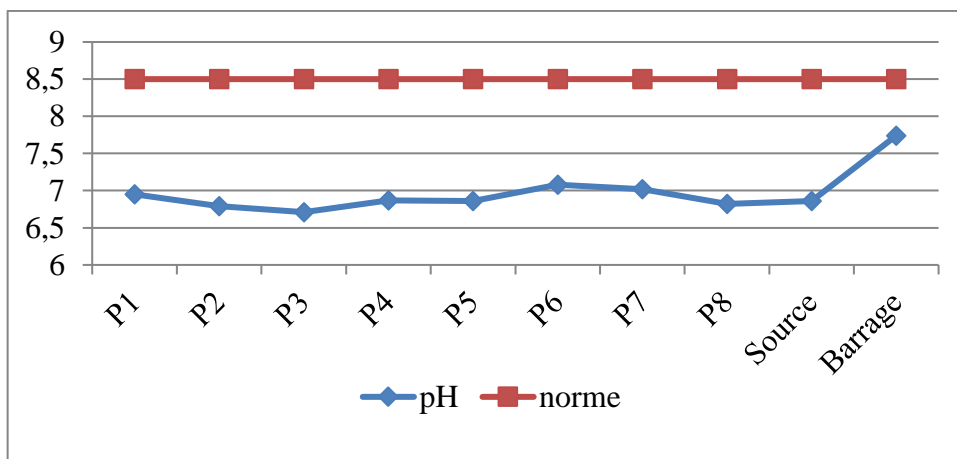


**Figure.19 :** Courbe de variation des températures des eaux de Yabous (Avril, 2023)

D'après la courbe de variation des températures des eaux prélevées, les valeurs varient de 12°C à 25°C, elles sont dans la norme de l'OMS (25°C). La valeur la plus élevée enregistrée au niveau de P5 (25°C) et le minimum enregistrée au niveau de la source (12 °C).

### I.2. Variation de potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH définit le caractère de l'eau si il est acide ou base à l'aide de la concentration des ions d'hydrogène  $H^+$ , il conditionne plusieurs phénomènes ou processus chimique tel que la dissociation ammoniacal de l'azote et plusieurs phénomènes biologiques plus particulièrement la photosynthèse. La mesure doit être effectuée in situ pour éviter tout changement de la composition ionique due au transport ou stockage (Bousslah, 2018).

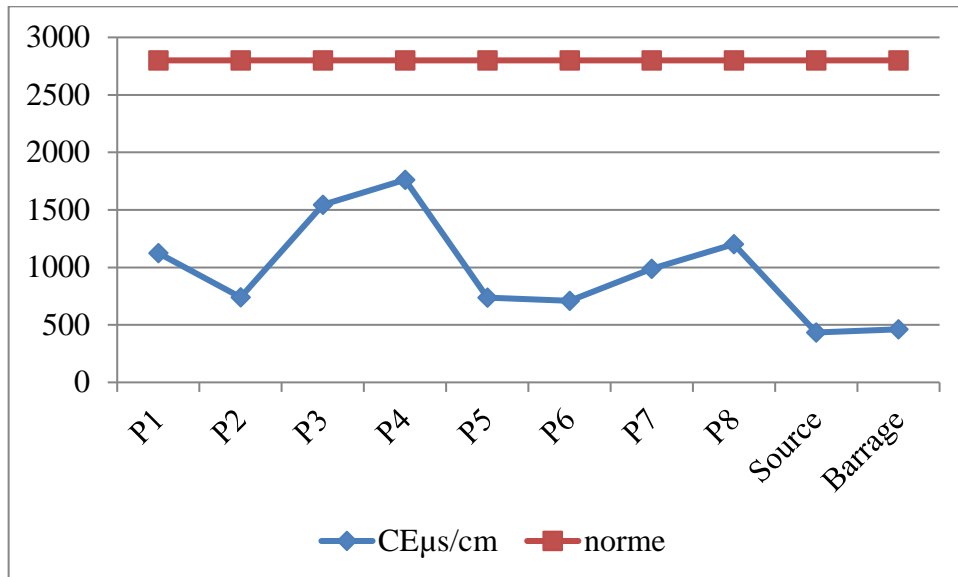


**Figure.20:** Courbe de variation du pH des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe de variation du pH des eaux de Yabous montre que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de concentration guide fixée par l'OMS le pH entre 6,5 et 8,5 de même que pour les normes algériennes, le pH des eaux de Yabous varie entre 6,71 et 7,74, un minimum est enregistré au niveau de P3 (6,71) et un maximum est enregistré au niveau de barrage (7,74).

### I.3. Variation de la conductivité électrique (CE)

Elle traduit une aptitude de l'eau à laisser passer le courant électrique ; c'est une mesure rapide de la teneur globale en électrolytes d'une solution ; c'est un outil nécessaire à l'estimation de la minéralisation (**Bouaicha, 2009**). Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La conductivité électrique est proportionnelle à la quantité des sels ionisables dissous.



**Figure.21** : Courbe de variation de la Conductivité électrique des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe de variation de la Conductivité électrique de Yabous montre que tous les points d'eau se trouvent dans la norme fixé par l'OMS 2800 µS/cm.

La Conductivité électrique varie entre 434 µS/cm et 1762µS/cm, un minimum est enregistré au niveau de la source (434µS/cm) et un maximum est enregistré au niveau de P4 (1762µS/cm) cette élévation de la conductivité électrique peut être due à la dissolution de la roche réservoir riche en sels (évaporites).

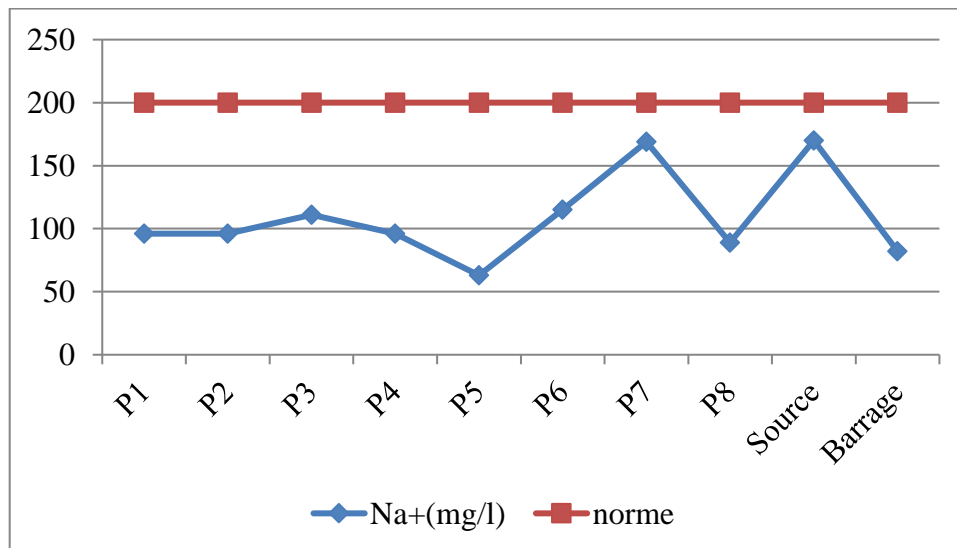
**Tableau.17 :** Rapport entre la conductivité et la minéralisation

| Conductivité électrique   | Minéralisation                   | Points d'eau |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|
| 0-100 $\mu\text{S/cm}$    | Minéralisation très faible       | 0            |
| 100-200 $\mu\text{S/cm}$  | Minéralisation faible            | 0            |
| 200-333 $\mu\text{S/cm}$  | Minéralisation moyenne accentuée | 0            |
| 333-666 $\mu\text{S/cm}$  | Minéralisation accentuée         | 2            |
| 666-1000 $\mu\text{S/cm}$ | Minéralisation importante        | 4            |
| > 1000 $\mu\text{S/cm}$   | Minéralisation élevée            | 4            |

Source : Diallo, 1996.

**I.4. Variation du Sodium ( $\text{Na}^+$ )**

Le sodium est présent dans de nombreux minéraux constitutifs des roches volcaniques. Les feldspaths sodiques  $\text{Na} [\text{Si}_3\text{AlO}_8]$  sont parmi les plus abondants. Dans les eaux souterraines, le sodium est présent sous la forme ionique  $\text{Na}^+$ . Il est soumis aux mêmes types de phénomènes d'adsorption/désorption que le calcium et le magnésium. Sa mise en solution présente donc une complexité comparable. En absence d'affleurement de roches évaporitiques, les fonds géochimiques couramment rencontrés en contexte volcanique et de socles en métropole montrent des teneurs comprises entre quelques mg/l et quelques dizaines de mg/l (Ziani, 2017).



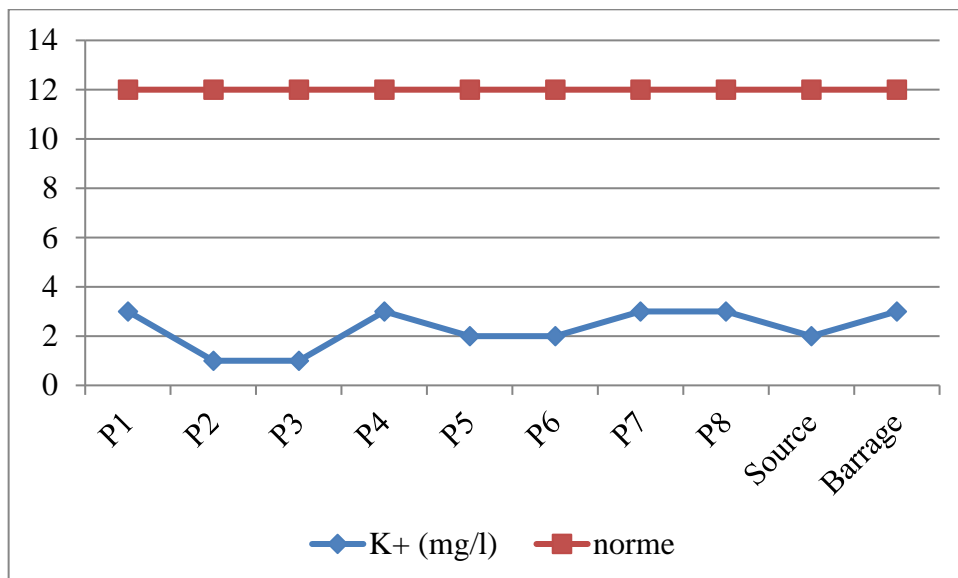
**Figure.22 :** Courbe de variation du sodium des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe de variation du sodium de Yabous montre que tous les points d'eau se trouvent dans la norme fixé par l'OMS 200 mg/l. Les concentrations du sodium varient entre

63 mg/l et 170 mg/l, un minimum est enregistré au niveau de P5 (63 mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de la source (170 mg/l).

### I.5. Variation du Potassium ( $K^+$ )

C'est un élément alcalin, très réactif avec l'eau, on le retrouve dans les roches ignées et dans la nature sous forme de chlorure double dans de nombreux minerais. Il se retrouve aussi dans la végétation sous forme de carbonate. Le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK). C'est le 7<sup>ème</sup> élément le plus abondant à l'état naturel, beaucoup moins abondant que le sodium, et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. Il ne représente aucun inconvénient particulier (Gaagai, 2017).



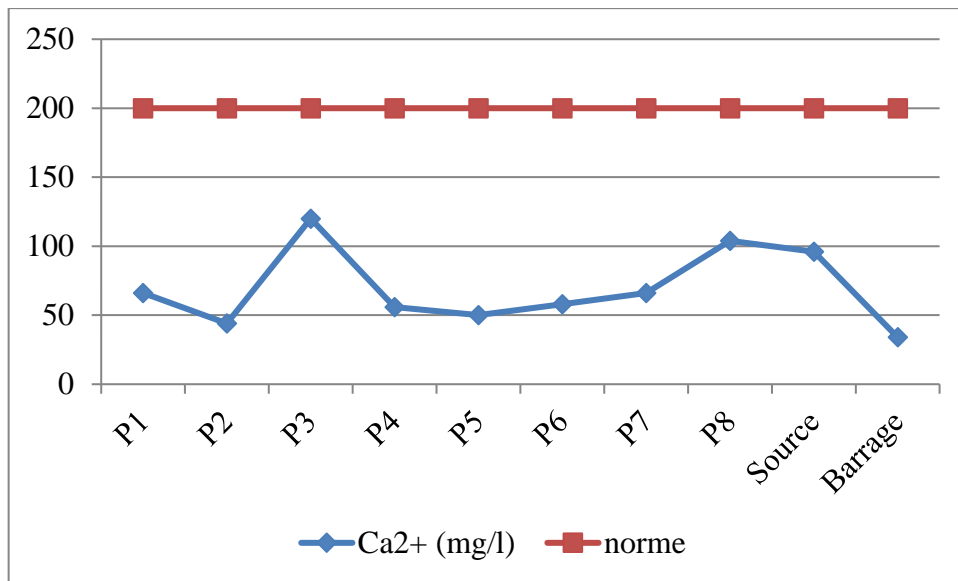
**Figure.23 :** Courbe de variation du potassium des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe de variation du potassium de Yabous montre que tous les points d'eau se trouvent dans la norme fixé par l'OMS 12 mg/l.

Les concentrations des potassiums varient entre 1 mg/l et 3 mg/l, un minimum est enregistré au niveau des points P2 et P3 (1mg/l) et un maximum est enregistré au niveau des points P1, P4, P7et P8 (3mg/l).

### I.6. Variation du Calcium ( $Ca^{2+}$ )

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaire sous forme de carbonates. Est un composant majeur de la dureté totale de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Il existe surtout à l'état d'hydrogencarbonates et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorure...etc (Bensalah et Benzitoune, 2021).



**Figure.24 :** Courbe de variation du calcium des eaux de Yabous (Avril, 2023)

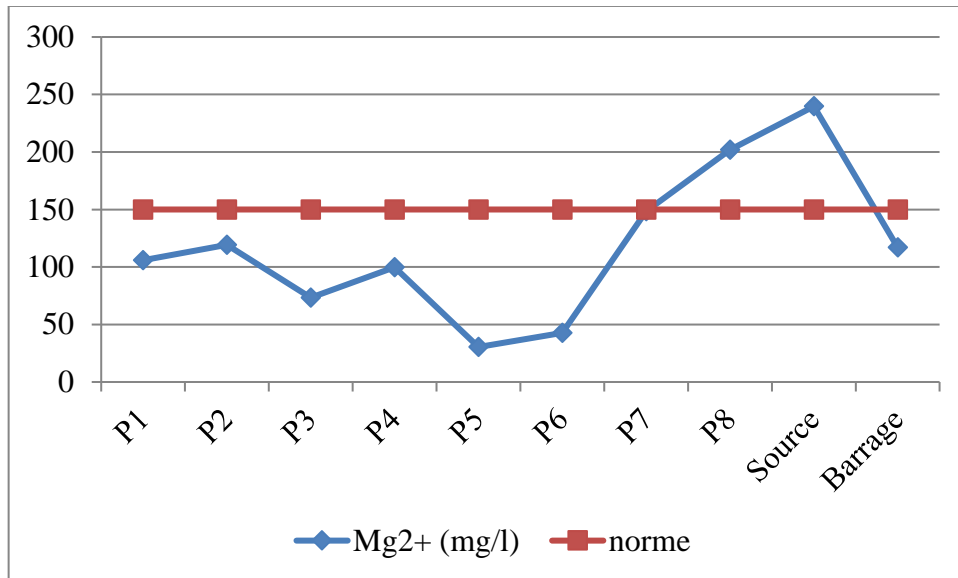
La courbe de variation du calcium de Yabous montre que la plupart des points ont des concentrations inférieures à la norme fixée par l'OMS 200 mg/l.

Les concentrations des calciums varient entre 34 mg/l et 120 mg/l, un minimum est enregistré au niveau de barrage (34mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de P3 (120mg/l).

### I.7. Variation du Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium. La dissolution des ions des Mg<sup>+2</sup> résulte principalement lors du ruissellement et lessivage des calcaires et des dolomies par les eaux de pluies à la provenance du gaz carbonique (**Tardat *et al.*, 1984**).

Le magnésium est un constituant de nombreux minéraux et roches, en particulier la dolomite (carbonate double de calcium et de magnésium). Il provient également de la dissolution d'autres roches (basalte, magnésites, argiles, etc.). Il constitue un élément significatif de la dureté de l'eau (**Bousid et Annab, 2021**).



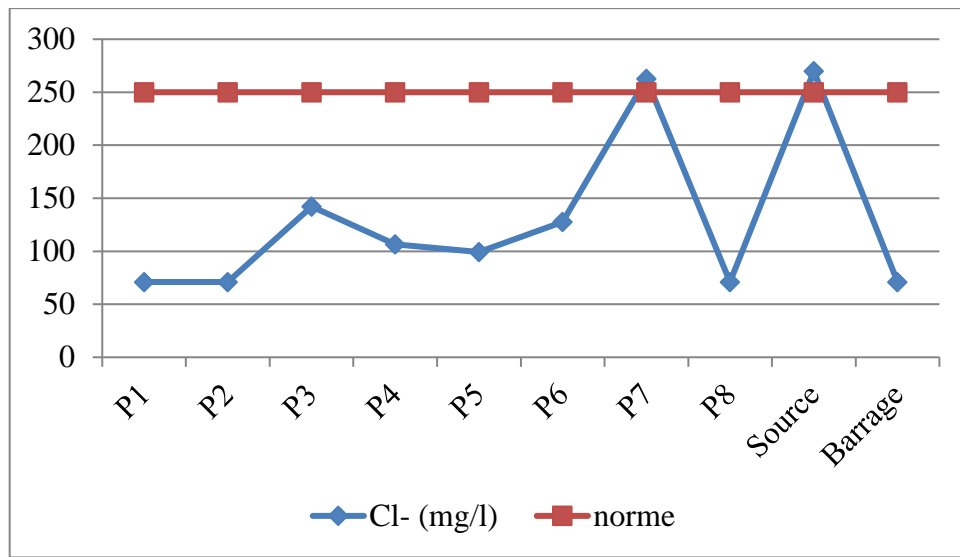
**Figure.25:** Courbe de variation du magnésium des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe de variation du magnésium de Yabous montre que la plupart des points d'eau se trouvent dans la norme fixé par l'OMS 150 mg/l, sauf la source et P8.

Les concentrations du magnésium varient entre 42,65 mg/l et 239,7 mg/l, un minimum est enregistré au niveau de P6 (42,65mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de la source (239,7mg/l) dépasse la norme cela est dû au ruissellement, lessivage des sols et à la dissolution des roches (magnésites, argiles, dolomite et calcaire).

### I.8. Variation des Chlorures (Cl<sup>-</sup>)

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux (**Makhoukh, 2011**).



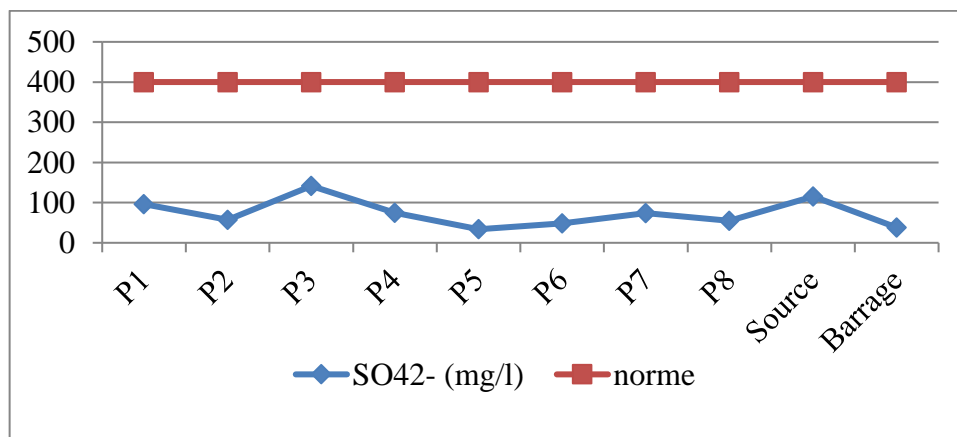
**Figure.26 :** Courbe de variation des chlorures des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe montre que la plupart des points d'eau se trouvent dans l'intervalle de concentration guide fixée par l'OMS 250 mg/l, sauf la source et P7.

Les concentrations des chlorures varient entre 71 mg/l et 269,8 mg/l, un minimum est enregistré au niveau des points P1, P2, P8 et barrage (71 mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de la source (269,8 mg/l) cette concentration est due à la dissolution des roches riches en sels (les évaporites).

### **I.9. Variation des Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Les eaux naturelles contiennent, pratiquement, des ions sulfatés, dont les proportions très variables. Le sulfate qui se dissout dans l'eau provient de certains minéraux en particulier du gypse où à partir de l'oxydation de minéraux sulfureux (**Beldjilali et Arab, 2018**).

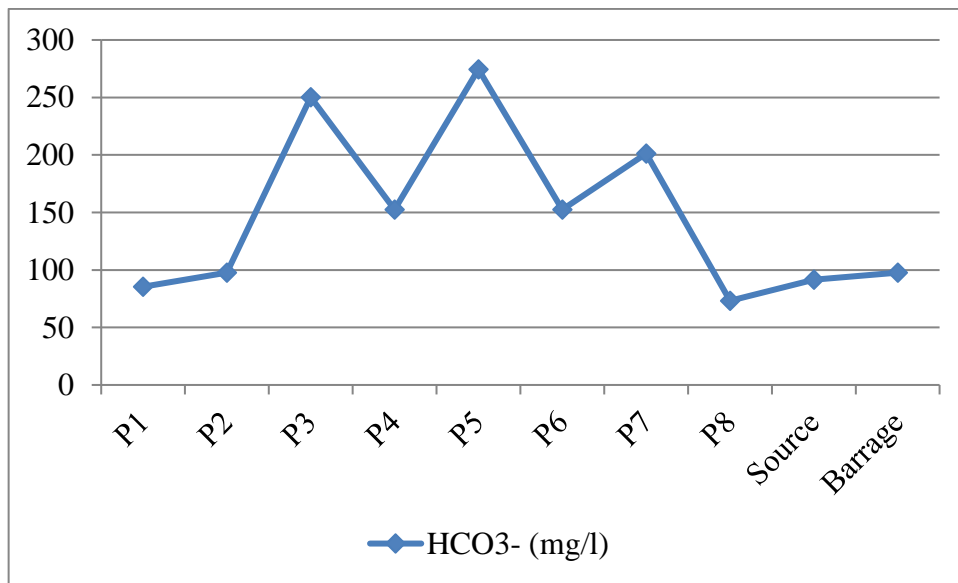


**Figure.27 :** Courbe de variation des sulfates des eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe montre que tous les points d'eau se trouvent en dessous de la valeur guide fixée par l'OMS 400 mg/l. Les concentrations des sulfates varient entre 33,7 mg/l et 141,4 mg/l, un minimum est enregistré au niveau de P5 (33,7mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de P3 (141,4mg/l).

### I.10. Variation des Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ )

L'ion Bicarbonate est le principale constituant alcalin de la plus part des eaux courante. Sa présence dans l'eau est due à l'action des bactéries qui fournissent du  $\text{CO}_2$  à partir des minéraux contenant des carbonates (Rodier, 2005).

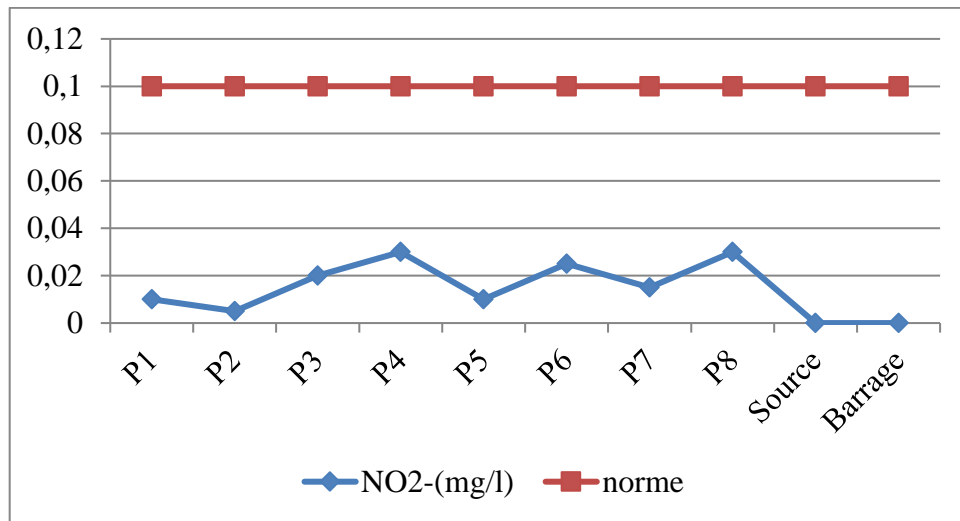


**Figure.28** : Courbe de variation des bicarbonates dans les eaux de Yabous (Avril, 2023)

Les concentrations des bicarbonates varient entre 73.2 mg/l et 274.5 mg/l, un minimum est enregistré au niveau de P8 (73,2mg/l) et un maximum est enregistré au niveau P5 (274,5mg/l).

### I.11. Variation des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )

Les nitrites ou azote nitreux, représentent une forme moins oxygénée et moins stable. C'est un passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique. Les nitrites sont réponsus dans le sol, les eaux et dans les plantes mais en quantités relativement faibles (Rondeau, 2005).

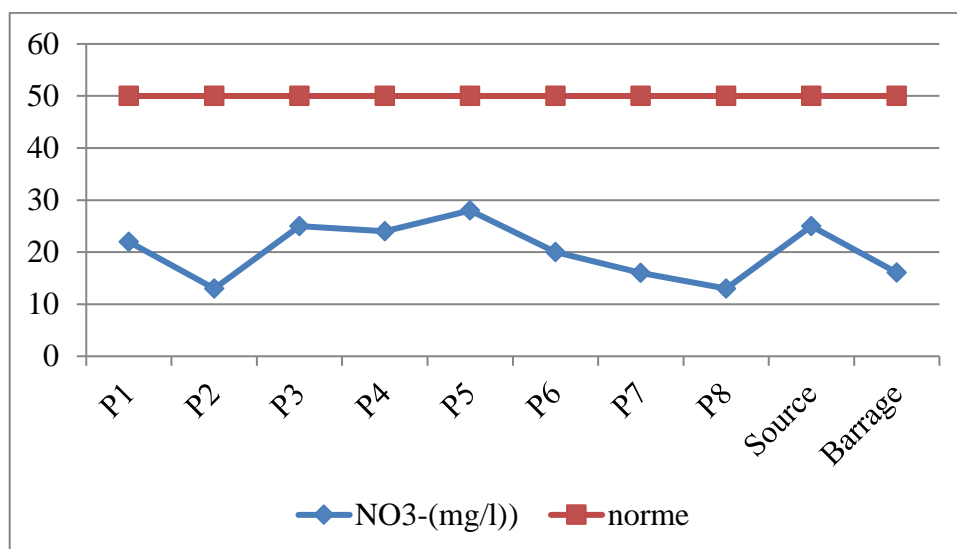


**Figure.29:** Courbe de variation des nitrites dans les eaux de Yabous (Avril, 2023)

La courbe montre que tous les points d'eau se trouvent en dessous de la valeur guide de l'OMS 0,1 mg/l. Les concentrations des nitrites varient de 0 mg/l à 0,03 mg/l, un minimum est enregistré au niveau de la source et barrage (0 mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de P8 (0,03 mg/l).

### I.12. Variation des Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

Les nitrates sont les formes d'azote les plus solubles dans l'eau. Par conséquent, leurs concentrations varient selon les événements hydrologiques atteignant ou dépassant parfois leurs critères respectifs de qualité pour l'eau brute d'alimentation humaine (**Bchitou, 2001**).



**Figure.30 :** Courbe de variation des nitrates dans les eaux de Yabous (Avril, 2023)

## Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation

La courbe montre que tous les points d'eau ont des concentrations inférieures à la norme fixée par l'OMS 50 mg/l. Les concentrations des nitrites varient de 13 mg/l à 28 mg/l, un minimum est enregistré au niveau des points P2 et P8 (13mg/l) et un maximum est enregistré au niveau de P5 (28 mg/l).

### II. Etude de la composition chimique et faciès des eaux

L'intérêt des représentations graphiques est pour avoir une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement la qualité d'une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique.

#### II.1. Diagramme de PIPER

Le diagramme de Piper permet de représenter les faciès chimique d'un ensemble de points d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global (Vayana, 2009).

La représentation des données de l'analyse de l'eau sur le diagramme de Piper (Figure.31.a) a permis de distinguer les faciès chimiques suivants :

- Le faciès chloruré magnésienne,
- Le faciès bicarbonaté calcique.

#### II.2. Diagramme de SchöellerBerkaloff

Ce type de représentation de Schöeller est repris par Berkaloff, consiste à reporter sur les axes logarithmiques les éléments chimiques (anions et cations), les concentrations des éléments chimiques en mg/l pour chaque point de prélèvement (Halimi, 2016), nous allons reporter les résultats de 10 échantillons sur la période de Avril 2023. Les figures(Figure.31.a) et (Figure.31.b) met en évidence l'existence des faciès chimiques suivants:

**Tableau.18:** Les faciès chimiques des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

| Le faciès chimique      | Points d'eau          |
|-------------------------|-----------------------|
| Bicarbonaté calcique    | P3                    |
| Sulfaté magnésienne     | P1                    |
| Chloruré sodique        | P7                    |
| Chloruré magnésienne    | Source                |
| Bicarbonaté sodique     | P5 et P6              |
| Bicarbonaté magnésienne | P2, P4, P8 et barrage |

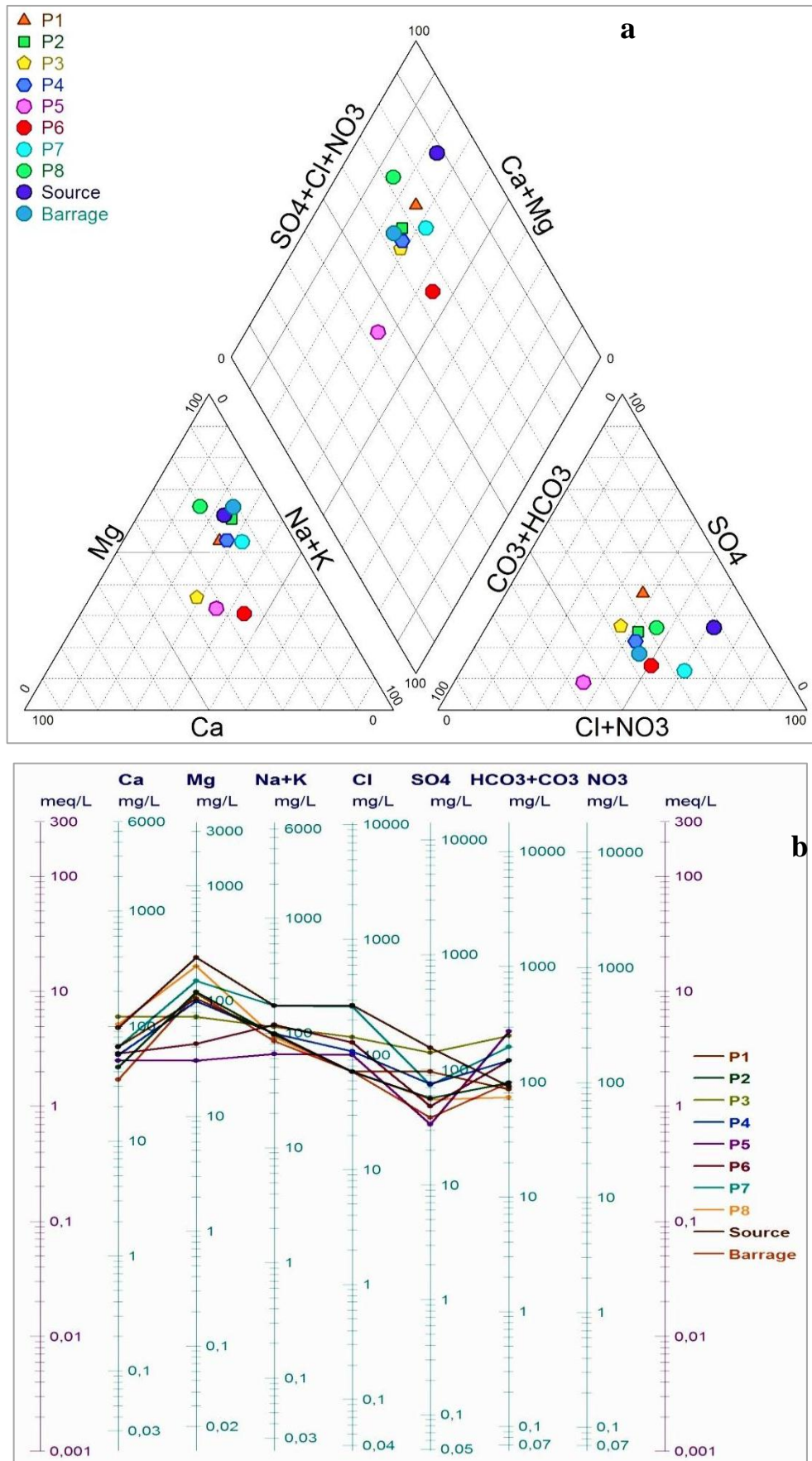


Figure.31 : Facies chimique des eaux de la région de Yabous selon a. Piper, b. Schoeller-Berkalof (Avril, 2023)

### III. Etude des processus hydrogéochimiques des eaux

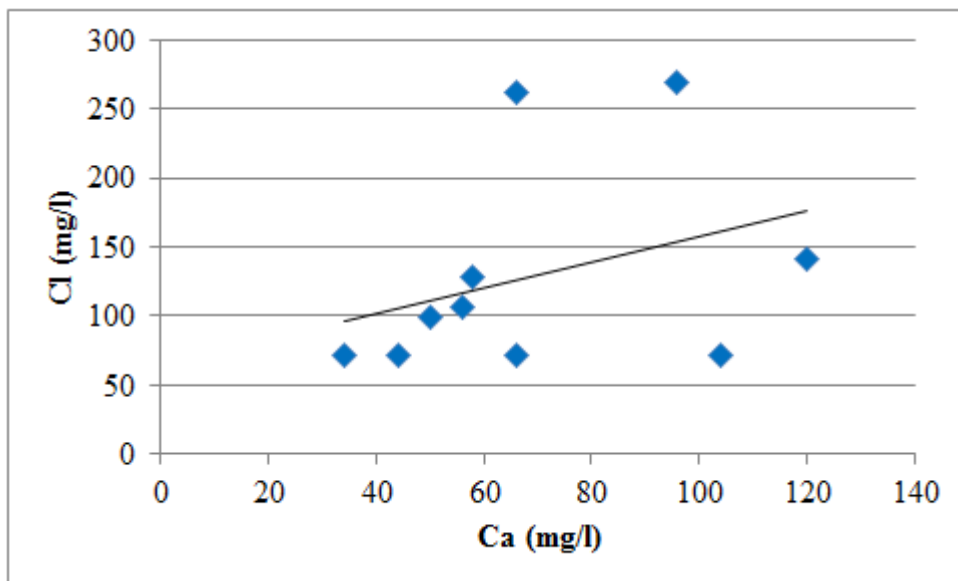
Une fois en contact avec l'aquifère, l'eau de la nappe peut s'enrichir de nouveaux éléments provenant du réservoir géologique. Cette interaction est d'autant plus importante que le temps de résidence est long et les minéraux des roches réservoirs solubles.

L'objectif de cette partie est de cerner les différents mécanismes qui sont à l'origine de la minéralisation en se basant sur les différentes corrélations entre éléments majeurs, des saturations vis-à-vis de certains minéraux et les relations entre TDS et éléments chimiques majeurs.

#### III.1. Corrélations des éléments chimiques majeurs

##### III.1.1. Corrélations : Cl vs Ca

Un excès en Ca et en Cl pour tous les points d'eau de la région d'étude peut être s'expliquer par soit la dissolution de la roche réservoir (évaporites) et/ou le phénomène d'échange de base entre calcium, sodium et magnésium (les minéraux argileux qui fixent l'ion  $\text{Na}^+$ , après la libération de  $\text{Ca}^{2+}$ ).



**Figure.32** : Corrélations ioniques Cl vs Ca des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

##### III.1.2. Corrélations : Cl vs Na

La figure ci-après montre une bonne corrélation indiquant que le Cl et le Na pour la plupart sont issus de la dissolution de sel gemme (l'halite) diffusés dans les sédiments (Figure.33). Si l'excès en chlorure est accompagné d'une carence en sodium, cela peut être expliqué par un échange de base associé à des minéraux argileux qui fixent l'ion  $\text{Na}^+$ , après la libération de  $\text{Ca}^{2+}$ .

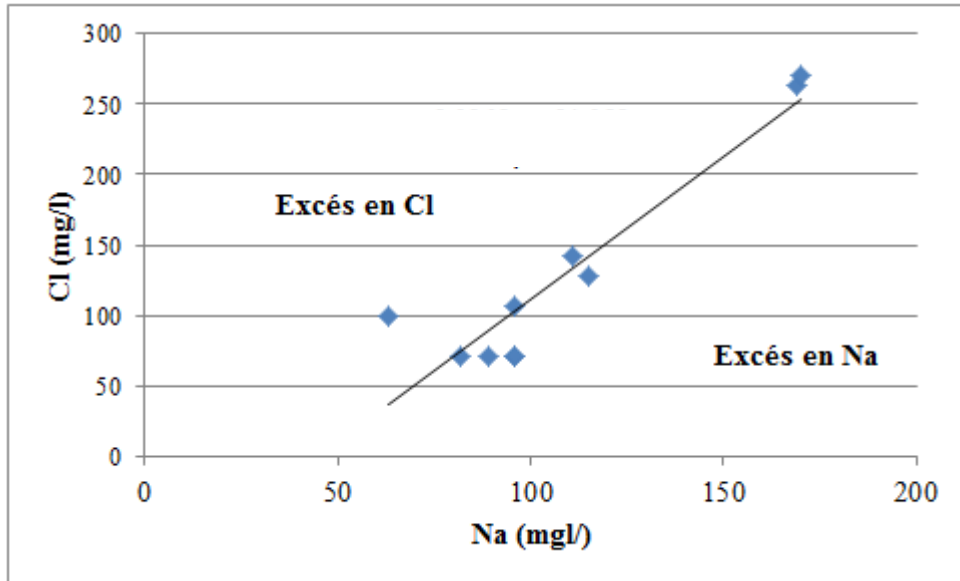


Figure.33 : Corrélation ionique Cl vs Na des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

### III.1.3. Corrélation : Ca vs SO<sub>4</sub>

Les fortes teneurs en sulfates sont liées, à la présence du gypse et l'anhydrite et peuvent provenir de la dissolution de la roche réservoir en cette période (hautes eaux), ce qui augmente la concentration des sels dissous dans l'eau, notamment les sulfates.

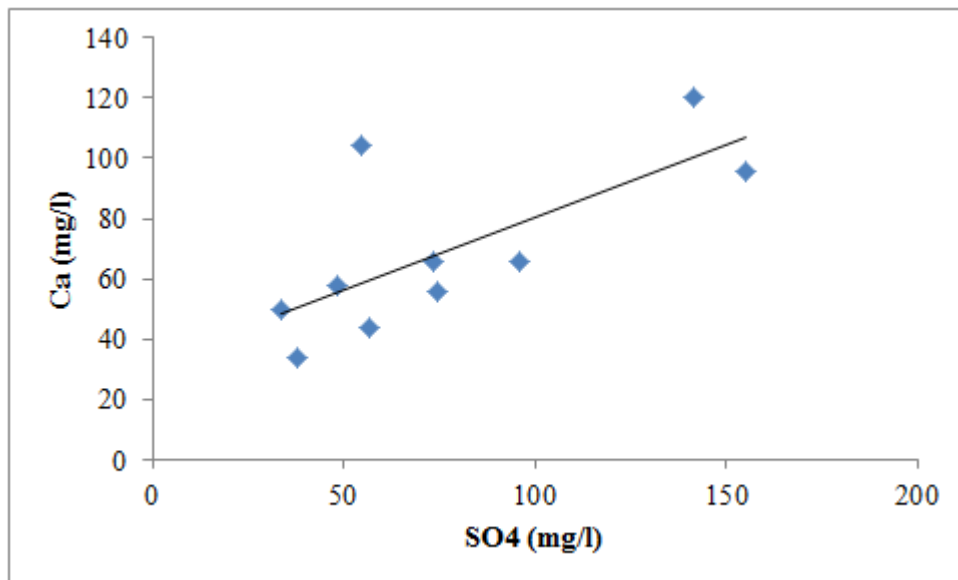


Figure.34 : Corrélation ionique Ca vs SO<sub>4</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

### III.1.4. Corrélation : Ca, Ca/Mg vs HCO<sub>3</sub>

Les fortes teneurs en bicarbonates sont dues à leur présence et à la dissolution des formations carbonatées tel que les calcaires et les dolomies.

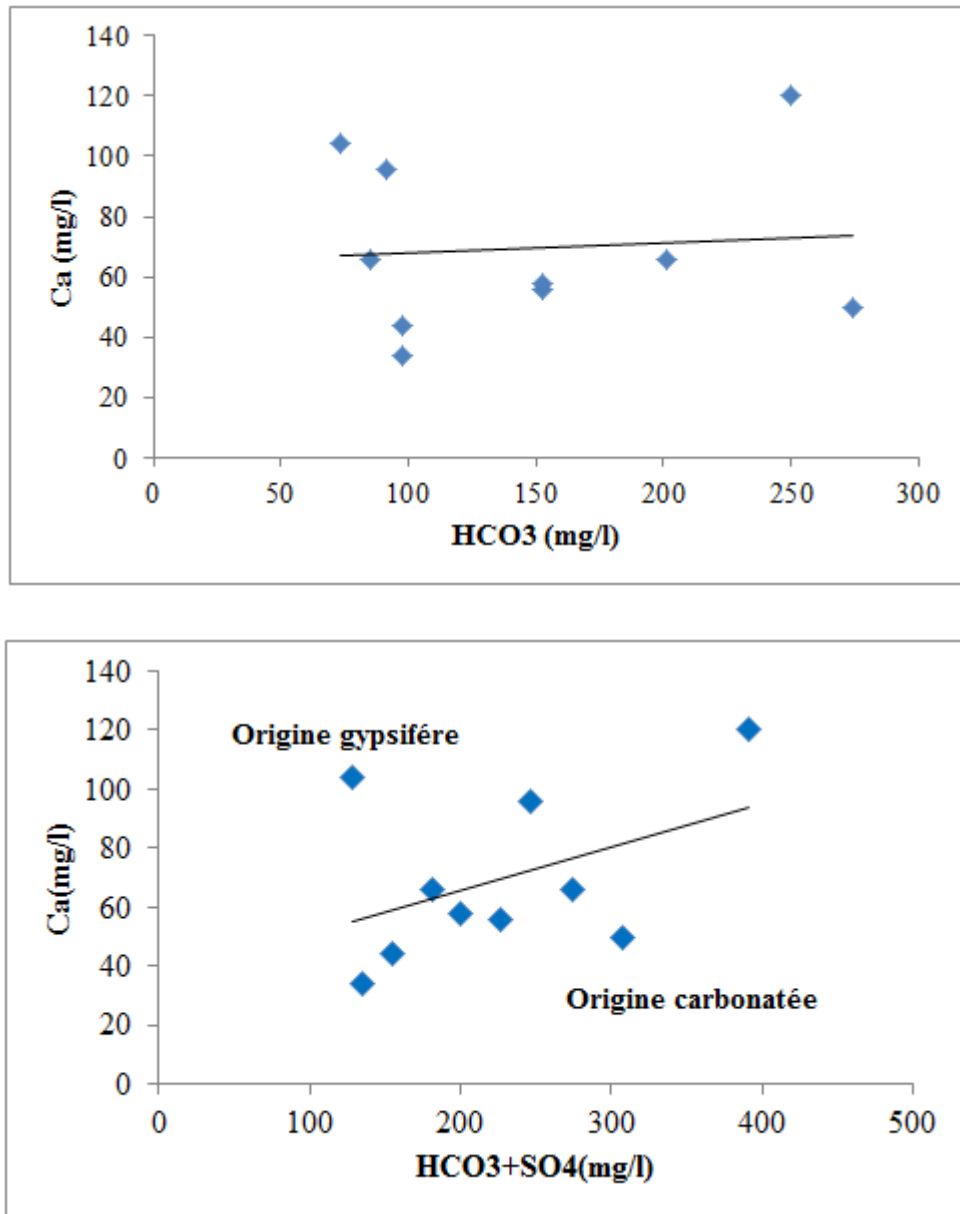
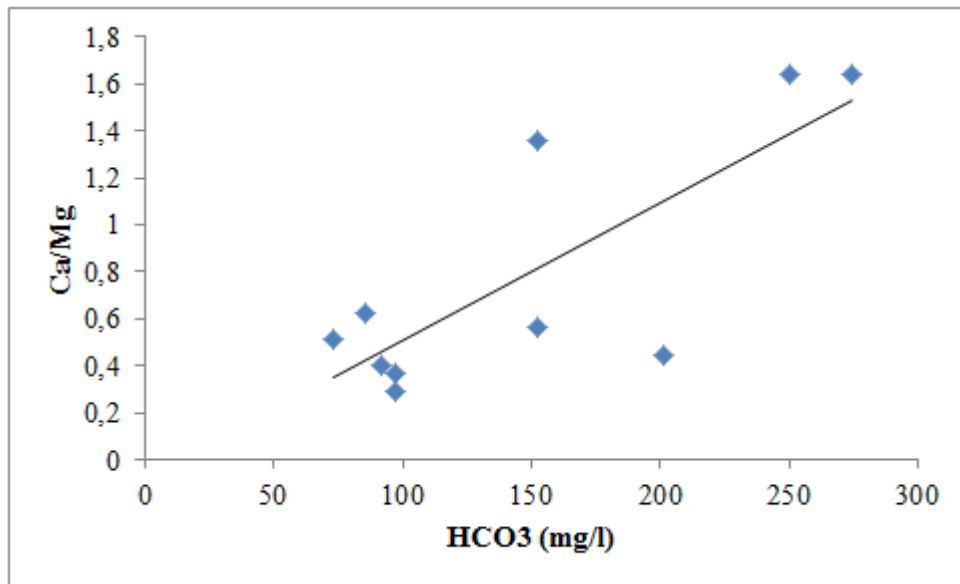


Figure.35 : Corrélation ionique Ca, HCO<sub>3</sub> et SO<sub>4</sub> des eaux de la région de Yabous

(Avril, 2023)

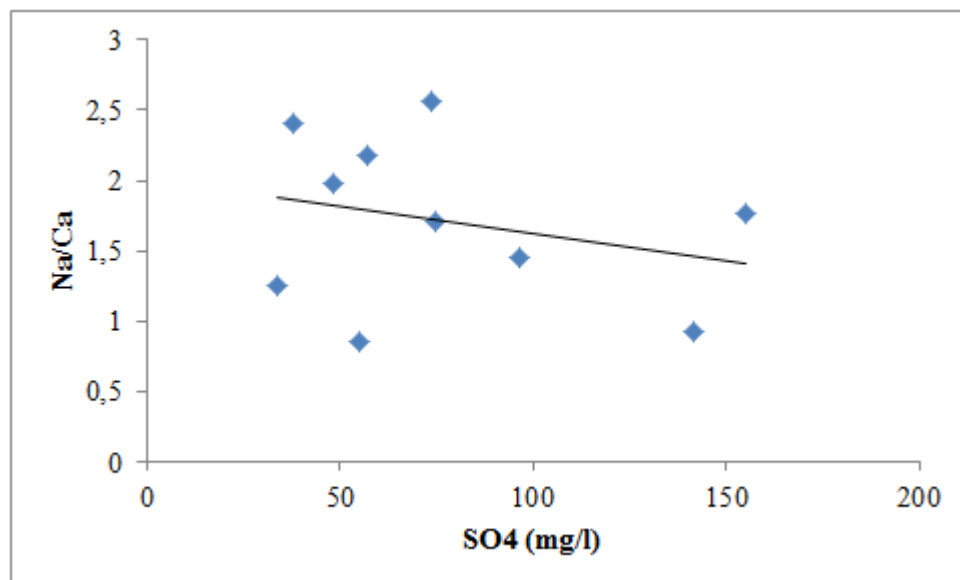


**Figure.36 :** Corrélation ionique Ca/Mg vs HCO<sub>3</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

Les fortes teneurs en magnésium sont dues probablement de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).

#### III.1.5. Corrélation : Na/Ca vs SO<sub>4</sub>

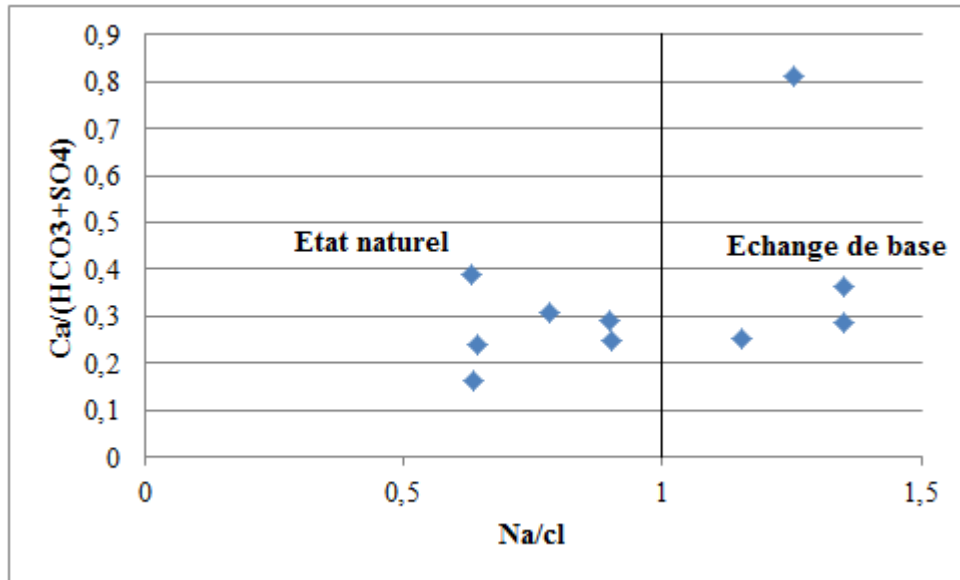
Les fortes teneurs en Na<sup>+</sup> et en Ca<sup>+2</sup> sont attribuées à la dissolution de l'halite (les évaporites). L'enrichissement des points en sulfates est liée à la présence des évaporites dans les aquifères et/ou une contamination d'origine agricole.



**Figure.37 :** Corrélation ionique Na/Ca vs SO<sub>4</sub> des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

### III.1.6. Corrélation: $\text{Ca}/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ vs $\text{Na}/\text{Cl}$

La représentation des résultats sur le graphique  $\text{Ca}^{+2}/(\text{HCO}_3^{-3} + \text{SO}_4^{-2})$ ,  $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$  (Figure.38) montre que 40% des points d'eau subissent un échange de base et 60% des points présentent l'état naturel.



**Figure.38** : Corrélation ionique  $\text{Ca}/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$  vs  $\text{Na}/\text{Cl}$  des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

### IV. Saturation vis-à-vis des phases minérales (Indices de saturation, $I_s$ )

L'indice de saturation ( $I_s$ ) d'un minéral donné est défini par l'équation suivante :

$$I_s = \log (\text{PAI}/K_{sp}), \text{ où}$$

PAI : le produit de l'activité ionique de la solution,

$K_{sp}$  : le produit de solubilité à un moment et à une température donné (constante thermodynamique d'un échantillon à l'équilibre et à une température donnée).

- Un indice de saturation  $I_s$  égale à zéro l'eau est alors en équilibre ;
- Un indice de saturation  $I_s$  inférieur à zéro indique que l'eau souterraine est sous-saturée par rapport à ce minéral. Une telle valeur pourrait refléter le caractère de l'eau provenant d'une formation avec une quantité insuffisante de minéraux pour la solution où le temps de séjour est court (dissolution) ;
- Un indice de saturation  $I_s$  supérieur à zéro ( $I_s$ ) précise que l'eau souterraine est sursaturée par rapport à la matière minérale particulière et elle est donc incapable de dissoudre plusieurs minéraux. Une telle valeur de l'indice reflète les eaux souterraines de décharge d'un aquifère contenant une quantité suffisante de la matière minérale avec suffisamment de temps de séjour pour atteindre l'équilibre (précipitation des sels).

## Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation

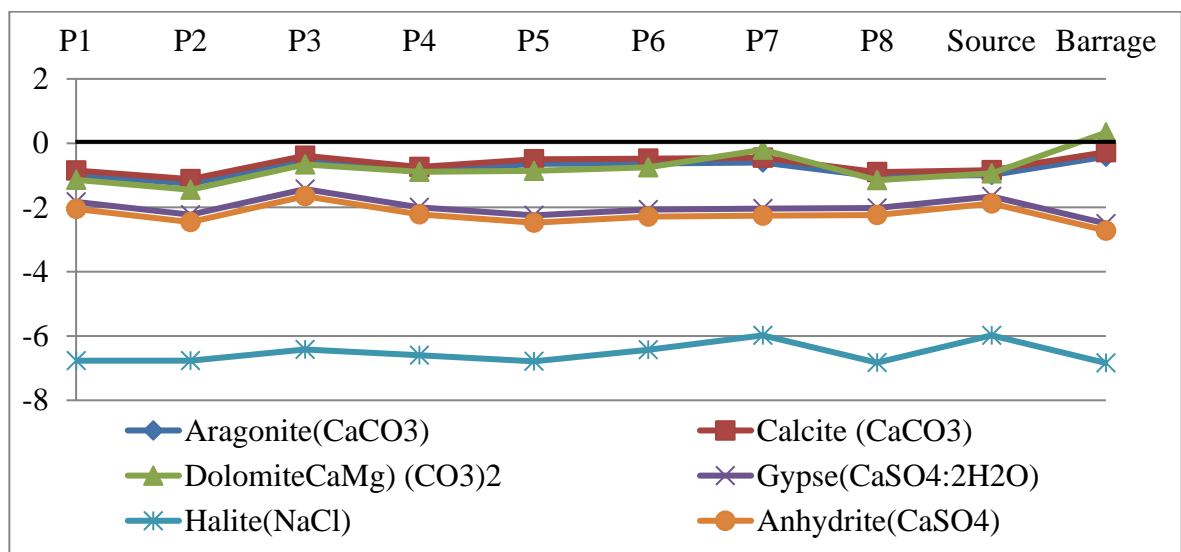
Pour déterminer les mécanismes responsables de la salinisation des eaux des systèmes aquifères de la région de Yabous, on a déterminé, pour les différents échantillons les indices de saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés et évaporitiques. Ces paramètres sont calculés en utilisant le logiciel Diagramme (Simler, 2007).

### IV.1. Variation de l'indice de saturation

Les résultats obtenus après calcul sont mentionnés dans le tableau ci-après. L'observation du tableau (19), montre que les indices de saturation sont négatifs, indiquant une sous saturation vis-à-vis des minéraux suivants: La calcite, la dolomite, l'aragonite, l'anhydrite, le gypse et l'halite  $Is < 0$ .

**Tableau.19 :** Evolution des indices de saturation des minéraux (Avril, 2023)

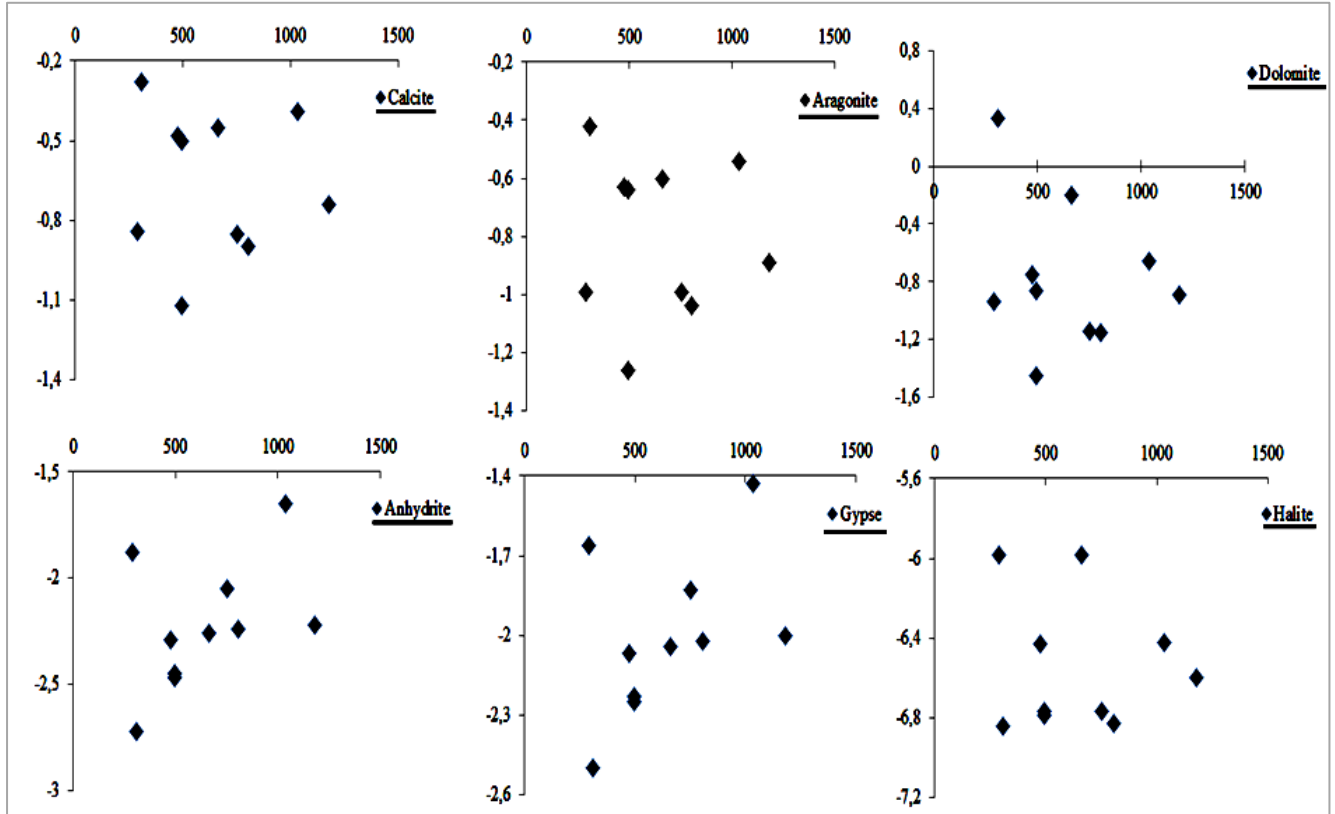
| Pt d'eau | TDS     | Minéraux Carbonatés |                              |   | Minéraux évaporitiques                      |              |                               |
|----------|---------|---------------------|------------------------------|---|---|--------------|-------------------------------|
|          |         | Aragonite           | Calcite (CaCO <sub>3</sub> ) | Dolomite (CaMg) (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | Gypse(CaSO <sub>4</sub> :2H <sub>2</sub> O) | Halite(NaCl) | Anhydrite(CaSO <sub>4</sub> ) |
| P1       | 753,35  | -0,99               | -0,85                        | -1,14   | -1,83                                       | -6,77        | -2,05                         |
| P2       | 495,13  | -1,26               | -1,12                        | -1,45   | -2,23                                       | -6,77        | -2,45                         |
| P3       | 1035,15 | -0,54               | -0,39                        | -0,66   | -1,43                                       | -6,42        | -1,65                         |
| P4       | 1180,54 | -0,89               | -0,74                        | -0,89   | -2  | -6,6         | -2,22                         |
| P5       | 494,46  | -0,64               | -0,5                         | -0,86   | -2,25                                       | -6,79        | -2,47                         |
| P6       | 475,03  | -0,63               | -0,48                        | -0,75   | -2,07                                       | -6,43        | -2,29                         |
| P7       | 662,63  | -0,6                | -0,45                        | -0,2  | -2,04                                       | -5,98        | -2,26                         |
| P8       | 806,01  | -1,04               | -0,9                         | -1,15   | -2,02                                       | -6,83        | -2,24                         |
| Source   | 290,78  | -0,99               | -0,84                        | -0,94   | -1,66                                       | -5,98        | -1,88                         |
| Barrage  | 308,67  | -0,42               | -0,28                        | 0,33  | -2,5  | -6,84        | -2,72                         |



**Figure.39:** Courbes de variation des indices de saturation des minéraux (Avril, 2023)

### IV.2. Corrélation des indices de saturation $I_s$ vis-à-vis TDS des eaux souterraines

Les différentes corrélations entre les valeurs de TDS avec les indices de saturations permettent de constater que parmi ces derniers ceux qui conditionnent la minéralisation des eaux de la région de Yabous.

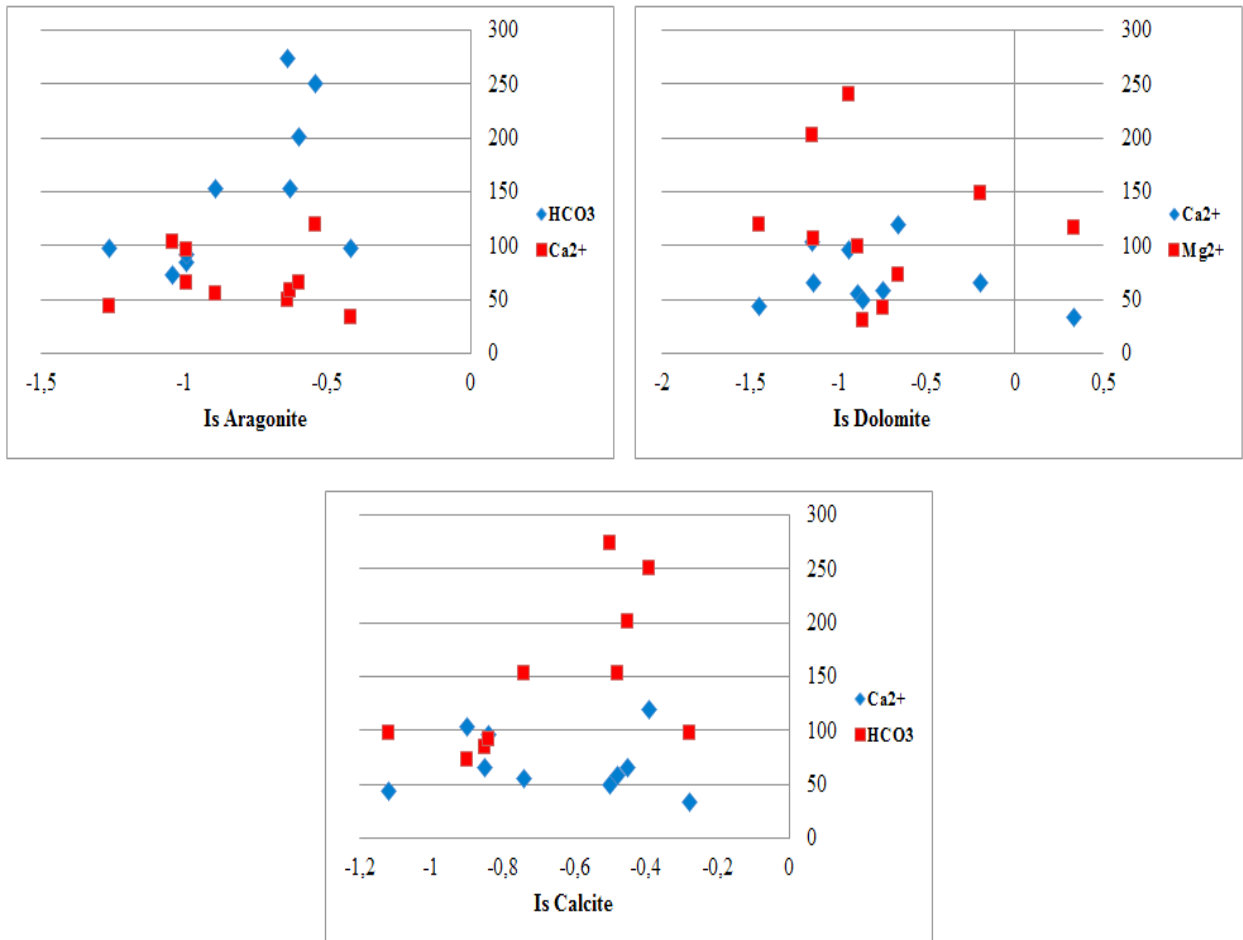


**Figure.40 :** Corrélation des indices de saturation  $I_s$  vis-à-vis des TDS des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

En effet, l'indice de saturation montre un état de sous saturation vis-à-vis des minéraux : Aragonite, calcite, gypse et dolomite et anhydrite où le  $I_s < 0$  prouve l'origine de la minéralisation par dissolution de certains minéraux de la roche réservoir lors du transit de l'eau (Figure.40).

### IV.3. Corrélation des indices de saturation $I_s$ vis-à-vis éléments chimiques majeurs

Les graphes (Figure.41) et (Figure.42) confirment cette tendance et montre que la calcite, l'aragonite, l'anhydrite et le gypse, réagissent en même temps, par contre l'halite, avec un  $I_s$  faible. En effet, une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.



**Figure.41** : Variation des indices de saturation(Is) en fonction des principaux éléments constitutifs du minéral concerné (minéraux carbonatés) (Avril, 2023)

Le calcul de l'indice de saturation des différents minéraux dans l'eau de la région de Yabous indique que seuls les minéraux carbonatés ont tendance à atteindre l'équilibre. Par contre, les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous saturation, malgré les fortes concentrations qu'ils acquièrent.

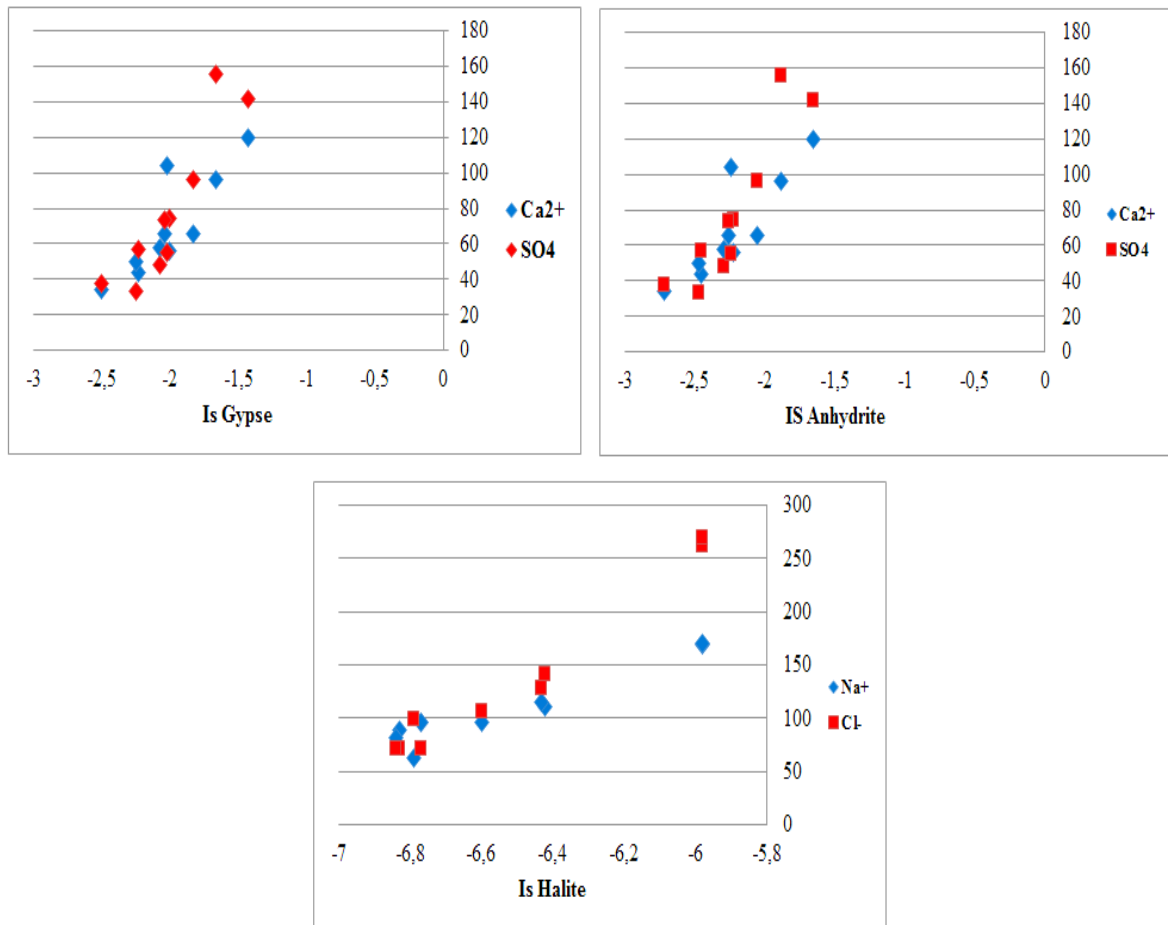
Les sulfates présentent une corrélation moins significative avec le Gypse du fait que le sulfate ne provienne pas uniquement du Gypse mais également de l'Anhydrite, ce qui confirme l'origine évaporitique des sulfates par dissolution de l'Anhydrite et du Gypse.

De même, les chlorures et le sodium se corrélaient bien avec l'Halite, ce qui confirme l'origine commune des deux éléments par dissolution de l'Halite.

La baisse des teneurs en Mg<sup>+2</sup> est liée à l'existence d'une autre source de Mg<sup>+2</sup> qu'est la dolomite (augmentation de l'indice de saturation).

## Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation

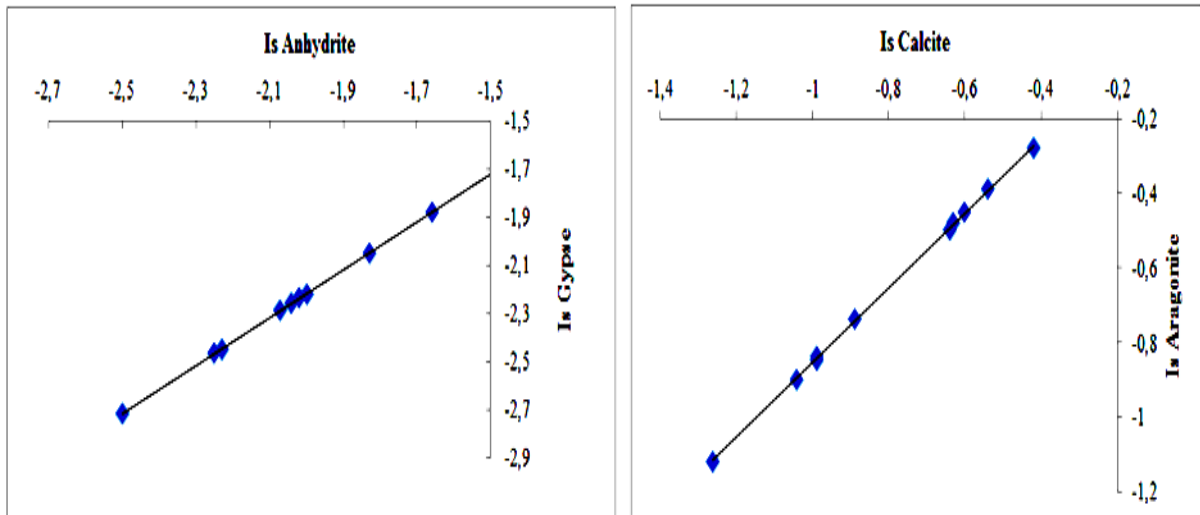
Pour le calcium présente une excellente corrélation avec le Gypse, la Dolomite et la Calcite indiquant que l'origine de calcium est très probablement liée à la dissolution de ces minéraux.



**Figure.42 :** Variation des indices de saturation(Is) en fonction des principaux éléments constitutifs du minéral concerné (minéraux évaporitiques) (Avril, 2023)

### IV.4. Correlations: Is calcite vs Is Aragonite et Is anhydrite vs Is Gypse

Nous remarquons d'après les deux graphes (Figure.43) que les indices, s'alignent suivant une droite, ce qui démontre que les formations carbonatées et les formations évaporitiques sont attaquées par les eaux (dissolution), donnant ainsi les deux minéraux provoquant la salinité observée.



**Figure.43 :** Variation des indices de saturation (Avril, 2023)

### V. L'IEB (Indice d'Echange de Base ou Indice chlore alcalin)

L'échange d'ions est un procédé chimique dans lequel les ions d'une certaine charge contenus dans une solution (par exemple des cations) sont éliminés de cette solution par adsorption sur un matériau solide (l'échangeur d'ions), pour être remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par le solide. Les ions de charge opposée ne sont pas affectés. Cette technologie a été développée à l'échelle industrielle après la seconde guerre mondiale, principalement dans les années (1950-1970).

Un échangeur d'ions est un sel, un acide ou une base, solide et insoluble dans l'eau, mais hydraté, c'est-à-dire gonflé d'eau comme une éponge. La teneur en eau d'un matériau apparemment sec peut être de plus de 50 % de sa masse totale et les réactions d'échange se déroulent dans cette eau, dite eau de gonflement ou d'hydratation, à l'intérieur de l'échangeur.

D'après Schoeller, 1934 cité par Kouamé (2011), Indice d'Echange de Base ou Indice chlore alcalin)est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Il est donné par l'expression suivante:

$$\text{IEB} = \frac{r\text{Cl}^- - (r\text{Na}^+ + r\text{k}^+)}{r\text{Cl}^-}$$

- Si l'IEB égal à 0, pas d'échanges;
- Si l'IEB inférieur à 0, les ions calcium et magnésium sont échangés par les ions sodium et potassium;
- Si l'IEB supérieur à 0, les ions sodium et potassium sont échangés par les ions calcium et magnésium.

## Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation

**Tableau.20** : Valeurs calculées des Indices d'Echange de Base IEB des eaux de Yabous (Avril, 2023)

| Point d'eau | P1    | P2  | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | Source | Barrage |
|-------------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|--------|---------|
| IEB         | 0,076 | 0,1 | 0,48 | 0,38 | 0,56 | 0,39 | 0,57 | 0,13 | 0,58   | 0,32    |

Sur notre site, on remarque que la totalité des échantillons présentent un IEB supérieur à 0, c'est-à-dire que les ions sodium et potassium sont échangés par les ions calcium et magnésium.

### VI. Aptitude des eaux de Yabous a l'irrigation

L'intensité des pratiques agricoles et la mise en place de nombreux systèmes d'irrigation ont provoqué un impact sur la qualité des eaux souterraines, notamment ceux de retour vers la nappe après irrigation. Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol et les plantes.

Les sels peuvent perturber le développement physique des plantes. Du fait de l'absorption de l'eau, on peut observer des effets sur les processus osmotiques, ou du point de vue chimique par des réactions métaboliques, telles que celles causées par les constituants toxiques.

En plus, les sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante (**Person, 1978**).

La région de Yabous est caractérisée par un climat semi-aride, où la salinisation et l'alcalinisation des eaux sont les principaux risques qui peuvent encourir les eaux destinées à l'irrigation.

Dans le but d'évaluer ces deux risques, les résultats des analyses physico-chimiques de notre compagnie, ont été projetés sur les digrammes de Riverside et de Wilcox. Sur cette représentation graphique, le risque de salinité est estimé par la conductivité exprimé en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Alors que le risque d'alcalinisation des sols est quantifié par le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio).

#### VI.1. Risque de sodicité et de salinité

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium et des chlorures par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (**Todd, 1980**).

Lorsque la concentration des ions  $\text{Na}^+$  à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations  $\text{Ca}^{2+}$  (échange de base) dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cet effet. Le risque est déterminé à partir

## Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation

de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé (**Rouabhia et Djabri, 2010**).

Pour la classification des eaux d'irrigation on a utilisé deux diagrammes : Wilcox et Richard, ces diagrammes sont basés sur des valeurs de pourcentage en sodium et le SAR en fonction de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau. L'objectif était de représenter les échantillons sur les diagrammes afin de faciliter la caractérisation des eaux souterraines et leur aptitude à l'irrigation. Le SAR est défini par la relation suivante:

$$\text{SAR} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Na^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Pour la classification des eaux d'irrigation on a utilisé deux diagrammes : Wilcox et Riverside, ces diagrammes sont basés sur des valeurs de pourcentage en sodium et le SAR en fonction de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau. L'objectif était de représenter les échantillons sur les diagrammes afin de faciliter la caractérisation des eaux souterraines et leur aptitude à l'irrigation.

Concernant le pourcentage de sodium et la conductivité électrique, le schéma (Figure.44) montre que 50 % des échantillons d'eau tombe dans la catégorie de la bonne qualité des eaux pour l'irrigation, 50 % des échantillons sont de qualité excellente pour l'irrigation des cultures.

Les valeurs de conductivité et SAR reportées sur un diagramme US salinité (Figure.45), montre les classes d'eau selon le procédé de SAR.

Les eaux ont été trouvées principalement dans deux classes de type de l'eau:

- **I'C2S1** où l'eau est de bonne qualité et Convenable à l'irrigation des plantes qui ont une tolérance aux sels (générer des problèmes pour les argiles),
- **C3S1** où l'eau est d'une qualité admissible, la salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérable aux sels sur des sols bien drainés.

## Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation

Tableau.21 : Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation (méthode de SAR)

| Degrés | Qualité    | Classes  | Etat d'utilisation  |
|--------|------------|--|---|
| 1      | Excellente | C <sub>1</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>1</sub> -S <sub>2</sub>                                  | Utilisation sans danger pour l'irrigation des cultures et même pour les sols  |
| 2      | Bonne      | C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> -S <sub>2</sub>                                  | Convenable pour des plantes qui ont une tolérance aux sels (générer des problèmes pour les argiles)                   |
| 3      | Admissible | C <sub>3</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> -S <sub>2</sub> | La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérable aux sels sur des sols bien drainés                 |
| 4      | Médiocre   | C <sub>4</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> -S <sub>1</sub> , C <sub>3</sub> -S <sub>3</sub> | Eau fortement minéralisée, utilisée seulement pour des plantes très résistantes aux sels (sols de bonne perméabilité) |
| 5      | Mauvaise   |  | Inutilisable  |

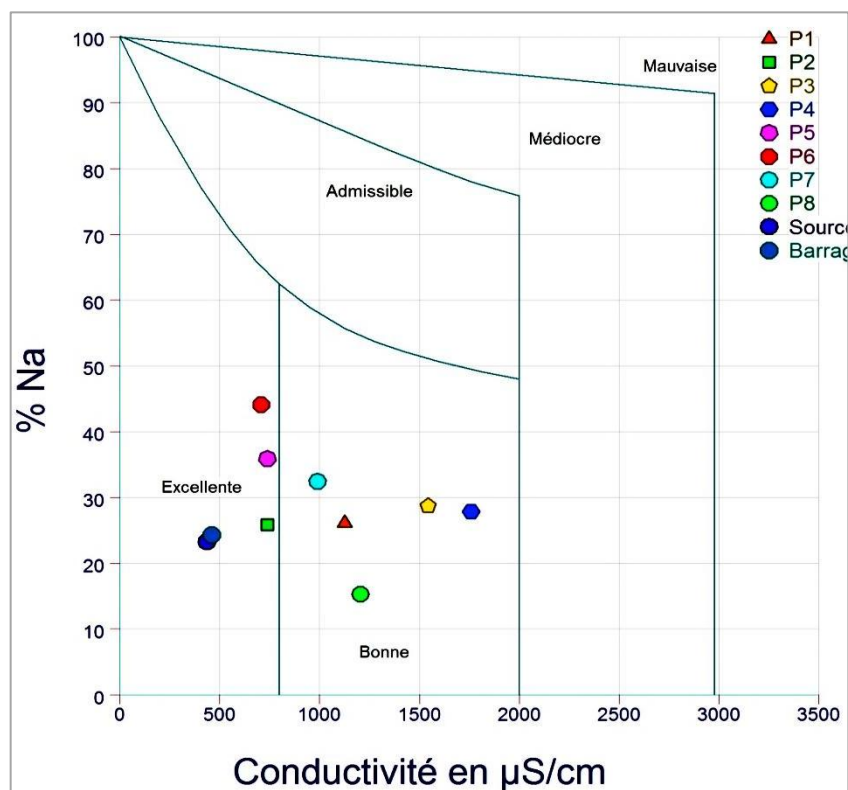
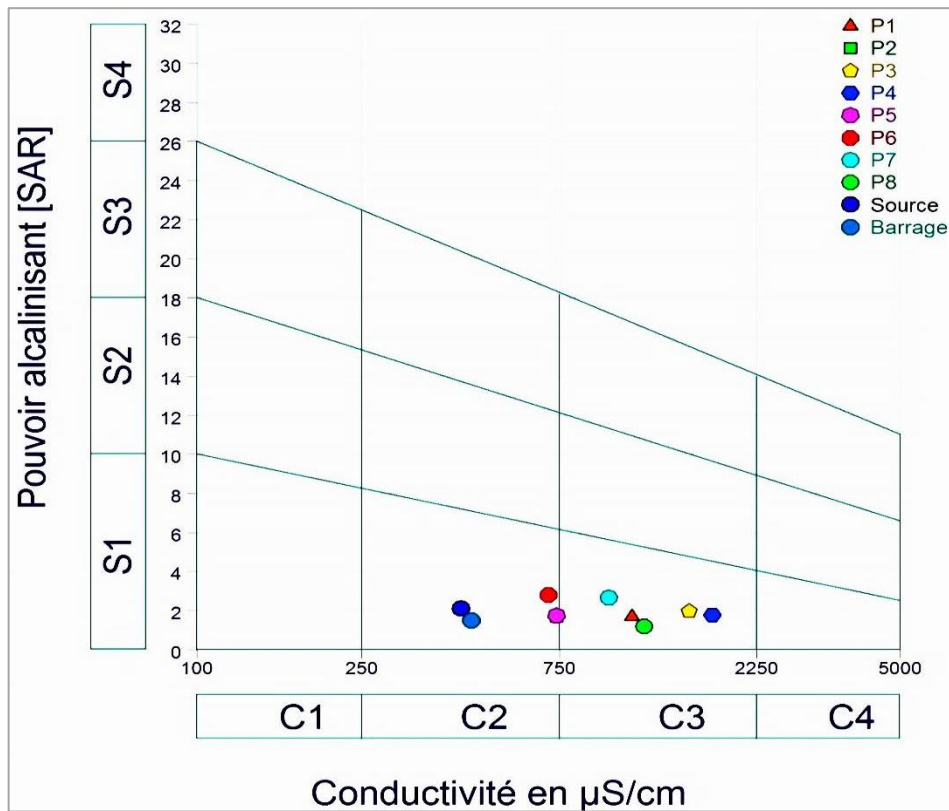


Figure.44: Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Wilcox des eaux de Yabous (Avril, 2023)



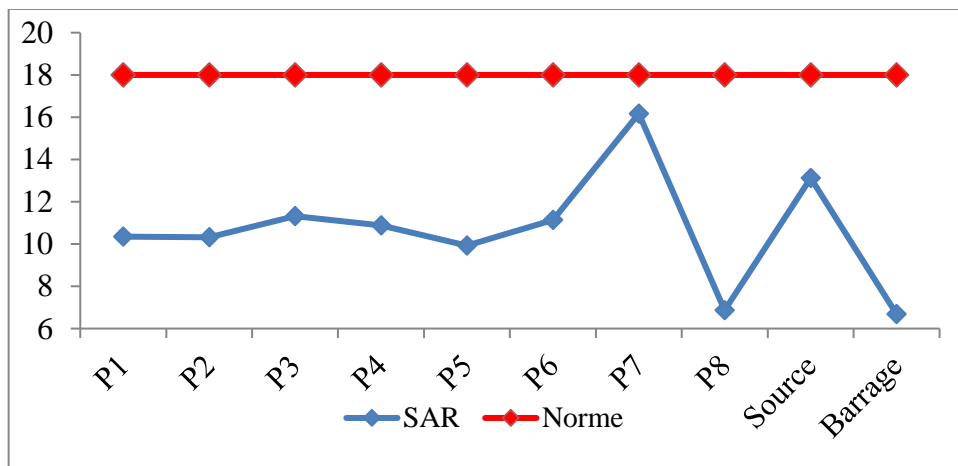
**Figure.45:** Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Riverside des eaux de Yabous (Avril, 2023)

## VI.2. Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) ou Indice d'adsorption de sodium (IAS)

Il est fonction de la conductivité électrique des ions contenus dans les eaux. Il caractérise les eaux profondes sur leur aptitude à l'irrigation. Pour la qualification des eaux en fonction du SAR d'après Gapon, 1933 in Kouamé, 2011, on note les intervalles suivant :

- SAR inférieur à 10 : le risque alcalin est faible;
- De 10 à 18 : le risque alcalin est moyen;
- De 18 à 26 : le risque alcalin est élevé;
- Au-delà de 26 : le risque alcalin est très élevé.

En nous référant à cette classification, on remarque que le risque alcalin est moyen pour toutes les eaux dans notre secteur d'étude et par conséquent toutes les eaux sont aptes à l'irrigation. Cela est en même temps prouvé par le diagramme géochimique de classification de Riverside.



**Figure.46 :** Courbe de variation des SAR calculés des eaux de la région de Yabous

### VII. Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau (SEQ-Eau)

C'est un outil pour caractériser l'état physico-chimique d'eau, utilisé par les services de l'État et les collectivités pour évaluer la qualité des eaux (de surface ou souterraines). Il est utilisé depuis le début des années 2000 par tous les acteurs de l'eau.

Le Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau permet d'évaluer la qualité de l'eau et son aptitude à assurer certaines fonctionnalités :

- maintien des équilibres biologiques
- production d'eau potable
- loisirs et sports aquatiques
- irrigation
- abreuvement des animaux
- aquaculture

Les évaluations sont réalisées en croisant plusieurs paramètres physico-chimiques regroupés en 16 indicateurs, appelés altérations<sup>2</sup>.

L'aptitude de l'eau (à la biologie ou aux usages) est évaluée, pour chaque altération, avec 5 classes d'aptitude, qui vont du bleu (aptitude très bonne) au rouge (inaptitude). Chaque classe d'aptitude est déterminée avec des grilles de seuils pour chacun des paramètres de chaque altération. Prenant en compte des normes réglementaires françaises et européennes notamment.

Pour la région de Yabous, le SAR est de l'ordre 18 et les chlorures sont compris entre 180 et 360 mg/l (Tableau.22).

## **Chapitre IV Qualité des eaux de la zone de Yabous et leur aptitude à l'irrigation**

**Tableau.22** : Grille de qualité des eaux de la région de Yabous (Avril, 2023)

|   |              |            |             |             |             |  |
|---|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|--|
| <b>Résidu sec</b>                                 | mg/l à 180°C | <b>500</b> | <b>1500</b> | <b>2500</b> | <b>3500</b> |  |
| <b>Chlorures</b>                                  | mg/l         | <b>180</b> | <b>360</b>  | <b>700</b>  |             |  |
| <b>SAR</b> <sup>1</sup> (Sodium Adsorption Ratio) | -            | <b>8</b>   | <b>18</b>   | <b>46</b>   | <b>100</b>  |  |



# **Conclusion Générale**



## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Dans le but d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de la région de Yabous et son adéquation à l'irrigation des terres agricoles sachant que la région est à vocation agricole.

Résumons-nous brièvement les résultats obtenus :

- Située au Nord Est du territoire Algérien; appartient à l'ensemble des hauts plateaux constantinois. La commune de Yabous est située au l'Ouest de la wilaya de Khenchela à distance de 60 km du chef-lieu de la wilaya, avec une superficie de 157 km<sup>2</sup>. Dans un premier temps le plan morphologique de la commune est constitué principalement de relief montagneux au Sud et des plaines au nord avec un réseau hydrographique divers et dense.
- Il ressort que la zone d'étude offre des caractéristiques spécifiques et particulières à la région montagneuse. On peut conclure les principales caractéristiques des composantes du milieu physique de la région de Yabous par une lithologie variée ( marno-calcaire, grés, calcaires et marnes).
- Selon l'indice de De Martonne ( $I=18.42$ ) et le coefficient pluviothermique d'EMBERGER ( $Q_2 = 61,78$ ), la région de Yabous est soumise à un climat semi-aride, avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec, une précipitation annuelle de l'ordre de 470.21 mm/an et une température moyenne annuelle de 15.02°C.
- Le calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite a révélé que l'ETR, et l'ETP atteignent successivement 324,86mm et 888,1 mm par an. Le ruissellement ne bénéficie également que de 9,34% et l'infiltration que de 23,48% des précipitations.
- Les analyses physico-chimiques des eaux effectuées au niveau de la région de Yabous (eau de surface et souterraine) durant la période Avril 2023 montre que :
- D'après l'interprétation des diagrammes de PIPER montre que les eaux la plus part des échantillons sont caractérisées par une dominance de faciès chloruré magnésienne et bicarbonaté calcique.
- L'étude hydrogéochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux, les analyses physico chimique des eaux effectuées au niveau de la région de Yabous (superficielle et souterraine) montrent que les eaux de la région ne sont pas polluées et la majorité des concentrations restent inférieures aux normes de potabilité au cours de la période de prélèvement.

## Conclusion générale

---

- D'autre part, la plus part des eaux analysées à l'échelle de notre zone d'étude présentent un faciès Bicarbonaté calcique et magnésienne, qui dépendent de la nature géologique.
- Les différentes corrélations des indices de saturation nous a permis de comprendre le processus de la minéralisation des eaux, cette dernière provienne de la dissolution de la roche aquifère, pour la majorité des points d'eau, les indices de saturation sont inférieures à 0, donc les eaux sont sous saturées par rapport aux minéraux carbonaté et évaporitique cela peut être expliqué par la dissolution de la roche réservoir.
- Les classifications de Richards et celle de Wilcox ont montré que 50% des points contrôlés affichaient une qualité bonne (classe C<sub>2</sub>S<sub>1</sub> : Convenable pour des plantes qui ont une tolérance aux sels (générer des problèmes pour les argiles), seulement 50% sont de qualité admissible (classe C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> ; La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérable aux sels sur des sols bien drainés.
- Selon le Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau (SEQE) qui permet d'évaluer la qualité de l'eau et son aptitude à l'irrigation et pour assurer certaines fonctionnalités, les eaux de la région de Yabous sont aptes à l'irrigation des différentes cultures où le SAR est de l'ordre 18 et les chlorures sont compris entre 180 et 360 mg/l.



*Références*  
*Bibliographiques*



### Références bibliographiques

- **A.N.B.T. (2006)** :Rapport de géologie du barrage et de la cuvette. Etude d'avant - projet détaillé du barrage de Tagharist (wilaya de Khenchela). Dar Al-Handasah, 54p.
- **Achi, Y. (2021)** :Etude géophysique par sismique réfraction du barrage de Tagharist, Wilaya de Khenchela, mémoire de master, université Tébassa, 71p.
- **Aouidane, L. (2017)** : Origines de la salinisation des eaux et des sols d'une zone à climat semi-aride : Cas de Remila (W. Khenchela), thèse de doctorat en sciences agronomiques, université Biskra, 190p.
- **Aribi, K. etLahmar, I. (2019)** :Inventaire de la flore de la région nord de Bordj Bou Arreridj (Djebel Oum El Raissan), mémoire de master, université Bordj Bou Arreridj, 34p.
- **Ariech, S. (2022)** : Caractérisation des indices Bioclimatique de la région de Biskra et leurs effets sur la croissance de la culture de palmier pattier Phoenix dactyliféra L.) Dans la Région de Biskra (Ain Debba), mémoire de master, université Biskra, 81p.
- **Babana, C. et Sebaa, H. (2018)** :Evaluation de la qualité des eaux (salinité éléments nutritifs et métaux lourds). Cas de la plaine de Mellagou. (Bouhmama-Khenchela- NE, mémoire de master, université Khenchela, 84p.
- **Badis, F. (2011)** : Etude d'impact sur l'environnement d'une décharge contrôlée dans la commune de Yabous, rapport de la direction de l'environnement, 43p.
- **Bchitou, R. (2001)** : Le suivi des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du moyen Sebou : Elaboration d'un plan d'expérience afin d'éliminer le chrome, thèse de doctorat d'Etat, Faculté des Sciences Université Mohammed V-Agdal Rabat.
- **Beldjilali, F. et Arab, A. (2018)** :Etude comparative des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux de barrage Kramis et des eaux de source naturel Ain sidi abdelkader, mémoire de master, université Mostaganem, 59p.
- **Bensalah, Y. etBenzitoune, R. (2021)** : Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines brutes dans la wilaya de Constantine, mémoire de master, université Constantine, 83p.
- **Bouaicha, F. (2009)** :Etude géophysique et hydrogéologique dans la région de Khenchela, cas de Kheirane et Taouzient, impact socio-économique, mémoire demagister en hydrogéologie, université Constantine, 216p.

## Références bibliographiques

---

- **Boulahia, A. (2016)** : L'eau d'irrigation en Algérie, mémoire de master, université Constantine, 55p.
- **Bounab, S. (2017)** : Ressources en eau et développement durable cas de la région Annaba-El Tarf (Nord-Est Algérien), thèse de doctorat en sciences, université Annaba, 205p.
- **Bourbia, H. (2018)** : Les périmètres de protection des captages d'eau souterraine dans un milieu vulnérable : la nappe des graviers de la région de Boumaiza (Skikda, Nord-Est Algérie), thèse de doctorat en sciences, université Annaba, 193p.
- **Bousid, A. et Annab, S. (2021)** : Evaluation temporelle de la qualité physico-chimique et biologique des zones humides d'Oum El Bouaghi, mémoire master, université Oum El Bouaghi, 71p.
- **Bouslah, S. (2018)** : Etude de la qualité des eaux stockées à l'amont et les eaux d'infiltration à l'aval des barrages en remblai en Algérie, thèse de doctorat en sciences, université Annaba, 188p.
- **Boutebba, C. Ferdi, I. et Meghazi, C. (2022)** : Qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau d'Oued SEYBOUSE, mémoire de master, université Guelma, 79p.
- **Castany, G. (1982)** : hydrogéologie principe et méthode, livre.
- **Chaffai et al. (2013)** : Hydrogéologie d'un système aquifère en zone semi-aride. Cas de la région de Khenchela (Algérie), article universitaire Biskra, 45p.
- **D.A.B. (2022)** : Délégation Agricole de la commune de Bouhmama.
- **D.A.Y. (2022)** : Délégation Agricole de la commune de Yabous.
- **Diallo, B. (1996)** : Analyse et contrôle de la pollution des eaux du fleuve Niger par les rejets liquides urbains et industriels du district de Bamako, mémoire DEA de Biologie, Ensup Bamako.
- **F.T.Y. (2022)** : Fiche Technique de la commune de Yabous.
- **Gaagai, A. (2017)** : Etude de l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Babar (Sud-Est Algérien) et l'impact de la rupture de la digue sur l'environnement, thèse de doctorat en sciences, université Batna, 207p.
- **Halimi, S. (2016)** : Evaluation de l'impact du trafic routier sur les aquifères des régions traversées (Application à la plaine d'Annaba (RN44, RN21 et RN16) Nord Est Algérien), thèse de doctorat en hydrologie, faculté des sciences de la terre, université d'Annaba, 153p.

## Références bibliographiques

---

- **Hasnaoui, R. et Ben Amara, C. (2019)** : Enquêtes hydro chimiques sur la qualité des eaux souterraines à boire et à des fins d'irrigation (région de Khenchela), mémoire de master, université Khenchela, 86p.
- **Kerdoud, A. (2017)** : Vulnérabilité à la pollution des eaux de la plaine alluviale d'oued Nil Wilaya de Jijel (N.E.Algérien), mémoire de master Académique en Géologie, université Jijel, 95p.
- **Khelifa, K. (2021)** :Etat de la qualité des eaux dans la région de Berrahal.Apports des nouvelles analyses physico-chimiques et métaux lourds (N-E Algérie), thèse doctorat LMD en Hydrogéologie, université Annaba, 166p.
- **Latifi, S. (2018)** :Etude de la vulnérabilité des nappes aquifères de la région de Guelma et évaluation du rôle des STEP dans la protection des eaux, thèse de doctorat en sciences, université Annaba, 118p.
- **Lemouchi, O. etKolli, F. (2020)** :Contribution à l'Etude climatique et bioclimatique de barrage chaffia dans la wilaya El Tarf, mémoire de master, université Annaba, 45p.
- **Makhoukh, M. (2011)**:Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya. Maroc 2011.
- **Mourdi, M. et Rekhili, O. (2022)** : Contribution à l'évaluation de la qualité physico - chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées au niveau de la station d'Azzaba (wilaya de Skikda), mémoire de master, université Constantine, 49p.
- **Oueldjaoui, M. (2022)**: Caractérisation et fonctionnement géochimique des eaux de sebkha ElMahmel. Thèse de doctorat LMD en Ecologie et Environnement, université de Khenchela. 155p.
- **Ounissi, R. et Ounissi, k. (2022)** :Aptitude des eaux du barrage de Babar (W.Khenchela) à l'irrigation, mémoire de master, université Khenchela, 71p.
- **Rondeau, B. (2005)** :La qualité de l'eau du secteur fluvial-la contamination par les toxique 2<sup>ème</sup> édition. Environnement canada-région du Québec et ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec., 2000. Fiche d'information de la collection, saint laurent, ISBN 0-662-88163-X, En4-20/2002F.
- **Rouabhia,K. et Djabri, L.(2010)** :Geochemicalcharacterization of groundwaterfromshallowaquifer surround dinfezara lake.NE Algeria, Arab.jgeosciences, doi :10.1007/s12517-010-0202-6.
- **Roudier, J. (2005)** : L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaire, Eau de mer 8<sup>ème</sup> édition : Dunod, Paris.

## Références bibliographiques

---

- **Rouibi, I. et Bouazizi, H. (2015) :** Étude de la qualité des eaux du bassin versant Tagharist (Yabous, wilaya de Khenchela), mémoire de master, université Khenchela, 56p.
- **Salhi, M. et Ounassi, M. (2022) :** La géologie général de la wilaya de Khenchela (ville de kais), journal of cognitive issues, 395p.
- **Saoudi, A. (2017) :** Spécificités géologiques et hydrogéologiques de la région des lacs et de la plaine de Remila et son impact sur le tracé routier Oum el Bouaghi – Khenchela, mémoire de master, université Oum El Bouaghi, 87p.
- **Sedrati, N. (2011) :** Origine et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra Sud-Est Algérien, thèse de doctorat en sciences, université Annaba, 155p.
- **Staifi, L. (2017) :** Modélisation hydrogéologique de la plaine de Rémila-Khenchela, mémoire de magister en géologie, université Oran, 125p.
- **Tardat *etal.* (1984) :** Chimie des eaux, Ed. Le griffon d'argile, INC, Québec.
- **Todd, K.(1980):** Grounwater hydrology. Seconde edition. New York, J.Wiley&Sons, 510p.
- **Vayana, D. (2009) :** Etudes de données physico-chimiques des eaux du secteur Nord du Piton des Neiges Ile de La Réunion.
- **Ziani, D. (2017) :** Quantification de la pollution anthropique des eaux souterraines de l'aquifère de AIN DJASSER.EstAlgérien, thèse de doctorat en sciences, université Batna, 151p.

