

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبو بكر بلقايد- تلمسان  
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM  
كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et des Sciences de la Terre et de l'Univers  
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.

*Laboratoire N°25 : « Promotion des ressources hydriques, minières et pédologiques :  
législation de l'environnement et choix technologique ».*



## MÉMOIRE

Présenté par :

***Khaldi Mounia & Kerdouci Hadjer***

*En vue de l'obtention du*

**Diplôme de MASTER**

En Hydrogéologie.

**Thème**

**CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX DE GHAR BOUMAAZA, TLEMCEM  
(NORD-OUEST ALGERIEN).**

Soutenu le juin 2025, devant le jury composé de :

Présidente	Mme DJELAD.R	M.A.A	Université de Tlemcen.
Encadrant	Mme GUETTAIA.S	M.C. A	Université de Tlemcen.
Co-Encadrant	Mr BOUDJEMA.A	M.C. A	Université de Tlemcen.
Examineur	Mr BENCHAI.B	M.C. B	Université de Tlemcen.

**Année universitaire 2024 /2025.**

## **REMERCIEMENTS.**

*Nous remercions « ALLAH » pour la volonté, la puissance, la santé et la patience qu'il nous a données pour terminer ce travail.*

*Nous tenons en premier lieu à remercier Mme **GUETTAIA.S** et Mr **BOUDJEMA.A** qui nous ont encadré et aidé, lors de la réalisation de ce travail, leur patience, leur disponibilité et surtout leurs conseils judicieux et critiques, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Un grand merci aux membres du jury :*

*- Mme **DJELAD.R** et Mr **BENCHAIB.A.***

*Nous remercions également toute l'équipe pédagogique du département des sciences et la terre et de l'univers de l'université de Tlemcen ainsi que l'équipe du laboratoire de l'ADE pour leur aide, collaboration, et conseils et qui ont partagé avec nous leurs connaissances et expériences professionnelles durant la période du stage. En fin, nous remercions nos parents et amis pour leur soutien constant et leurs encouragements.*

# DÉDICACE

*Tout d'abord, je remercie mon Dieu pour Tout-Puissant, Source de toute sagesse, de toute force et de toute inspiration. C'est par Sa grâce que j'ai pu franchir chaque étape de ce parcours, surmonter les difficultés et aller jusqu'au bout de ce mémoire.*

*Je dédie ce Modest travail à :*

*Monsieur **Boudjama Abderrezak** et Madame **Guettaia sabrine**, dont l'accompagnement bienveillant, les conseils avisés et la rigueur intellectuelle ont été déterminants dans la réalisation de ce travail.*

*À mes professeurs, pour leur enseignement et leur disponibilité.*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel et ses prières silencieuses.*

*À mon père, pour ses conseils et sa force.*

*À mon frère et ma sœur, pour leur soutien constant.*

*À mon binôme : **Kerdouci Hadjer**, pour ta patience, ton écoute et ton soutien moral pendant les moments de doute. Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans toi.*

*À mes collègues de promotion, pour les échanges enrichissants, les moments de stress partagés, et les rires salvateurs.*

*Mounia*

## DÉDICACE :

*Alhamdolillah, qui m'a accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires pour accomplir ce travail.*

*A ma mère qui a toujours été mon port d'attachement et ma boussole ; tu as été la lumière qui a éclairé mon chemin dans les moments sombre ; merci pour ton amour inconditionnel.*

*A mon père qui m'a appris l'importance du travail acharné. Tu m'as inspiré à viser plus haut et à poursuivre mes rêves. Je te suis infiniment reconnaissante pour ton soutien indéfectible, ta confiance en moi et ton amour. J'espère que tu es fier de moi*

*A mon frère Mohammed et ma sœur Dounia sont aussi mes chers et meilleurs amis, merci de votre présence réconfortante, votre encouragement. Vous êtes ma source de joie et de bonheur, je suis fière de vous avoir dans ma vie.*

*A mon mari Noureddine merci du fond du cœur de votre soutien et de motivation pour finir cette étape dans ma vie, tu es ma source de force.*

*Enfin, à mon binôme Khaldi Mounia merci pour notre collaboration fructueuse et notre amitié, tu as été une source d'inspiration et de motivation pour moi tout au long de ce parcours.*

*Hadjer*

## ملخص

(مساهمة في الدراسة الهيدروكيميائية لمياه غار بومعزة، تلمسان (شمال غرب الجزائر))

. يهدف هذا العمل إلى تحديد أصل تمعدن مياه غار بومعزة.

ووفقاً لتفسيرات التحاليل الفيزيائية والكيميائية، تتوافق جميع المعايير مع المعايير الجزائرية لمياه الشرب. ومن خلال تطبيق العناصر الكيميائية على مخططات شولر وبركالوف وستابلر، تم التمييز بين نوعين من المياه: سحنة بيكربونات الكالسيوم وسحنة بيكربونات المغنيسيوم. علاوة على ذلك، يشير مخطط باير إلى أن مياه غار بومعزة تنقسم إلى فئتين: بيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم، وكلوريد وكبريتات الكالسيوم والمغنيسيوم. واستناداً إلى مؤشر الصوديوم والكروم، تتراوح جودة مياه غار بومعزة بين جيدة وجيدة جداً للاستخدام في الري. يُظهر مخطط ويلكوكس أن مياه غار بومعزة ذات جودة عالية جداً للري، بينما يُشير مخطط ريفرسايد إلى نوعين من المياه: أحدهما صالح للري (C2-S1) والآخر مقبول (C3-S1).

تُظهر دراسة طبقة المياه الجوفية في غار بومعزة أنها مستقرة بشكل عام، باستثناء بعض العناصر مثل الكبريتات والبوتاسيوم والصوديوم، والتي تتأثر بالأنشطة البشرية. وبالتالي، يُوضح التحليل الإحصائي أن بعض المعادن، مثل الأنهيدريت، لا تذوب في الماء، بينما يختلف البعض الآخر حسب الظروف. تعكس العلاقات بين بعض العناصر (مثل الكالسيوم والبيكربونات، أو البوتاسيوم والكلوريدات) التأثيرات الطبيعية والبشرية. الكلمات المفتاحية: غار بومعزة، تلمسان، التمعدن، المعايير الفيزيائية والكيميائية، المعايير الجزائرية، الرسوم البيانية، إكسلستات.

## RESUME :

### *(CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX DE GHAR BOUMAAZA, TLEMCEN (NORD-OUEST ALGERIEN)).*

Le but de ce travail est de déterminer l'origine de minéralisation des eaux de Ghar Boumaâza.

D'après les interprétations des analyses physico-chimiques, tous les paramètres sont conformes à la norme algérienne de potabilité.

L'application des éléments chimiques sur les diagrammes de Schoeler Berkaloff et Stabler nous a conduits à distinguer deux types d'eaux : **le faciès bicarbonaté calcique et le faciès bicarbonaté magnésien**, par ailleurs le diagramme de piper indique que les eaux de Ghar Boumaaza se répartissent en deux familles : **bicarbonaté calcique et magnésien et chloruré et sulfaté calcique et magnésien**.

D'après le pourcentage de Na % et l'indice de Kr, les résultats des eaux de Ghar Boumaaza sont bons à très bonne pour l'usage en irrigation ; tel que le diagramme de Wilcox montre que l'eau de Ghar Boumaâza est de **très bonne qualité pour l'irrigation** et le diagramme de Riverside indique deux types d'eau : l'un **bon pour l'irrigation** (C2-S1) et l'autre **acceptable** (C3-S1).

L'étude de l'aquifère de Ghar Boumaâza montre est globalement stable, sauf pour certains éléments comme les sulfates, le potassium et le sodium, influencés par les activités humaines ; ainsi l'analyse statistique explique que certains minéraux, comme l'anhydrite, ne sont pas dissous dans l'eau, tandis que d'autres, varient selon les conditions. Les liens entre certains éléments (comme calcium et bicarbonates, ou potassium et chlorures) montrent à la fois des influences naturelles et humaines.

Mots clés : Ghar Bomaâza, Tlemcen, minéralisation, paramètres physico-chimiques, normes algériennes, Diagrammes, Xlstat.

# **ABSTRACT :**

## **(CONTRIBUTION TO THE HYDROCHEMICAL STUDY OF THE WATERS OF GHAR BOUMAAZA, TLEMCEN (NORTHWESTERN ALGERIA)).**

The aim of this work is to determine the origin of the mineralization of the waters of Ghar Boumaâza.

According to the interpretations of the physicochemical analyses, all parameters comply with the Algerian standard for drinking water.

The application of chemical elements to the Schoeler, Berkaloff, and Stabler diagrams led us to distinguish two types of water: the calcium bicarbonate facies and the magnesium bicarbonate facies. Furthermore, the Piper diagram indicates that the waters of Ghar Boumaâza are divided into two families: calcium and magnesium bicarbonate, and calcium and magnesium chloride and sulfate.

Based on the Na% and Kr index, the water quality of GharBoumaaza is good to very good for irrigation use; the Wilcox plot shows that GharBoumaaza's water is of very good quality for irrigation, and the Riverside plot indicates two types of water: one good for irrigation (C2-S1) and the other acceptable (C3-S1).

The study of the GharBoumaaza aquifer shows that it is generally stable, except for certain elements such as sulfates, potassium, and sodium, which are influenced by human activities. Statistical analysis thus explains that some minerals, such as anhydrite, are not dissolved in the water, while others vary depending on the conditions. The relationships between certain elements (such as calcium and bicarbonates, or potassium and chlorides) reflect both natural and human influences.

Keywords:GharBomaâza, Tlemcen, mineralization, physicochemical parameters, Algerian standards, Diagrams, Xlstat.

## **LISTE DES ABREVIATIONS :**

**P** : Précipitations.

**T** : Températures.

**BI** : Balance Ionique.

**Meq/L** : Milliéquivalent par litre.

**r** : Quantité en réaction.

**CE** : Conductivité électrique.

**Ca<sup>2+</sup>** : Ion Calcium.

**Mg<sup>2+</sup>**: Ion Magnesium.

**Na<sup>+</sup>**: Ion Sodium.

**K<sup>+</sup>** : Ion Potassium.

**Cl<sup>-</sup>** : Ion Chlorure.

**HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Ion Bicarbonate.

**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** : Ion Sulfate.

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Ion Nitrate.

**PH** : Potentiel d'Hydrogène.

**TH** : Titre Hydrotimétrique.

**KR** : Indice de Kelly's Ratio.

**%Na<sup>+</sup>** : Pourcentage de Sodium.

**SAR** : Sodium Alcalinité Ratio

# LISTE DES FIGURES.

## **Chapitre I : Généralités sur le karst et situation géographique de la zone d'étude.**

Figure. I. 1 : Représentation du système karstique avec les différents éléments de sa structure. ....	7
Figure. I. 2 : Bloc de diagramme représentant un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999). .....	8
Figure. I. 3 : Les différentes configurations du karst, selon la nature de l'impluvium et la position du drain principal par rapport à l'exutoire (Marsaud, 1996). .....	9
Figure. I. 4 : Modèle conceptuel du karst noyé (Marsaud, 1996). .....	10
Figure. I. 5: Schéma représentatif des zones karstiques (Mangin, 1975). .....	11
Figure. I. 6: Situation géographique de la grotte de Ghar Boumaâza .....	12

## **Chapitre II : Hydro- Climatologie de Ghar Boumaâza.**

Figure. II. 1: Variation des débits du système karstique de Ghar Boumaâza. ....	15
Figure. II. 2: Variation des précipitations moyennes annuelles (1995-2024). ....	18
Figure. II. 3: Variation des précipitations moyennes mensuelles (1995-2024). .....	19
Figure. II. 4: Variation des précipitations saisonnières. ....	20
Figure. II. 5: Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales. ....	21
Figure. II. 6 : Diagramme pluviothermique de Bagnols et Gausson .....	22
Figure. II. 7 : Abaque de l'indice d'aridité annuel. ....	24
Figure. II. 8: climagramme d'emberger (station sebdou). .....	26
Figure. II. 9: Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT). ....	28
Figure. II. 10: Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (P. VERDEIL, 1988). ...	29

## **Chapitre III : Contexte géo-structural et synthèse hydrogéologique.**

Figure. III. 1: Carte géologique de Ghar Boumaâza (extraite de la carte géologique de l'Algérie au 1/50 000) (Bensaoula.F, 2006). ....	34
Figure. III. 2 Log litho-stratigraphique synthétique de la région étudiée .....	35
Figure. III. 3: Coupe géologique à travers le Djebel Bouchiba- plateau de Merchiche. ....	38
Figure. III. 4: la source « Ain Taga ». ....	40
Figure. III. 5: la source « Hassi El Kelb » .....	40
Figure. III. 6: Coupe à travers la cuvette synclinale de Merchiche (Collignon.B, 1986). ....	42

## **Chapitre IV : Hydrochimie.**

## Partie I : Les listes des figures de Ghar Boumaaza.

Figure. IV. 1 : Variation temporelle du PH.....	46
Figure. IV. 2 : Variation temporelle des conductivités électriques.....	47
Figure. IV. 3 : Variation temporelle du calcium.....	49
Figure. IV. 4 : Variation temporelle du Magnésium.....	50
Figure. IV. 5 : Variation temporelle du Sodium.....	50
Figure. IV. 6 : Variation temporelle du Potassium.....	51
Figure. IV. 7 : Variation temporelle des Chlorures.....	52
Figure. IV. 8 : Variation temporelle de Sulfate.....	52
Figure. IV. 9 : Variation temporelle des Nitrates.....	53
Figure. IV. 10 : Variation temporelle des Bicarbonates.....	54
Figure. IV. 11 (A, B, C) : Classification des eaux, selon Schoeller-Berkaloff.....	59
Figure. IV. 12 (A, B, C) : Diagramme de Stabler.....	62
Figure. IV. 13 (A, B, C) : Diagramme de piper.....	65
Figure. IV. 14 (A, B, C) : Diagramme de Wilcos.....	69
Figure. IV. 15 (A, B, C) : Diagramme de Riverside.....	72
Figure. IV. 16: graphe d'indice de saturation.....	75

## Partie I : Les listes des figures de A.Tagga.

Figure. IV. 17: variation temporelle de PH.....	79
Figure. IV. 18: Variation temporelle de Conductivités électriques.....	80
Figure. IV. 19: Variation temporelle du Calcium.....	83
Figure. IV. 20: Variation temporelle du Magnésium.....	83
Figure. IV. 21: Variation temporelle du Sodium.....	83
Figure. IV. 22: Variation temporelle du Potassium.....	84
Figure. IV. 23: Variation temporelle du Chlorure.....	85
Figure. IV. 24: Variation temporelle du sulfate.....	86
Figure. IV. 25: Variation temporelle du nitrate.....	87
Figure. IV. 26: Variation temporelle des Bicarbonate.....	87
Figure. IV. 27: Diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	88
Figure. IV. 28: Diagramme de Stabler.....	89
Figure. IV. 29: Diagramme de Piper.....	90
Figure. IV. 30: Diagramme de Wilcox.....	93
Figure. IV. 31: Diagramme de Riverside.....	94

# LISTE DES TABLEAUX.

## Chapitre II : Hydro- Climatologie de Ghar Boumaâza.

Tableau. II. 1: les coordonnées géographiques de la station de Sebdu. ....	16
Tableau. II. 2 : Précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station de Sebdu (1995-2024). .....	17
Tableau. II. 3: Précipitations moyennes mensuelles (1995-2024). ....	18
Tableau. II. 4 : Précipitations saisonnières.....	19
Tableau. II. 5 : Valeurs des températures mensuelles moyennes, maximales et minimales. ....	20
Tableau. II. 6 : Précipitations et Températures moyennes mensuelles.....	22
Tableau. II. 7: Indice d'aridité de DE Martonne. ....	23
Tableau. II. 8 : Classification de DE Martonne.....	23
Tableau. II. 9 : Indices d'aridité mensuels de DE Martonne.....	24
Tableau. II. 10: Indice d'Emberger. ....	25
Tableau. II. 11 : Calcul de l'ETR par la méthode de Turc. ....	27
Tableau. II. 12 : Valeur du déficit d'écoulement (d'après Wundt).....	28
Tableau. II. 13: Valeur du déficit d'écoulement (d'après P. VERDEIL).....	29
Tableau. II. 14: Valeurs de l'ETP corrigée à la station Sebdu (1995-2024). ....	30
Tableau. II. 15 : Calcul du bilan hydrologique de la station de Sebdu (1995-2024), selon C.W THornthwaite. ....	31

## Chapitre III : Contexte géo-structural et synthèse hydrogéologique.

Tableau. III. 1 : caractéristique hydrogéologique des formations ..... **Erreur ! Signet non défini.**

## Chapitre IV : Hydrochimie.

Tableau. IV. 1: Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier.J, 2009). ....	48
Tableau. IV. 2 : Calcul de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier .J, 2009). ....	48
Tableau. IV. 3: Classification des eaux en fonction du titre hydrotimétrique.....	49
Tableau. IV. 4 : classification des eaux d'irrigation selon le %Na <sup>+</sup> .....	64
Tableau. IV. 5: coefficient de variation.....	72
Tableau. IV. 6 : corrélation entre les éléments chimiques majeurs.....	74
Tableau. IV. 7 : pourcentage de factures cumulées.....	74
Tableau. IV. 8 : contributions des variables.....	75
Tableau IV. 9 : Minéralisation et classification des eaux.....	83
Tableau IV. 10 : Valeurs et classifications de la dureté totale .....	84
Tableau IV.11 : Classification des eaux de la source d'Ain Taga selon l'indice de KR.....	88
Tableau IV. 12 : Pourcentage de sodium et classification des eaux d'Ain Taga.....	89
Tableau IV. 13 : Analyse bactériologique de la source d'Ain Taga (27 Avril 2025).....	92
Tableau IV. 14 : Comparaison des caractéristiques physico-chimiques des eaux de Ghar Boumaâza et la source d'Ain Taga.....	95

# TABLE DES MATIERES.

LISTE DES ABREVIATION

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
chapitre I: généralités sur les karsts et la situation géographique de la zone d'étude.....	5
1. Généralités sur le Karst : .....	6
1.1. Définitions : .....	6
1.2. La karstification : .....	7
1.3. La morphologie karstique : .....	8
1.4. Structure et fonctionnements : .....	8
2. Situation géographique de la zone d'étude : .....	11
2.1. Description de la zone d'étude : .....	12
2.2. Formation de la grotte : .....	13
chapitre II : hydro- climatologie de ghar boumaaza.....	14
1. Aperçu historique sur l'Hydrologie de la grotte : .....	15
2. Etude climatologique : .....	16
2.1. Introduction : .....	16
2.2. Etude des paramètres climatologiques : .....	16
2.2.1. Les précipitations : .....	16
a) Précipitations moyennes annuelles : .....	16
b) Précipitations moyennes mensuelles : .....	18
c) Précipitations saisonnières : .....	19
2.2.2. Les Températures : .....	20
a) Les températures moyennes, maximales et minimales : .....	20
2.2.3. L'étude du climat : .....	21
a) Méthode graphique : .....	21
<input type="checkbox"/> Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussens : .....	21
b) Les indices climatiques : .....	22
<input type="checkbox"/> L'indice d'aridité de DE Martonne (1923) : .....	22
i. L'indice d'aridité annuelle : .....	23
ii. L'indice d'aridité mensuel : .....	24
<input type="checkbox"/> Climagramme d'EMBERGER : .....	25
i. L'indice de Stewart (1969) : .....	26
2.2.4. Le bilan hydrologique : .....	27
a) Evapotranspiration et déficit d'écoulement : .....	27
<input type="checkbox"/> Evapotranspiration réelle (ETR) : .....	27
<input type="checkbox"/> Méthode de TURC (1954) : .....	27
<input type="checkbox"/> Méthode de COUTAGNE : .....	27
<input type="checkbox"/> Méthode de WUNDT : .....	28
<input type="checkbox"/> Méthode de P. VERDEIL : .....	29
<input type="checkbox"/> Evapotranspiration potentielle (ETP).....	30
<input type="checkbox"/> Méthode de THORNTHWAITE : .....	30
b) Calcule de la réserve en eau du sol : .....	30
<input type="checkbox"/> Calcule de la réserve facilement utilisable (R.E.U) : .....	30

Conclusion :	31
Chapitre III : Contexte géo-structural et synthèse hydrogéologique.....	33
1. Contexte géo-structural du secteur d'étude :	34
1.1. Synthèse géologique :	34
a) Les Dolomies de Terni (Tithonien inférieur) :	35
b) Les marno-calcaires de Hariga (Tithonien inférieur).....	36
c) Les grès de Merchiche (Tithonien supérieur):	36
d) Les marno-calcaires d'Ouled Mimoun (Tithonien supérieur-Berriasien inférieur):	36
1.2. Synthèse structurale :	38
1.2.1. Les phases tectoniques :	38
□ Une phase intensive Eo-Crétacée (fin Crétacé-Eocène) :	39
□ Une phase atlasique (fin Eocène - Oligocène) :	39
□ Une phase à dominance intensive :	39
□ Une phase récente (Plio-Quaternaire) :	39
2. Contexte hydrogéologique :	39
2.1. Propriétés hydrogéologiques des formations :	40
a) Dolomies de Terni :	40
b) Les grès de Merchiche :	41
c) Marno- calcaire de Hariga et d'Ouled Mimoun :	41
Conclusion :	42
Chapitre IV : Hydrochimie.....	44
Introduction :	45
A. L'hydrochimie de Ghar Boumaaza (partie 01) :	45
1. Balance Ionique :	45
2. Etude des paramètres physico-chimiques :	45
2.1 Les paramètres physiques :	46
2.1.1. Le potentiel d'hydrogène PH :	46
2.1.2. La conductivité électrique :	47
2.1.3. La minéralisation :	47
2.1.4. La dureté totale (TH) :	48
2.2. Les paramètres chimiques :	49
2.2.1. Les cations :	49
a) L'ion calcium ( $Ca^{2+}$ ) :	49
b) L'ion magnésium ( $Mg^{2+}$ ) :	49
c) L'ion sodium ( $Na^+$ ) :	50
d) L'ion potassium( $K^+$ ) :	50
2.2.2. Les anions :	51
a) L'ion chlorure ( $Cl^-$ ) :	51
b) L'ion sulfate ( $SO_4^{2-}$ ) :	52
c) L'ion nitrate ( $NO_3^-$ ) :	53
d) L'ion Bicarbonate ( $HCO_3^-$ ) :	53
3. Classifications des eaux :	54
□ Diagramme de Schoeller-Berkaloff :	54
□ Diagramme logarithmique de Stabler :	57
□ Diagramme de Piper :	60
4. Aptitude des eaux destinées à l'irrigation :	63
4.1. Indice de Kelly's Ratio :	63
4.2. Pourcentage en sodium $\%Na^+$ :	64
4.3. Classification de Wilcox :	64
4.4. Sodium Alcalinity Ratio (SAR) :	67
5. L'origine de la minéralisation :	71
a) Indice de saturation :	72

b)	L'analyse corrélatoire :.....	73
c)	Analyse factorielle : .....	74
B.	L'hydrochimie de la source d'Ain Taga : .....	75
1.	Balance Ionique :.....	75
2.	Etude des paramètres physico-chimiques : .....	76
2.1.	Les paramètres physiques : .....	76
2.1.1.	Le potentiel d'Hydrogène pH :.....	76
2.1.2.	La conductivité électrique : .....	77
2.1.3.	La Minéralisation : .....	77
2.1.4.	La dureté totale (TH) :.....	78
2.2.	Les paramètres chimiques : .....	80
2.2.1.	Les cations :.....	80
a)	L'ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) :.....	80
b)	L'ion de magnésium :.....	80
c)	L'ion sodium .....	81
d)	L'ion potassium( $\text{K}^{+}$ ) :.....	82
2.2.2.	Les anions :.....	82
a)	L'ion chlorure ( $\text{Cl}^{-}$ ) : .....	83
b)	L'ion sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) :.....	83
c)	L'ion nitrate ( $\text{NO}_3^{-}$ ) :.....	84
d)	L'ion Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^{-}$ ) :.....	84
3.	Classifications des eaux : .....	85
<input type="checkbox"/>	Diagramme de Schoeller-Berkaloff : .....	85
<input type="checkbox"/>	Diagramme logarithmique de Stabler: .....	85
<input type="checkbox"/>	Diagramme de Piper :.....	86
4.	Aptitude des eaux destinées à l'irrigation : .....	87
4.1.	Indice de Kelly's Ratio :.....	87
4.2.	Pourcentage en sodium $\% \text{Na}^{+}$ :.....	88
4.3.	Classification de Wilcox : .....	89
4.4.	Sodium Alkalinity Ratio (SAR): .....	90
5.	Interprétation des analyses bactériologiques :.....	91
5.1.	Recherche et dénombrement des coliformes totaux :.....	91
5.2.	Recherche et dénombrement des coliformes fécaux : .....	92
5.3.	Recherche d'espèce des Escherichia Coli : .....	92
5.4.	Recherche et dénombrement des streptocoques fécaux : .....	92
C.	Comparaison des caractéristiques physico-chimiques des eaux de Ghar Boumaâza et celles de la source d'Ain Taga : .....	93
	Conclusion générale .....	96
	.....	



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## INTRODUCTION GENERALE.

Le rôle crucial de l'eau en tant que vecteur de vie et facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnu. Il est donc essentiel de la préserver et de la gérer.

Les aquifères karstiques sont difficiles à étudier, en raison de leurs caractéristiques uniques. Cela s'explique par le fait que la karstification est un processus évolutif qui transforme un aquifère carbonaté fissuré en un aquifère karstique complexe, doté de systèmes d'écoulement d'eau et de formes endogènes et exogènes.

Les Monts de Tlemcen, dans l'Ouest de l'Algérie, sont un excellent exemple de ce type de région, étant l'une des zones calcaires les mieux arrosées où l'interaction entre l'eau et la roche carbonatée a sculpté un paysage ruiniforme distinctif.

Pour mieux comprendre le fonctionnement et la structure complexes du système karstique de Ghar Boumaaâza, une série d'analyses physico-chimiques a été analysée, afin de déterminer l'origine de minéralisation de ses eaux.

Cette étude est répartie en quatre chapitres :

- **Chapitre 1 : Généralité sur le karst et situation géographique de la zone d'étude.**

Il est divisé en 2 parties :

- ❖ Partie 1 : généralités sur le karst, sa structure et sa morphologie.
- ❖ Partie 2 : Situation géographique et description de la zone étudiée.
- **Chapitre 02 : Etude climatologique de Ghar Boumaaâza** : Pour identifier le type du climat qui règne dans la région d'étude.
- **Chapitre 03 : Contexte géo-structurale et synthèse hydrogéologique** : pour décrire les différentes formations géologiques existantes, l'analyse structurale, puis l'identification des formations qui peuvent être aquifères

- **Chapitre 04 : Hydrochimie** : Dans cette partie, sera déterminée la qualité physico-chimique des eaux de Ghar Boumaâza ainsi que les faciès, l'aptitude des eaux pour l'irrigation, et l'origine de leur minéralisation.
- Une **Conclusion générale** sera donnée à la fin pour citer les différents résultats obtenus, en fonction des données disponibles.



**chapitre I: généralités sur les karsts et  
la situation géographique de la zone  
d'étude.**

## **1. Généralités sur le Karst :**

### **1.1. Définitions :**

L'origine du mot karst est allemand et provient de la dénomination géographique d'une région s'étendant de Trieste en Italie, jusqu'au Mont Sněžka à l'Est, en Slovaquie ; Cette région était souvent étendue à une région située plus au Nord, le karst de la Carniole jusqu'à Ljubljana, avec la célèbre grotte de Postojna, Adelsberg (Cvijic, 1960).

Il existe plusieurs définitions sur le karst. La définition proposée par Bakalowicz (1999) : « le karst est l'ensemble de formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution de roches carbonatées (calcaires, dolomies) par l'eau rendue acide par le dioxyde de carbone ; par extension, l'ensemble de formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite) ».

Les formes de surface et souterraines qui ont organisé les écoulements pour constituer les unités de drainage, on les appelle « système karstique ». L'eau de pluie qui se charge par le gaz carbonique s'infiltré dans les fractures de la roche, sous l'effet de gradient hydraulique et en parallèle, elle va élargir ces fissures pendant la circulation, ce phénomène permet de transformer ces fissures progressivement en conduits. Ces derniers sont organisés sous forme de réseaux pour drainer les eaux, depuis la surface jusqu'à une source unique, telles que les zones de stockages connectées des réseaux de conduits qui sont situés dans la zone saturée. Le résultat final exprimé par une hétérogénéité considérable avec un ensemble des vides déterminés par les écoulements souterrains (Figure. I. 1).

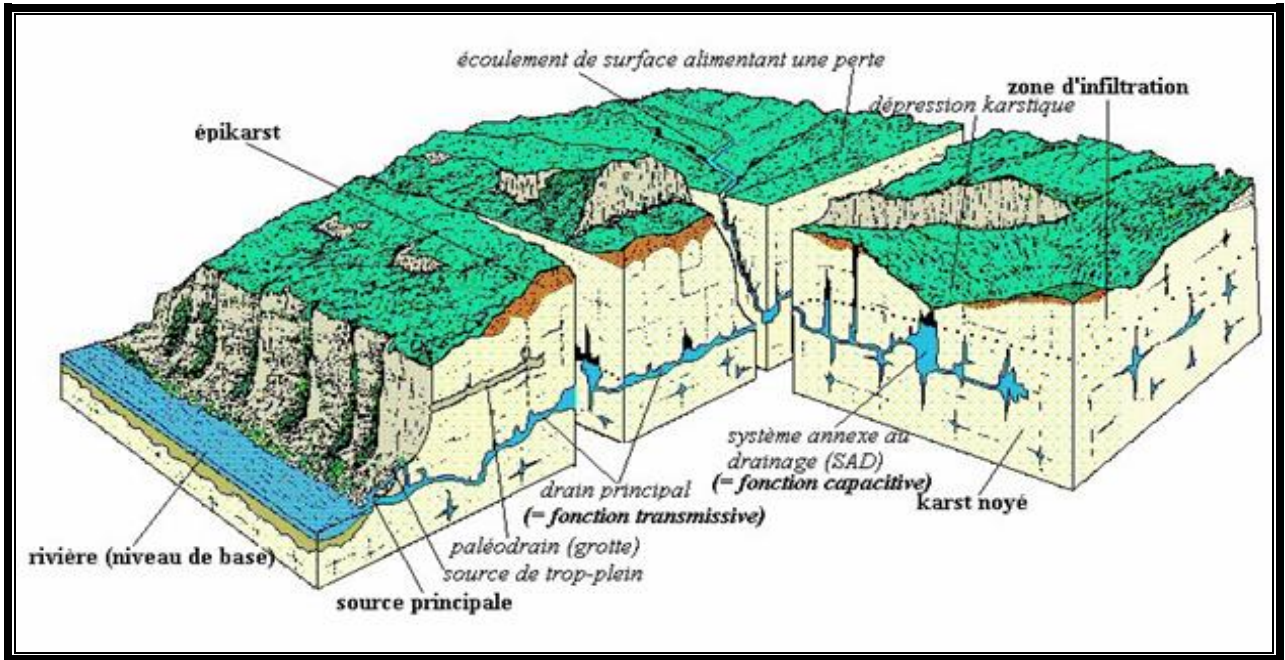


Figure. I. 2 : Représentation du système karstique avec les différents éléments de sa structure. (Mangin, 1975).

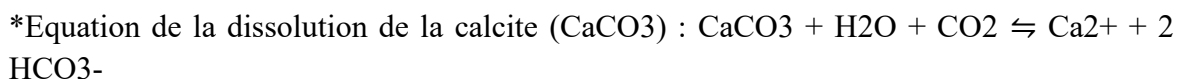
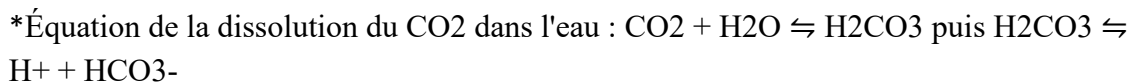
## 1.2. La karstification :

La karstification passe par deux notions majeures : la présence d'une roche soluble et sa dissolution qui conduit à des formes particulières et reconnaissables d'un site à l'autre.

### ➤ Principe de la karstification :

L'influence d'eau non acide et l'érosion mécanique ne sont pas suffisantes pour l'explication des formes karstiques. La dissolution des roches carbonatées se fait par l'interaction entre la roche, l'eau et l'air.

L'équation de la dissolution de la roche calcaire par l'eau chargée en gaz carbonique est la suivante :



Ce phénomène va élargir les vides pendant la circulation des eaux, en fonction des parois et les agrandir jusqu'à création des chenaux qui facilitent l'infiltration.

### 1.3. La morphologie karstique :

Une grande diversité morphologique et hydrographique dans les différentes régions karstiques existe. Certaines formes karstiques sont très développées par rapport à d'autres. Plusieurs facteurs influencent sur la morphologie du karst, tels que la composition chimique de la roche et le climat, sa couverture, ses dimensions, la tectonique de la région, la présence et l'épaisseur de couches imperméables intercalées.

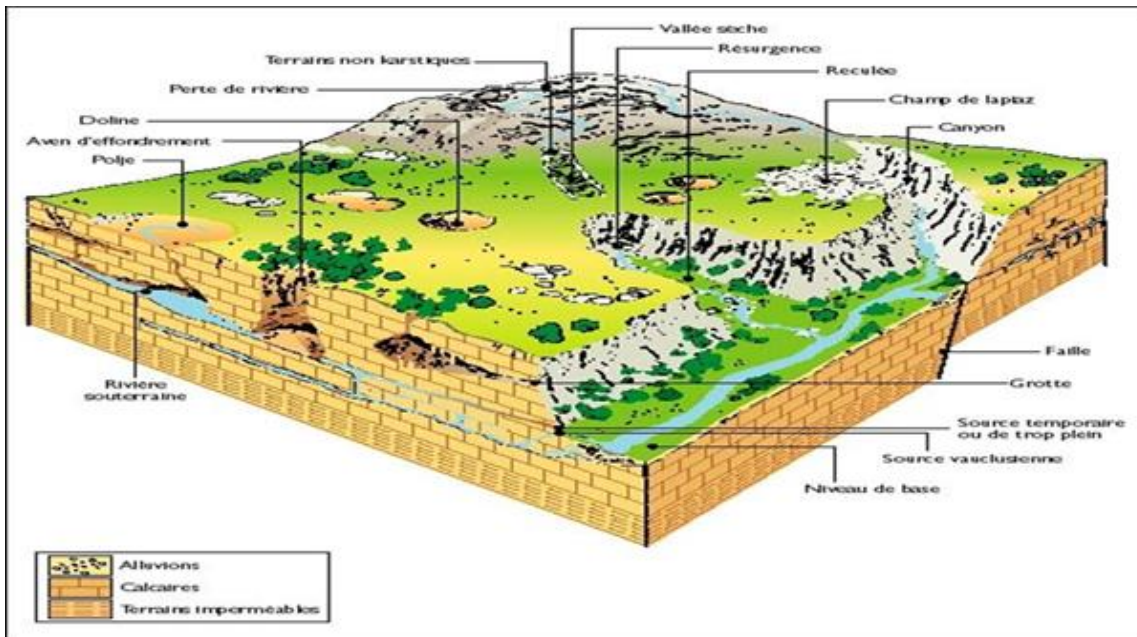


Figure. I. 3 : Bloc de diagramme représentant un paysage karstique synthétique (Bakalowicz, 1999).

### 1.4. Structure et fonctionnements :

La majorité des karsts étudiés sont des karsts classiques. Ces aquifères présentent différentes configurations, selon la nature de l'impluvium et la position du drain principal par rapport à l'exutoire (Marsaud, 1996).

En fonction de la nature de l'impluvium, on distingue :

- Les karsts unaires : pour lesquels l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstiques.
- Les karsts binaires : qui possèdent dans leurs bassins d'alimentation des terrains non karstiques et imperméables.

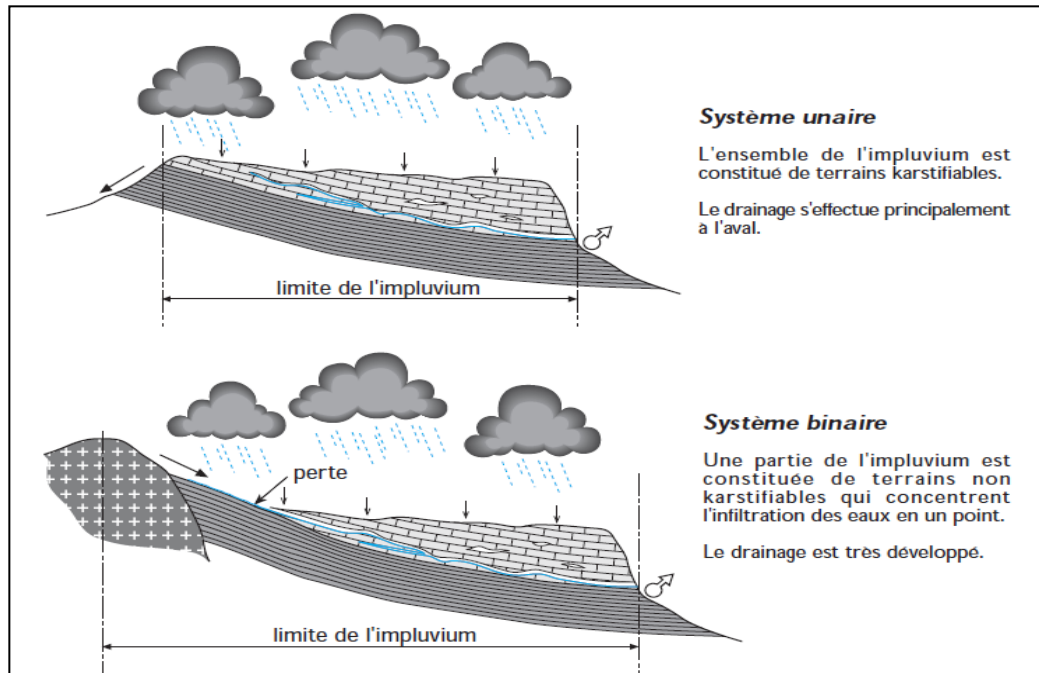


Figure. I. 4 : Les différentes configurations du karst, selon la nature de l'impluvium et la position du drain principal par rapport à l'exutoire (Marsaud, 1996).

L'aquifère karstique comporte : l'épi-karst, la zone noyée (saturée), zone d'infiltration (non saturée). (Fig.I.1).

- L'épi-karst : est la zone superficielle d'un massif karstique, située entre la surface et la zone saturée en eau. C'est une zone très perméable, caractérisée par une forte densité de fissures et de cavités. L'épi-karst joue un rôle important dans l'hydrologie des karsts, car il permet l'infiltration rapide de l'eau et le stockage temporaire de celle-ci.
- La zone d'infiltration : également connue sous le nom de zone de recharge, est la partie de la surface terrestre à travers laquelle l'eau s'infiltré dans le sol et rejoint les nappes phréatiques. C'est un processus essentiel du cycle hydrologique qui permet de renouveler les réserves d'eau souterraine. Elle se situe à la surface du sol, là où l'eau de pluie ou de fonte des neiges s'infiltré. Plusieurs facteurs peuvent influencer la capacité d'infiltration du sol, tels que la texture du sol (sableux, limoneux, argileux), la pente du terrain, la présence de végétation, la saturation du sol, etc.

La zone d'infiltration joue un rôle crucial dans l'alimentation des nappes phréatiques, qui sont des sources importantes d'eau. Elle contribue également à maintenir le débit des cours d'eau en période de sécheresse. La zone d'infiltration peut être vulnérable à la pollution, car les contaminants présents à la surface du sol peuvent être entraînés par l'eau et atteindre les nappes phréatiques. Il est donc important de protéger ces zones pour préserver la qualité de l'eau souterraine.

- La zone noyée : également appelée zone phréatique ou zone saturée, est la partie d'un aquifère karstique où tous les vides (fissures, fractures, conduits) sont complètement remplis d'eau. Cette zone se situe sous la surface piézométrique, qui est le niveau où la pression de l'eau souterraine est égale à la pression atmosphérique. Elle est caractérisée par : Saturation permanente, Écoulement lent, Réservoir d'eau.

La zone noyée est une composante essentielle d'un système karstique, jouant un rôle crucial dans le stockage et la circulation de l'eau souterraine. Sa protection est primordiale pour assurer la qualité et la pérennité de cette ressource. Le karst noyé est constitué de drains ou axes de drainage et des systèmes annexes au drainage (Mangin, 1975, Bakalowicz, 1995) (Fig.I.4).

-*Les drains ou les axes de drainages* : c'est un ensemble de conduits développés dans la partie supérieure de la zone noyée. Il est caractérisé par un écoulement très rapide.

-*Le système annexe aux drainages (SAD)* : contrairement des axes de drainages, ils sont des vides de grandes tailles et caractérisés par le fonctionnement capacitif avec un écoulement lent et le temps de séjour long.

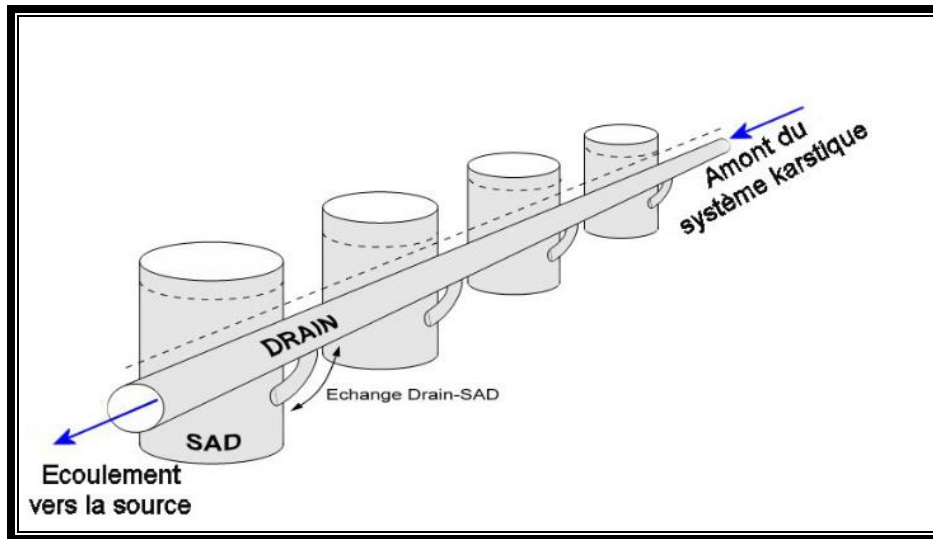


Figure. I. 5 : Modèle conceptuel du karst noyé (Marsaud, 1996).

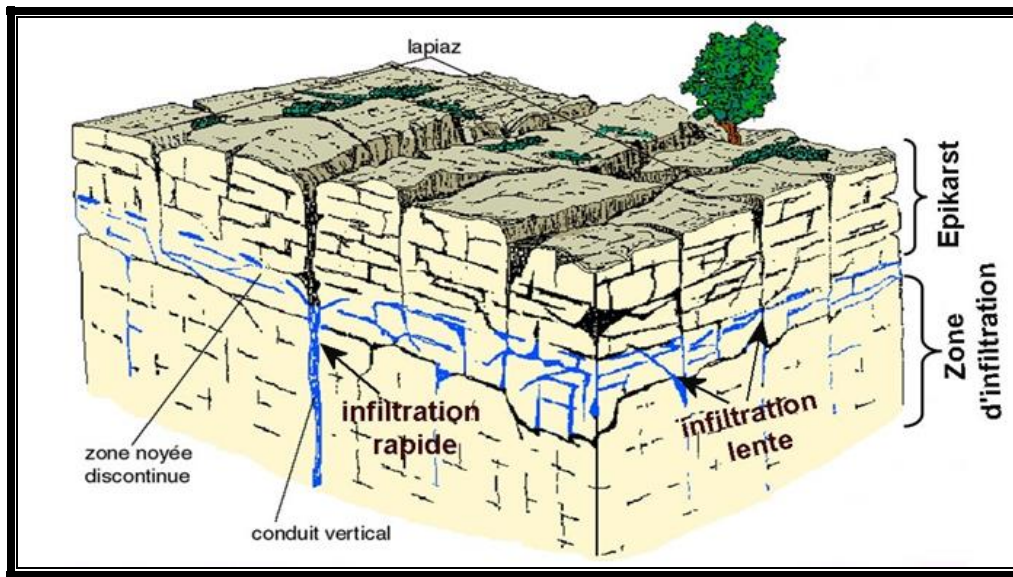


Figure. 1. 6: Schéma représentatif des zones karstiques (Mangin, 1975).

## **2. Situation géographique de la zone d'étude :**

Nichée à l'extrême nord-ouest de l'Algérie, la wilaya de Tlemcen s'étend entre mer et montagnes (Office National du Tourisme Algérien, 2021). Ce territoire se révèle particulièrement intéressant pour les géologues et hydrogéologues. En effet, les formations jurassiques et miocènes marines qui le caractérisent ont favorisé le développement d'un réseau hydrographique souterrain exceptionnel (Benest, 2016). Ces ressources en eau font de Tlemcen une région naturellement bien arrosée, bénéficiant d'un potentiel hydrique remarquable. C'est dans ce contexte géologique fascinant que s'inscrit l'objet de notre étude : Ghar Boumaâza. Cette merveille naturelle, constitue un système karstique d'exception aux environs de Sebdo (Collignon, 2010). En parcourant la route nationale 22 qui relie Tlemcen à Sebdo, on peut apercevoir, sur le flanc gauche, une colline à végétation éparse qui abrite cette formation géologique unique.

D'un point de vue administratif, Ghar Boumaâza se situe à cheval entre les communes de Terni et d'Ain Ghoraba (daïra de Mansourah) (figure I.5). Ce qui attire immédiatement le visiteur, c'est son impressionnante entrée : une béance monumentale sculptée par l'érosion dans la roche calcaire (Merzoug et al., 2019). Cette ouverture naturelle offre deux perspectives saisissantes : vers l'extérieur, elle donne sur un oued à ciel ouvert, tandis qu'à l'intérieur, elle révèle la rivière souterraine de la Tafna qui présente une particularité intéressante. Bien que son lit maintienne une certaine régularité en termes de dimensions et d'inclinaison, ses berges ne suivent pas le modèle classique des cours d'eau de surface, s'éloignant de la configuration parallèle traditionnelle. Le cadre naturel qui entoure Ghar Boumaâza contribue à en faire un site d'étude privilégié (Collignon, 2010).

Au Nord, se dresse Djebel Nador, dont le sommet culmine à 1579 mètres, ainsi que l'Oued Essafssef (Benest, 2016). La limite sud est définie par El Hebalet et la ville de

Sebdu. Quant aux frontières est et ouest, elles sont respectivement marquées par les étendues boisées de Merchiche et de Daher El Berhal. Cet environnement varié participe à la richesse de l'écosystème karstique.

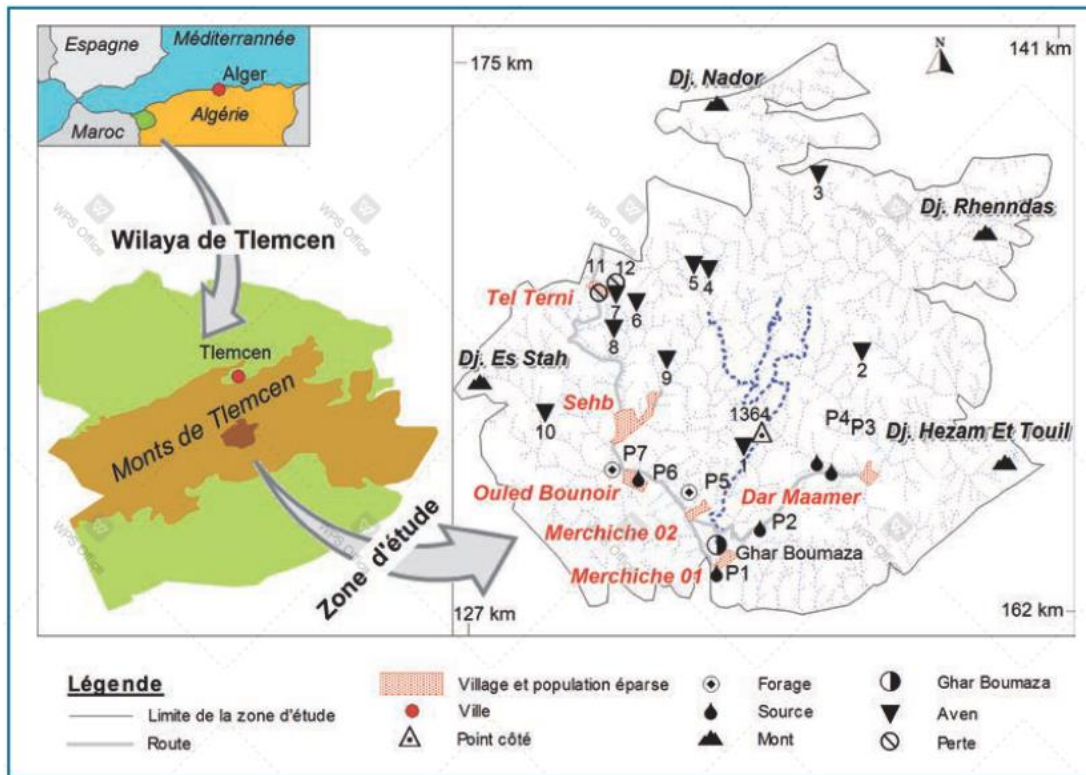


Figure. 1. 7: Situation géographique de la grotte de Ghar Boumaâza (Bensaoula.F, 2008).

## 2.1. Description de la zone d'étude :

La zone d'étude est d'une superficie de 20.000 hectares et a pour coordonnées géographiques : Longitude 1°18 N, Latitude : 34°42 E et altitude de 1070 m. La première exploration de la grotte était en 1931 par Henry Marcel, après cette année jusqu'à 1959 plusieurs expéditions ont achevé à franchir le siphon principal et à traverser une distance de 4 km jusqu'à une profondeur de 242 m. Les explorations ont repris en 1982 avec des objectifs plus précis, notamment dans les domaines d'hydrochimie, de la géologie et de la topographie de la grotte.

Ghar Boumaâza est une cavité souterraine caractérisée par un paysage varié, situé au centre d'un massif rocailleux carbonaté dans le synclinal de Merchiche, possédant des couloirs et des chambres hautes, des salles, des vasques et des bassins ornés de stalactites et de stalagmites. L'entrée de la grotte est marquée par une galerie vaste de 50m de large et 9m de hauteur, avec une formation calcaire épaisse. Le premier tronçon de 470 m alterne entre parties submergées et parties sèches, avec notamment le "lac des chauves-souris", le "couloir des éboulis" et la "salle des piliers". Le deuxième tronçon de plus de 3,4 km

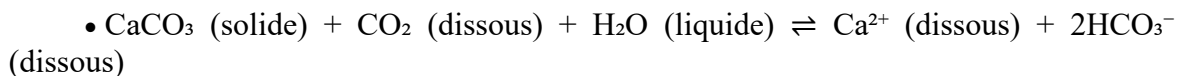
Constitue une véritable rivière souterraine, avec des galeries comme la "galerie des requins".

Le "lac des nénuphars" et le "lac du déversoir". La rivière se divise en trois réseaux distincts, dont le "Grand Canyon" et la "galerie de Gypse".

## 2.2. Formation de la grotte :

Ghar Boumaâza est caractérisé par des formations carbonatées spectaculaires : des stalactites, des stalagmites, des colonnes, des fissures et des galeries. La grotte est constituée principalement de roches calcaires, riches en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) qui sont particulièrement susceptibles d'être érodées par l'eau. L'origine de Ghar Boumaâza est issue par l'érosion chimique dans laquelle se produit le phénomène de dissolution par l'eau acide de pluie, à cause du dioxyde de carbone qu'elle dissout en traversant l'air, cette eau pénètre dans le sol et se mélange avec le carbonate de calcium contenu dans la roche calcaire. Cette réaction chimique dissout lentement la roche, ce qui crée des fissures, des cavités, et au fil du temps des grottes. Le climat influence directement l'intensité et la durée du processus érosif, en régulant la quantité d'eau disponible pour l'érosion. Il joue aussi un rôle, en déterminant la vitesse de dissolution des roches et la quantité d'eau qui pénètre dans le sol.

La réaction principale implique le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dissous dans l'eau de pluie et le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) présent dans les roches calcaires ou dolomitiques :



Les facteurs qui affectent la formation de la grotte :

- Pluviométrie : la région est caractérisée par des hivers humides et des étés secs. Cette variation saisonnière affecte grandement l'érosion ; quand les précipitations sont fréquentes et intenses, plus l'érosion est rapide et plus la dissolution du calcaire est accentuée.
- Température et humidité : La température influence le cycle de l'eau dans le sol. Lors des périodes plus chaudes, l'évaporation de l'eau contribue à la concentration de minéraux dissous, qui peuvent être déposés sous forme de stalactites et stalagmites dans la grotte. L'humidité relative, quant à elle, joue un rôle crucial dans la régulation de ce processus de dépôt. En période de forte humidité, les cristaux de carbonate de calcium peuvent précipiter, formant progressivement des formations minérales à l'intérieur de la grotte.

## **chapitre II : Hydro- Climatologie de Ghar Boumaaza.**

## 1. Aperçu historique sur l'Hydrologie de la grotte :

Le système karstique de Ghar Boumaâza représente l'une des formations hydrogéologiques les plus remarquables du Nord-Ouest algérien, comme l'ont démontré les travaux approfondis de Collignon (2010), Bensaoula et al. (2012). Cette grotte abrite un segment souterrain de l'Oued Tafna, constituant un élément clé du réseau hydrologique régional de Tlemcen (Collignon, 2010). Les études hydrauliques menées par Rouissat et Benchikh (2017) révèlent une variabilité impressionnante du débit, oscillant entre 15 L/s en période d'étiage et atteignant des pointes spectaculaires dépassant 1200 L/s lors des crues exceptionnelles.

Selon les analyses hydrologiques de Zerrouki et Bouanani (2022), l'alimentation hydrique du système provient de trois sources distinctes : les infiltrations diffuses à travers l'épi-karst des plateaux calcaires environnants, les pertes concentrées de l'Oued Tafna en amont, et les précipitations saisonnières qui, d'après leurs estimations, contribuent à environ 65% des apports totaux.

Les travaux de traçage à la fluorescéine réalisés ont élégamment démontré que le temps de transit des eaux entre les points d'infiltration sur le plateau du Djebel Nador et leur résurgence dans la grotte varie considérablement de 18 à 72 heures, selon les conditions hydrologiques prévalentes.

Les travaux de Bensaoula.F, 2008 ont montré une variation des débits du système karstique de Ghar Boumaâza durant une période de suivi faite par l'ANRH du 02/01/2000 au 03/11/2001, présentée par la figure ci-dessous.

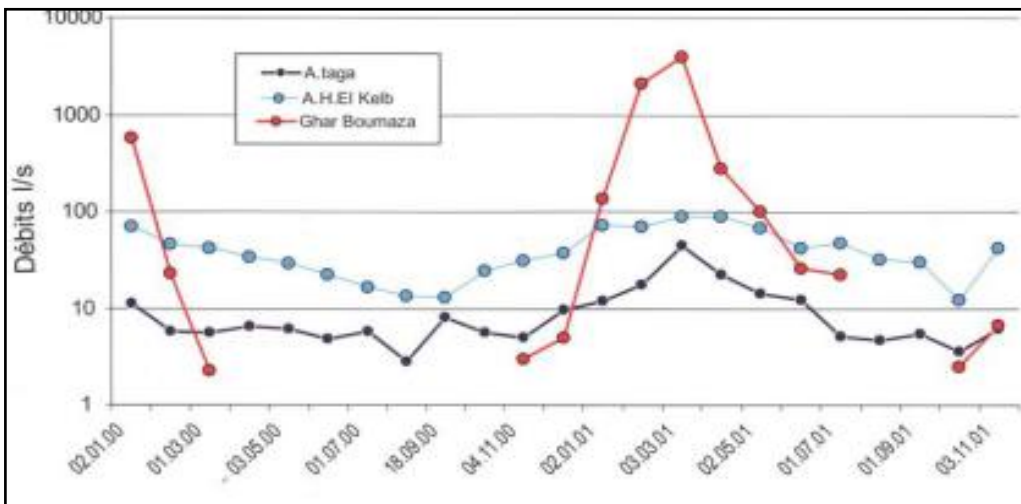


Figure. II. 1: Variation des débits du système karstique de Ghar Boumaâz (Ain Taga, Ain Hassi El Kelb et Ghar Boumaâza) (Bensaoula.F,2008).

Les variations de débit sont parfois spectaculaires : 90 L/s à 12,3 L/s à Ain Hassi El Kelb, 4000 L/s à Ghar Boumaâza, 45 L/s à 2,8 L/s à Ain Taga (fig II. 2). Les crues sont rapides et violentes. La mise en charge se fait quelques heures après les précipitations (Bensaoula.F, 2008).

## 2. Etude climatologique :

### 2.1.Introduction :

La climatologie est la science qui étudie le climat, analysant des phénomènes atmosphériques sur de longues périodes (décennies ou siècles). Les climatologues examinent des données, telles que les températures, précipitations, humidité, pression atmosphérique et vents pour comprendre les modèles climatiques, leurs évolutions passées et futures. Ces analyses sont cruciales pour évaluer les impacts du changement climatique, anticiper les conditions à venir et optimiser la gestion des ressources naturelles ou la planification des infrastructures.

Afin d'identifier le climat de la région d'étude, nous avons fait appel aux données collectées à la station de Sebdou pour la période allant de 1995 à 2024.

Tableau. II. 1: les coordonnées géographiques de la station de Sebdou.

Altitude	Longitude	Latitude
914 M	1.32694°O	34.6394°N

### 2.2.Etude des paramètres climatologiques :

#### 2.2.1. Les précipitations :

Les précipitations désignent tout phénomène atmosphérique qui correspond à la chute de l'eau sous forme liquide ou solide depuis l'atmosphère vers le sol. Cela inclut plusieurs formes, telles que : la pluie (liquide), la neige (solide), la grêle (solide), le brouillard givrant ou le verglas (solidification de l'humidité sous forme de cristaux de glace). Les précipitations jouent un rôle clé dans le cycle de l'eau en alimentant les réservoirs d'eau (rivières, lacs, nappes phréatiques) et en régulant le climat.

#### a) Précipitations moyennes annuelles :

## Chapitre II : Hydro-climatologie de Ghar Boumaaza

---

Tableau. II. 2 : Précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station de Sebdou (1995-2024).

Année	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>
P(mm)	337,5	442 .9	263.6	216.2	411.3	237.3	337.4	363.7	511.5
Année	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
P(mm)	511.5	332.2	332.2	485.1	590.6	395.5	453.5	464	506.2
Année	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
P(mm)	474.6	400.7	305.8	353.3	258.4	500.9	300.5	210.3	285
Année	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>						
P(mm)	325	256	304						

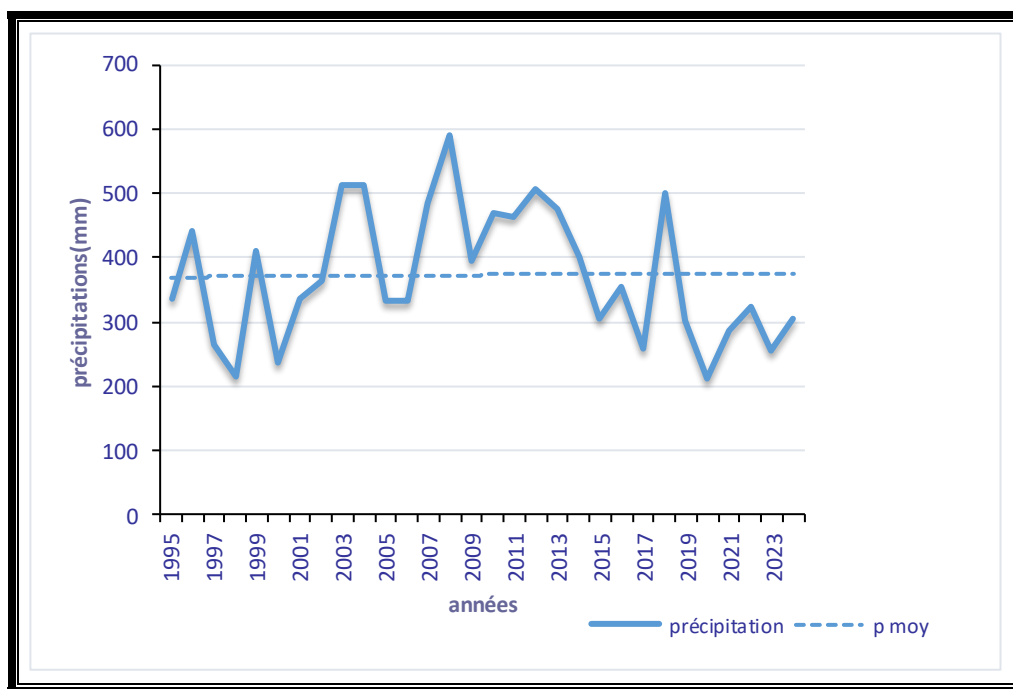


Figure. II. 3: Variation des précipitations moyennes annuelles (1995-2024).

La courbe des variations des précipitations moyennes annuelles montre que :

- La valeur maximale est enregistrée en 2008 avec 590.6mm.
- La valeur minimale est enregistrée en 2020 avec 210.3mm.
- La valeur moyenne annuelle des précipitations est de 372.8mm.

**b) Précipitations moyennes mensuelles :**

Tableau. II. 3: Précipitations moyennes mensuelles (1995-2024).

Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
48.8	32.2	43.1	38.7	27.3	8.7	1.2	11.5	29.8	41.6	51.8	37.4

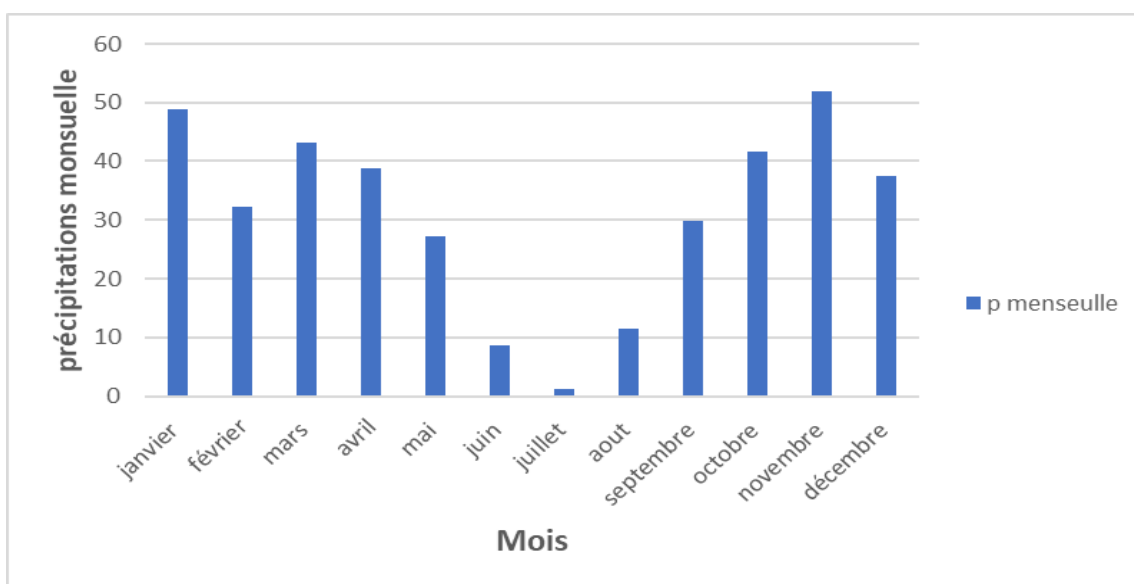


Figure. II. 4: Variation des précipitations moyennes mensuelles (1995-2024).

Le tableau (II.3) et la figure (. II. 3) ont montré que le mois de novembre est le plus humide, avec 51.8 mm, tandis que le mois de juillet est le plus sec avec 1.2mm.

**c) Précipitations saisonnières :**

L'analyse de la distribution des précipitations moyennes saisonnières dans la région d'étude a montré que l'automne est le plus humide suivie par l'hiver et le printemps, tandis que l'été est la saison la plus sec (tab II. 4 et fig. II. 3).

Tableau. II. 5 : Précipitations saisonnières.

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Été
<b>Précipitations (mm)</b>	123.2	118.4	109.1	11.4

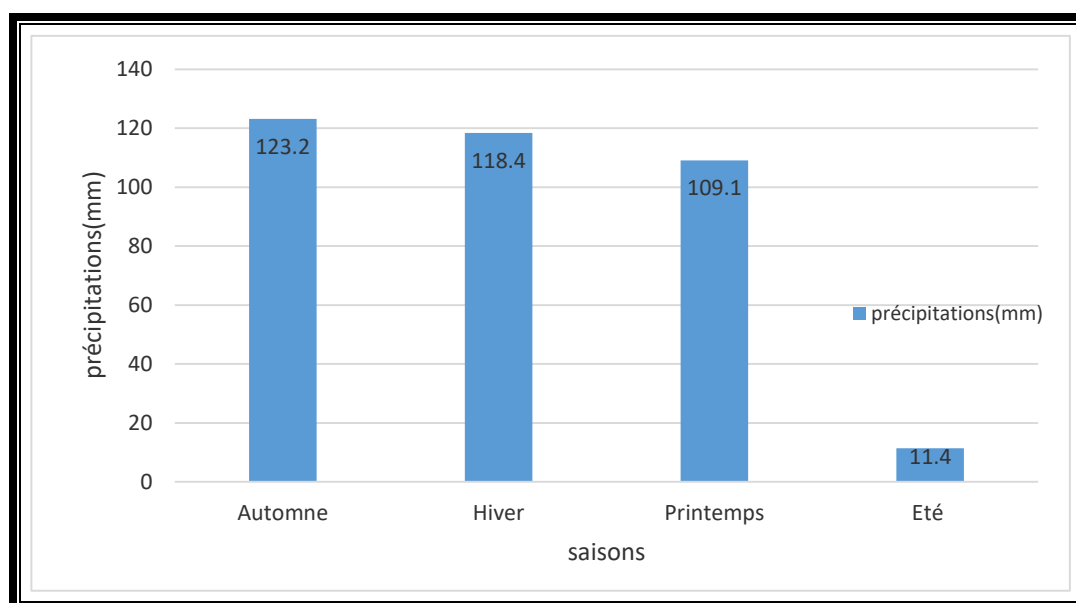


Figure. II. 5: Variation des précipitations saisonnières.

### 2.2.2. Les Températures :

Les températures en climatologie sont étudiées à l'échelle globale, régionale ou locale permettent d'analyser des phénomènes, tels que les variations saisonnières, les changements climatiques, ou encore les influences des courants océaniques et des phénomènes naturels. Elles sont généralement mesurées à l'aide de stations météorologiques et influencées par divers facteurs, tels que l'altitude, la latitude, la proximité des océans, l'ensoleillement et la couverture nuageuse. Les variations de température à long terme sont utilisées pour caractériser différents types de climats (tropical, tempéré, etc.).

#### a) Les températures moyennes, maximales et minimales :

Tableau. II. 6 : Valeurs des températures mensuelles moyennes, maximales et minimales.

Mois	Jan	Fév	Mrs	Avr	Mai	Jui	Jlt	Aut	Sep	Oct	Nvb	Déc	Moyenne
<b>Tmax</b>	13	13.7	16	18.5	22.8	25.2	28.4	29.3	24.9	21.8	17.5	13.4	20.3
<b>Tmoy</b>	10.5	11.2	13.3	15.5	18.8	23.1	26.1	26.5	22.8	19.5	14.2	11.2	17.7
<b>Tmin</b>	8.3	7.9	11.7	13.1	15.6	20.6	22	22.7	20.7	15.6	11.2	8.4	14.8

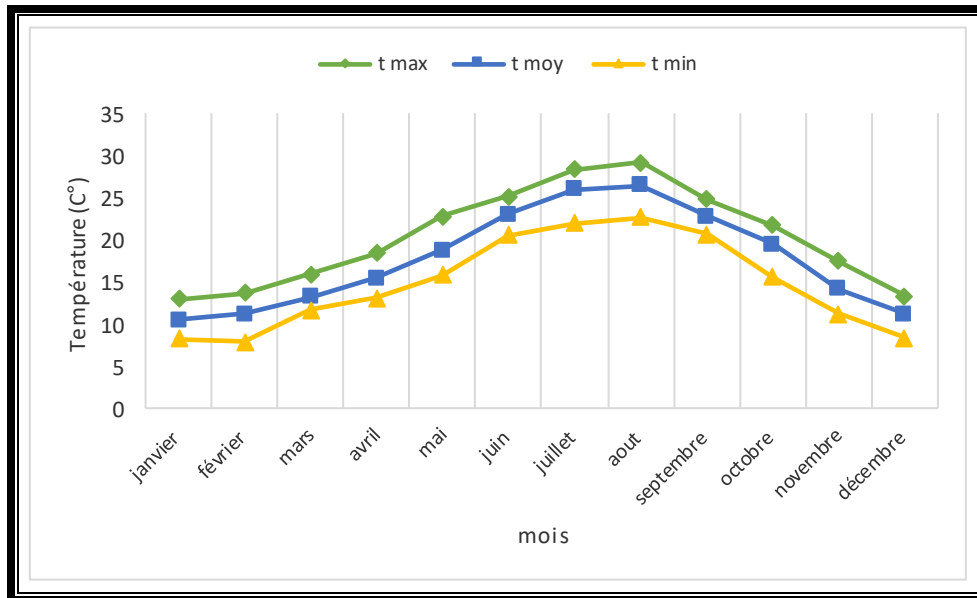


Figure. II. 6: Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales.

La figure (II.5) représente les températures maximales, minimales et moyennes mensuelles. La valeur la plus élevée est relevée au mois d'août (26.5°C) où la température maximale enregistrée est de 29.3°C. Tandis que la température minimale est enregistrée au mois de février (7.9°C). La température moyenne annuelle est de 17.7°C.

Les méthodes graphiques et celles de calcul des indices climatiques annuels et mensuels, à partir des données climatologiques permettent de visualiser le climat de la région d'étude.

### 2.2.3. L'étude du climat :

#### a) Méthode graphique :

##### ➤ Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen :

Le diagramme permet de déterminer les périodes sèches et humides par les températures et les précipitations :

**Période sèche ou déficitaire (P.D) :** Si la courbe des températures (T) est au-dessus de la courbe des précipitations (P).

**Période humide (P.E) :** Si la courbe des précipitations (P) est au-dessus de celle des températures (T).

Tableau. II. 7 : Précipitations et Températures moyennes mensuelles.

Mois	Jan	Fév	Mrs	Avr	Mai	Jui	Jlt	Aut	Sep	Oct	Nvb	Déc
<b>P(mm)</b>	48.8	32.2	43.1	38.7	27.3	8.7	1.2	11.5	29.8	41.6	51.8	37.4
<b>T(°C)</b>	10.5	11.2	13.3	15.5	18.8	23.1	26.1	26.5	22.8	19.5	14.2	11.2

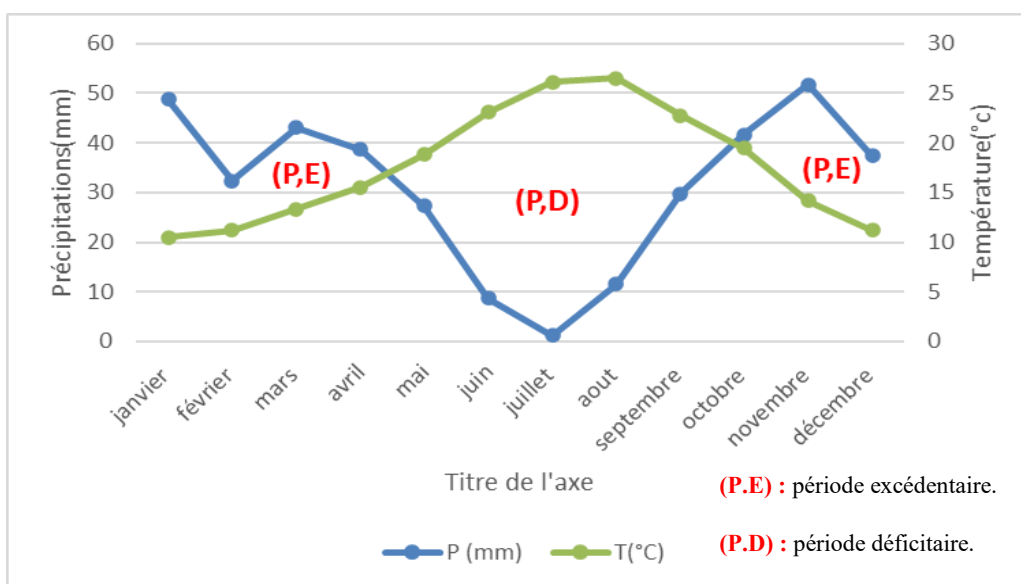


Figure. II. 7 : Diagramme pluviothermique de Bagnols et Gausсен

L'analyse du diagramme pluviothermique nous a montré que la période déficitaire (P.D) est enregistrée de la mi- avril jusqu'au début du mois d'octobre, tandis que la période excédentaire (P.E) s'étale sur les autres mois de l'année.

**b) Les indices climatiques :**

➤ **L'indice d'aridité de DE Martonne (1923) :**

L'indice d'aridité de DE Martonne est un outil précieux pour définir le phénomène d'aridité, en précisant comment il limite certaines formations végétales

**i. L'indice d'aridité annuelle :**

Il est représenté par l'équation suivante :

$$I_a = \frac{P}{T+10}$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

I<sub>a</sub> : Indice d'aridité annuel.

Tableau. II. 8: Indice d'aridité de DE Martonne.

<b>P moy (mm)</b>	<b>Tmoy (°C)</b>	<b>I<sub>a</sub></b>
<b>372.8</b>	<b>17.7</b>	<b>13.45</b>

Tableau. II. 9 : Classification de DE Martonne.

<b>VALEUR DE I</b>	<b>TYPE DU CLIMAT</b>
<b>I &gt; 50</b>	Climat équatorial et montagnard
<b>20 &lt; I &lt; 50</b>	Froid tempéré ou tropical
<b>10 &lt; I &lt; 20</b>	Climat semi-aride
<b>5 &lt; I &lt; 10</b>	Climat désertique
<b>I &lt; 5</b>	Climat hyperaride

Après le calcul de l'indice d'aridité annuel de DE Martonne (13.45), il est compris entre  $10 < 13.45 < 20$  (climat *semi-aride*) d'après le tableau (II. 10).

La projection des données de P et de T dans l'abaque ci-dessous a classé la zone étudiée dans un climat semi-aride à écoulement temporaire.

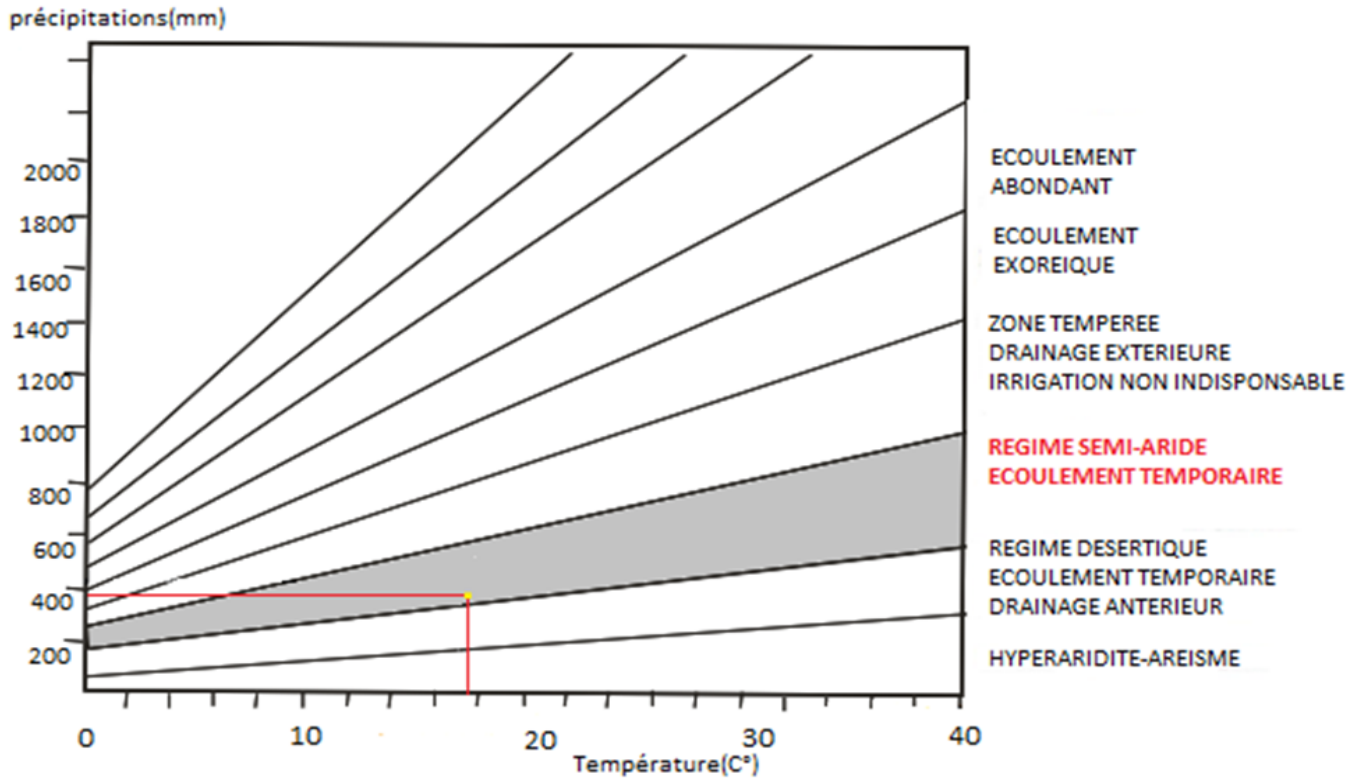


Figure. II. 8 : Abaque de l'indice d'aridité annuel.

ii. L'indice d'aridité mensuel :

Il représente par la formule suivante : 
$$i = \frac{12P}{t+10}$$

P : précipitations moyennes mensuelles (mm).

T : Températures moyennes mensuelles (°C).

i : Indice d'aridité mensuel.

Tableau. II. 11 : Indices d'aridité mensuels de DE Martonne.

Mois	J	F	M	AV	M	J	JT	A	S	O	N	D
I	23.8	18.2	22.1	18.2	11.3	3.1	0.3	3.7	10.9	16.9	25.2	21.1
Type de régime	T	S	T	S	S	Ha	Ha	Ha	S	S	T	T

**T** : Froid tempéré ou tropical

**S** : semi-aride

**Ha** : hyper aride.

➤ **Climagramme d'EMBERGER :**

On l'emploie pour définir la nature de l'étage bioclimatique d'une station spécifique, en se basant sur l'équation suivante :

$$Q_2 = \frac{1000 \times P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)}$$

**P** : Précipitations moyennes annuelles (mm).

**M** : Moyenne des maxima de la température en (°k) du moins le plus chaud (29.3°C en Août).

**m** : Moyenne des minimas de la température en (°k) du moins le plus froid (7.9°C en février).

**Q<sub>2</sub>** : Quotient pluviothermique d'Emberger. Avec : K= T (°C) + 273.

Tableau. II. 12: Indice d'Emberger.

<b>P (mm)</b>	<b>M (°K)</b>	<b>m (°K)</b>	<b>Q<sub>2</sub></b>
<b>372.8</b>	<b>302.3</b>	<b>280.9</b>	<b>59.74</b>

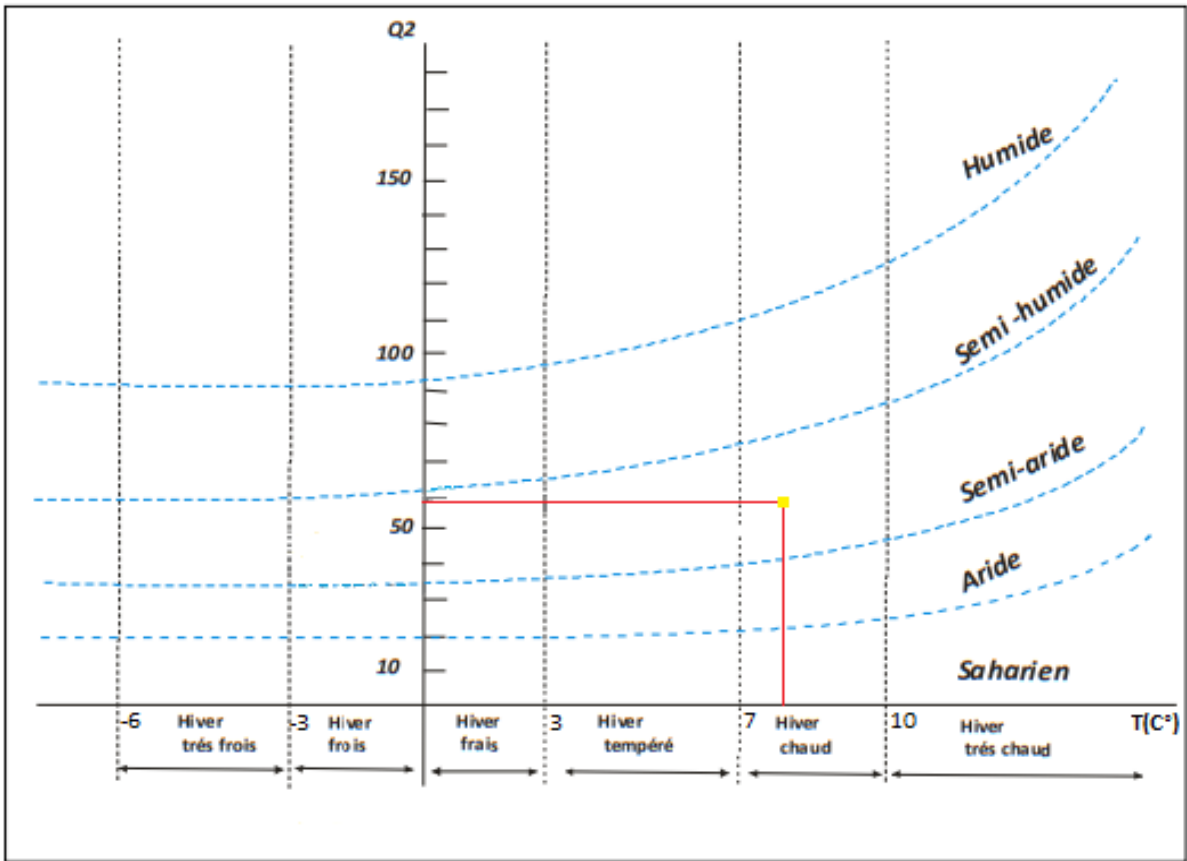


Figure. II. 9: Climagramme d'Emberger (station Sebdo).

i. L'indice de Stewart (1969) :

Calculé par la formule suivante :  $Q_2 = \frac{3.43 \times P}{M+m}$  avec

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

M : Moyenne des maxima de la température du moins le plus chaud (29.3°C en Août)

m : Moyenne des minima de la température du moins le plus froids (7.9°C en février)

$Q_2$  : quotient pluvio-thermique d'Emberger.

Pour :

$10 < Q_2 < 50$  Climat semi-aride.

$2 < Q_2 < 10$  Climat désertique.

$Q_2 < 2$  Climat insaturé.

$Q_2 = 34.3$  alors le climat est semi-aride.

## 2.2.4. Le bilan hydrologique :

### a) Evapotranspiration et déficit d'écoulement :

- ✚ Evapotranspiration joue un rôle clé dans le cycle hydrologique, influençant la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité en eau des sols. L'évapotranspiration dépend de plusieurs facteurs comme la température, l'humidité, le vent, le type du sol et la couverture végétale.
- Evapotranspiration potentielle (ETP) : est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration.
- Evapotranspiration réelle (ETR) : est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.
- ✚ Déficit d'écoulement: Différence entre la moyenne de la hauteur d'eau des précipitations sur le bassin et la lame d'eau équivalente.

#### ➤ Evapotranspiration réelle (ETR) :

On dispose de diverses techniques pour estimer ces paramètres :

- La méthode de TURC.
- La méthode de COUTAGNE.
- La méthode de VERDEIL.
- La méthode de WUNDT.

#### ✚ Méthode de TURC (1954) :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

Avec :  $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle (mm/an).

Tableau. II. 13 : Calcul de l'ETR par la méthode de Turc.

Station	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm /an)	Écoulement et infiltration (mm) (P-ETR)
Sebdou	372.8	17.7	1019.7	366.6	6.2 soit 1.6% de P

#### ✚ Méthode de COUTAGNE :

En calcul l'évapotranspiration réelle ou déficit d'écoulement par la formule suivante :

$ETR=D=P-\lambda P^2$  avec,  $\lambda= 1 / (0,8+0,14T)$ .

D : Déficit d'écoulement en (mm/ an).

P : Précipitations moyennes annuelles (m).

T : Température moyenne annuelle (°C).

$\lambda$  : un facteur dépendant de la température moyenne annuelle.

L'application de l'équation ci-dessus a montré que  $\lambda= 0,3051$ , et par conséquent la méthode n'est pas applicable, car P n'est pas comprise entre  $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$   
 ( $1/8\lambda = 0,4097$  ;  $1/2\lambda = 1,6388$ )

✚ **Méthode de WUNDT :**

Grâce à l'abaque de Wundt, nous avons réussi à définir la valeur du déficit d'écoulement « D » en relation avec la température moyenne annuelle « T » et les précipitations « P ».

L'application de cette méthode produit les résultats suivants dans le tableau :

Tableau. II. 14 : Valeur du déficit d'écoulement (d'après Wundt).

Station	P (mm)	T (°C)	D (mm /an)	Écoulement et infiltration (P-D)
Sebdou	372.8	17.7	360 soit 96.5 de P	12.8 soit 3.4 % de P

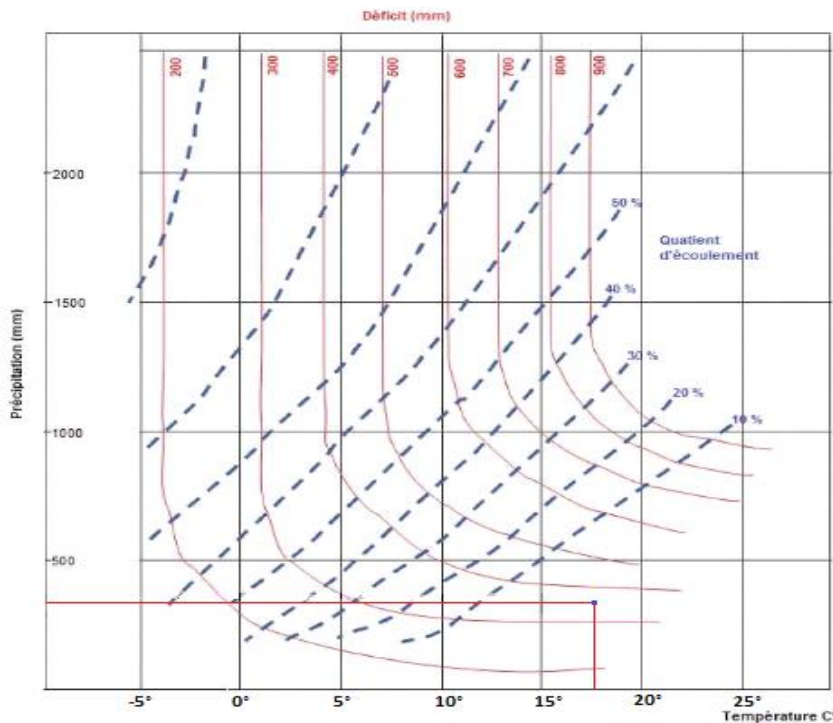


Figure. II. 10: Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).

✚ Méthode de P. VERDEIL :

Verdeil (1988), a établi en Algérie un abaque bi-logarithmique pour les régions semi-arides, en tenant compte uniquement des précipitations annuelles. Les résultats de cette Méthode sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau. II. 15: Valeur du déficit d'écoulement (d'après P. VERDEIL)

Précipitations (mm)	Déficit (mm /an)	Écoulement et infiltration
372.8	365 soit 97.9 de P	7.8 soit 2.09 % de P

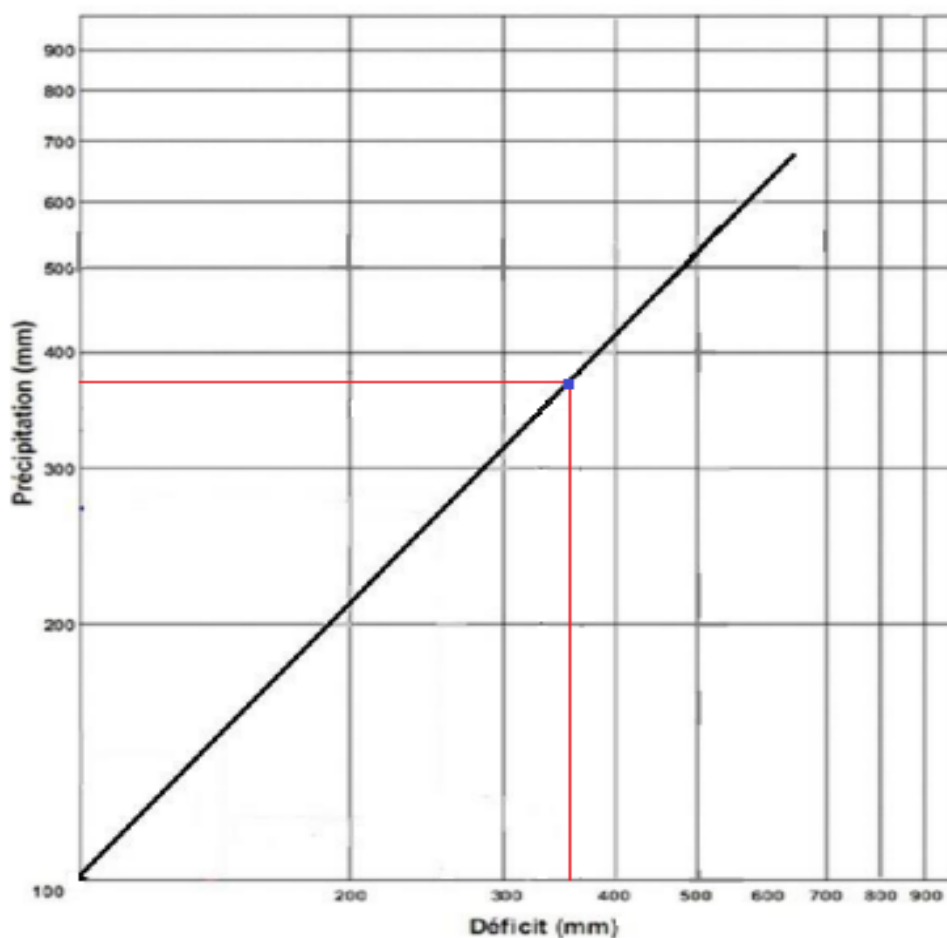


Figure. II. 11: Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (P. VERDEIL, 1988).

➤ **Evapotranspiration potentielle (ETP)**

✚ **Méthode de THORNTHWAITE :**

Dans cette méthode on doit calculer :

$$\text{ETP non corrigés} = 16 \left( \frac{T}{I} \times 10 \right)^a \quad \text{avec } a = 0.016I + 0.5 .$$

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

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

i : indice thermique mensuelle avec  $i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$

I : la somme des indices mensuels des 12 mois de l'année (i),  $I = \sum_{1}^{12} i$ .

T : température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

K : Coefficient de correction, en fonction de la latitude de la station de Sebdu (35°N).

(Tableau A en annexes) .

Tableau. II. 16: Valeurs de l'ETP corrigée à la station Sebdu (1995-2024).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
T (C°)	10.5	11.2	13.3	15.5	18.8	23.1	26.1	26.5	22.8	19.5	14.2	11.2	17,7
I	3.07	3.3	4.3	5.5	7.4	10.1	12.2	12.4	9.9	7.8	4.8	3.3	84.07
ETP non corrigée	23.8	26.8	36.5	48.1	68.1	98.6	122.9	126.3	96.3	72.7	41.1	26.8	788
K	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85	/
ETP corrigée	20.7	22.7	37.5	52.4	82.4	119.3	151.1	146.5	99.1	70.5	35.3	22.7	850.2

**Evapotranspiration réelle (ETR) :**

**b) Calcule de la réserve en eau du sol :**

➤ **Calcule de la réserve facilement utilisable (R.E.U) :**

Selon Hallaire (1960), la R.E.U est calculée par la formule suivante :

$$RU = \frac{c-f}{100} H \times D + 30$$

RU : réserve utile en eau de sol.

c : capacité en champ.

f : capacité en point de flétrissement.

H : profondeur du sol.

D : densité apparente du sol.

30 mm : Enracinement capillaire.

D'après les études antérieures (Baba Hamed. K, 1991) nous avons pris  $RU = 100\text{mm}$ .

Tableau. II. 17 : Calcul du bilan hydrologique de la station de Seb Dou (1995-2024), selon C.W THornthwaite.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
P(mm)	52,73	33,11	43,45	42,83	28,68	8,22	1,05	13,07	30,16	47,25	58,42	41,55	400,52
ETP (mm)	23,95	23,4	41,93	44,37	78,22	129,37	141,84	150,99	104,53	79,66	37,34	22,46	878,06
RU (100 mm)	28,78	38,49	40,01	38,47	0	0	0	0	0	0	21,08	40,17	/
ETR (mm)	23,95	23,4	41,39	44,37	67,15	8,22	1,05	13,07	30,16	47,25	37,34	22,46	359,81
D,A (mm)	0	0	0,45	0	11,07	121,15	140,79	137,92	74,37	32,41	0	0	518,25
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E(mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### **Conclusion :**

Ghar Boumaâza est situé à environ 4 km de Seb Dou. Il est délimité au Nord par le Mont Echebreg, à l'Ouest par la forêt de Daher El Berhal, à l'Est par la forêt de Merchiche et au Sud par El Habalet et Seb Dou. C'est un site naturel, il s'agit d'un système karstique d'une grande importance, reconnu comme site Ramsar depuis 2003, ce qui souligne sa valeur écologique et son rôle, en tant que zone humide d'importance internationale.

L'étude climatologique de la région a dévoilé les résultats suivants :

-Les précipitations moyennes annuelles sont de 372.8 mm et les températures moyennes mensuelles sont de 17.7 C°. La température moyenne maximale marquée au mois d'août (29.3°C) et la température moyenne minimale est marquée en février (7.9 C°).

-Les courbes pluviothermiques de Bagnouls et Gausson ont montré une période déficitaire qui s'étend de la mi-avril au début du mois d'octobre et une période excédentaire qui -s'étale sur les autres mois de l'année.

-Les méthodes graphiques et les indices (L'indice d'aridité de DE Martonne, Climagramme d'EMBEREG) ont fait ressortir que l'étage bioclimatique est semi-aride.

Le bilan hydrologique a donné les résultats suivants :

- Evapotranspiration potentielle est de 878.06 mm.
- Evapotranspiration réelle est de 359.81 mm.
- Déficit agricole est de 515.25mm.

## **Chapitre III : Contexte géo-structural et synthèse hydrogéologique.**

## 1. Contexte géo-structural du secteur d'étude :

### 1.1. Synthèse géologique :

Les Monts de Tlemcen sont constitués essentiellement de formations d'âge Jurassique supérieur et Crétacé inférieur. Les calcaires et dolomies du Kimméridgien et du Tithonien forment plus de 80% des parties sommitales des plateaux. Au Sud et au Nord, ces formations sont marquées par une sédimentation tertiaire épaisse, définie par des dépôts fluviatiles éocènes sur le revers sud et par des marnes miocènes et des dépôts continentaux du Plio-Quaternaire au Nord.

La description des formations géologiques existantes dans la région de Ghar Boumaâza est inspirée des travaux de Benest. M,1983 ; Collignon. B,1986 et Bensaoula.F,2006 (Fig. III. 1) et (Fig. III. 2)

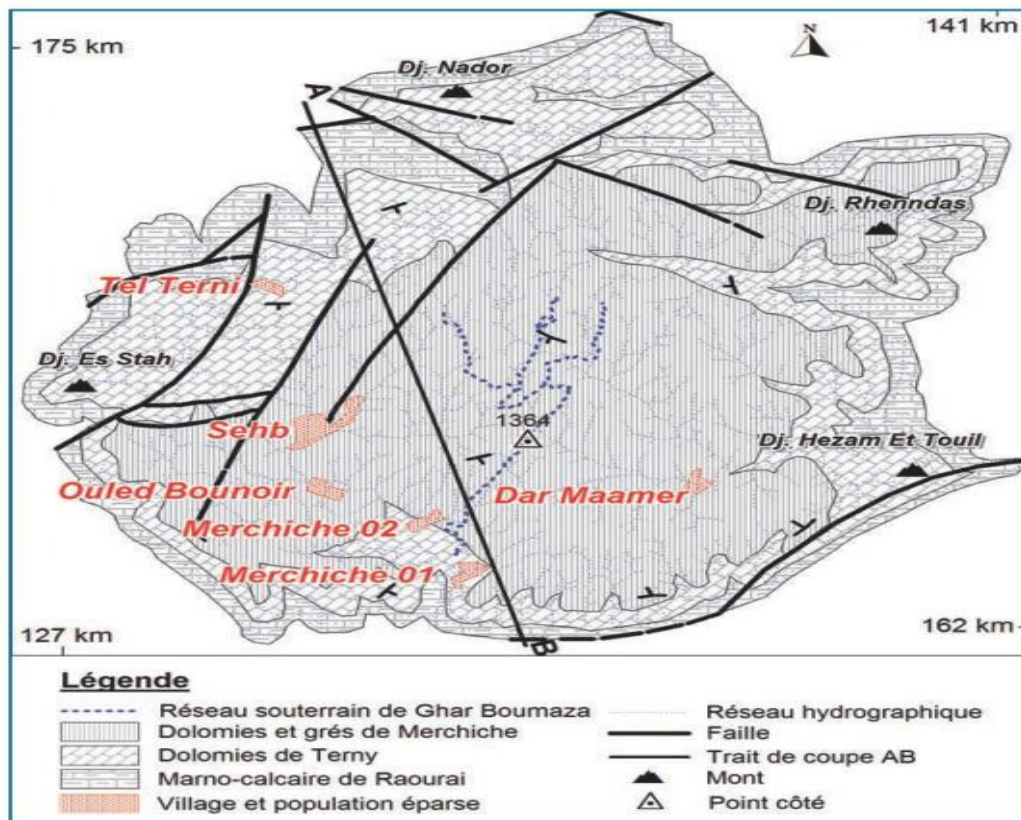


Figure. III. 1: Carte géologique de Ghar Boumaâza (extraite de la carte géologique de l'Algérie au 1/50 000) (Bensaoula.F, 2006).

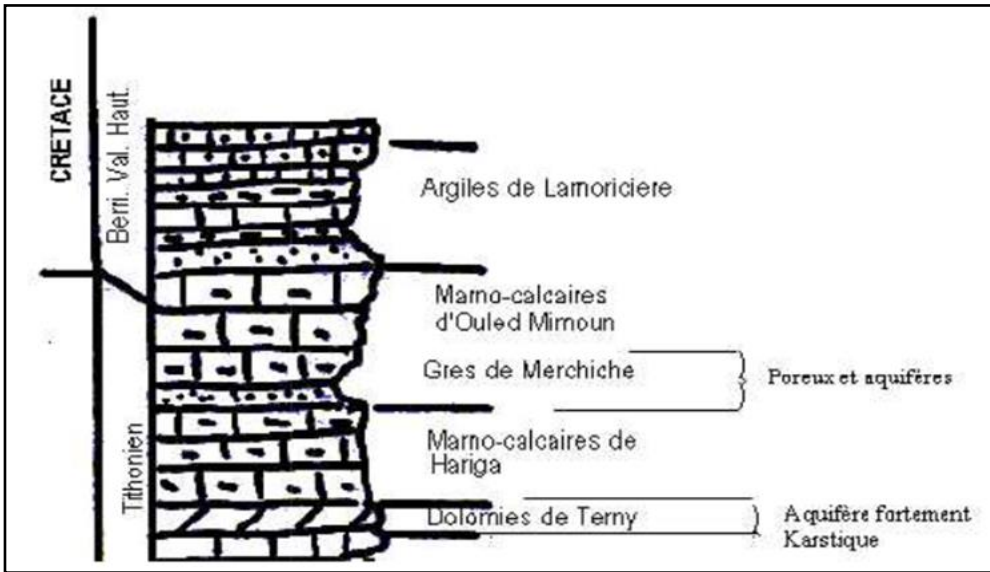


Figure. III. 2 Log litho-stratigraphique synthétique de la région étudiée (D'après Benest et al.1999, modifié, in Bensaoula.F, 2006).

#### a) Les Dolomies de Terni (Tithonien inférieur) :

Dans le paysage géologique des Monts de Tlemcen, les Dolomies de Terny constituent un élément remarquable qui se manifeste sous la forme d'une imposante corniche surplombant les formations calcaires du Lato. Cette formation géologique présente des caractéristiques particulièrement intéressantes dans le secteur de Sebdou, où elle atteint une puissance approximative de 50 mètres. La particularité de ces dolomies réside dans leur remarquable homogénéité à travers l'ensemble des Monts de Tlemcen. Bien que généralement pauvres en fossiles, ces formations recèlent à leur niveau inférieur une couche particulièrement distinctive, caractérisée par une abondance de concrétions siliceuses (silex) et la présence Fascinante de stromatolites en colonnes qui ont subi un processus de re-cristallisation. Un phénomène géologique particulièrement intéressant s'observe dans la partie sud des Monts de Tlemcen et de Daia, le processus de dolomitisation a affecté non seulement les Dolomies de Terni mais également les calcaires du Lato sous-jacents, créant ainsi un ensemble dolomitique continu ce qui rend la distinction entre ces deux formations, très difficile, témoignant de l'intensité des processus de dolomitisation qui ont marqué cette région.

Cette formation surmonte les marno calcaires de Raourai qui forment le substratum des formations.

**b) Les marno-calcaires de Hariga (Tithonien inférieur).**

La délimitation précise des couches marno-calcaires dans cette région présente des défis intéressants pour les géologues. En effet, l'identification de la limite inférieure s'avère particulièrement complexe, notamment en raison du phénomène de dolomitisation qui a profondément transformé les premières strates calcaires. Ce processus de transformation minéralogique a modifié la structure originelle de la roche, rendant ainsi la distinction entre les différentes couches particulièrement délicate. En revanche, la transition supérieure de cette formation géologique est beaucoup plus évidente à repérer sur le terrain. Elle se manifeste de manière distincte par l'apparition du premier niveau de grès appartenant à la formation du Merchiche. Ces changements marqués de lithologie, comme le passage des marno-calcaires aux grès, offrent des repères plus facilement identifiables sur le terrain (Bensaoula.F, 2006).

**c) Les grès de Merchiche (Tithonien supérieur):**

Marqués par une intercalation micritique (Roches calcaires à grain très fins (micrite)), et marneuses (Roches sédimentaires composées d'un mélange de calcaire et d'argile). Cette alternance suggère des variations dans les conditions de dépôt au cours du temps, avec des périodes où la sédimentation était plus calcaire (micrite) et d'autres plus argileuses (marnes).

**d) Les marno-calcaires d'Ouled Mimoun (Tithonien supérieur-Berriasien inférieur):**

L'étude approfondie du versant nord de l'anticlinal d'Ouled Mimoun révèle une configuration géologique particulièrement fascinante. Cette structure, documentée initialement par les travaux de Benest en 1985, présente des caractéristiques structurales remarquables qui témoignent de l'intensité des forces tectoniques ayant façonné cette région. Le flanc septentrional de cet anticlinal se distingue par son inclinaison prononcée, avec une particularité géologique notable dans le secteur de Bled El Gliaa. À cet endroit, les couches inférieures présentent un phénomène de renversement local, illustrant l'ampleur des déformations tectoniques subies par ces formations. Cette structure atteint des dimensions considérables dans la zone d'Ouled Mimoun, où son épaisseur varie entre 500 et 700 mètres. La séquence stratigraphique débute par une série de bancs gréseux à sa base, marqueur important de l'histoire sédimentaire de la région (Bensaoula.F, 2006).

La figure (III. 2) présente la description géologique de la région de Ghar Boumaâza, plus précisément du synclinal de Merchiche, basée sur les travaux de Benest (1985) et de Bensaoula (2006). Le synclinal de Merchiche est une structure géologique en forme de cuvette. La coupe réalisée par Benest donne une vue de la succession des couches et de leurs épaisseurs.

\*Description des couches (de la base vers le sommet):

1. Marno-calcaires de Raourai : Ces couches forment la base de la coupe. Les marno-calcaires sont un mélange de marnes (roches argileuses) et de calcaires.
2. Dolomies de Terni (100 m) : Un ensemble de roches carbonatées (dolomies) d'une centaine de mètres d'épaisseur. Les dolomies sont des roches similaires au calcaire, mais avec une composition chimique légèrement différente. Elles se forment souvent par un processus de remplacement du calcaire par du magnésium.
3. Marno-calcaires de Hariga (195 m) : Une formation de marno-calcaires (alternance de marnes et de calcaires) d'environ 195 mètres d'épaisseur. Cette formation est décrite comme étant très micritique (riche en calcaire à grain fin) et très peu marneuse. La micrite est un type de calcaire composé de cristaux très petits.
4. Marno-calcaires d'Ouled Mimoun : La formation la plus récente de la coupe. Elle débute par les Grès de Merchiche (52 m). Les grès sont des roches sédimentaires composées de grains de sable cimentés. le fonctionnement des cours d'eau, a entraîné une érosion régressive qui a fait disparaître presque totalement cette formation (marno calcaires d'Ouled Mimoun), mais elle persiste encore sur les plus hauts sommets de plateau de Merchiche-Bouchiba (Bensaoula.F, 2006) (Fig.III.3).

L'ensemble des couches (Dolomies de Terni, Marno-calcaires de Hariga, Grès de Merchiche et Marno-calcaires d'Ouled Mimoun) atteint une épaisseur de 347 mètres au-dessus des Marno-calcaires de Raourai. Les couches présentent un pendage de 5° vers le Nord (Benest, 1985).

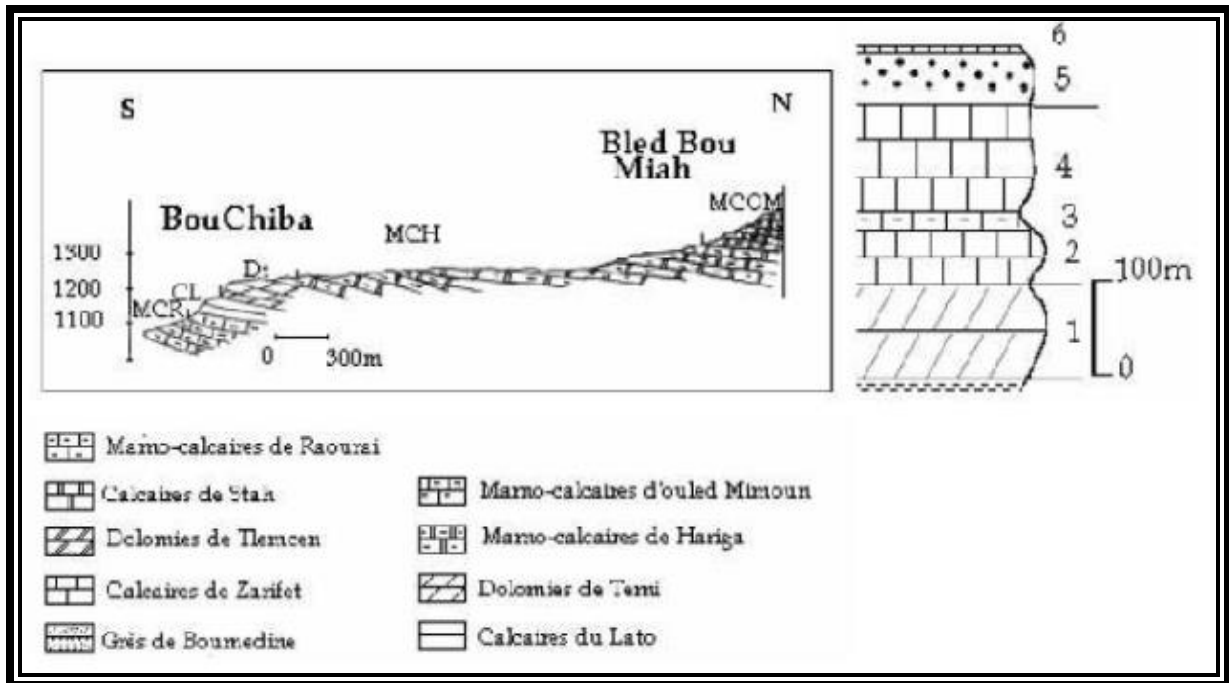


Figure. III. 3: Coupe géologique à travers le Djebel Bouchiba- plateau de Merchiche.  
 (MCR : marno calcaires de Raourai, CL : calcaires du Lato, Dt : Dolomies de Terni (dolomies, 1),  
 MCH : Marno calcaires de Hariga (2(pelmicrite), 3(marno-calcaire), 4(micrite), MCOM :marno  
 calcaires d'Ouled Mimoun (5(grès), 6(marnes et calcaires)).  
 (D'après Benest.M, 1985, modifié, in Bensaoula.F, 2006).

## 1.2.Synthèse structurale :

Le réseau karstique souterrain de Ghar Boumaâza s'est développé à travers des formations calcaréo-dolomitiques dans une structure en synclinal (synclinal de Merchiche), orientée SW-NE (Benest.M, 1984).

Les Monts de Tlemcen sont affectés par :

- Une tectonique d'intensive cassante par un système de failles longitudinales SW-NE à WSW-ENE (direction tellienne) avec formation de zones effondrées.

Une tectonique compressive plus souple avec la mise en place de structures plissées plus ou moins complexes.

### 1.2.1. Les phases tectoniques :

La tectogenèse tertiaire et quaternaire est influencée par l'évolution morpho-structurale de l'avant pays Tlemcénien (Benest, 1982 et 1985). Les cinq principales phases sont :

➤ **Une phase intensive Eo-Crétacée (fin Crétacé-Eocène) :**

La subsidence durant le Jurassique supérieur et l'Eo-Crétacé été influencée par les grands accidents tectoniques hérités de l'orogénèse hercynienne orientés SO-NE et subméridiens ont joué un rôle majeur dans l'évolution de la structure géologique de la région pendant ces périodes (Benest, 1981).

➤ **Une phase atlasique (fin Eocène - Oligocène) :**

Cette phase correspondrait sensiblement aux mouvements mis en évidence par P.Guardia dans les Monts des Traras et qui se seraient produits à partir du Sénonien. Les études faites dans les Monts de Tlemcen et de Daïa marquent :

-Des mouvements compressifs donnant des plis d'orientation moyenne E-O à grand rayon de courbure tel qu'au niveau du Djebel El Arbi dans la région de Sebdu.

- Des mouvements intensifs qui sont contrôlés par le rejeu des grands accidents du socle. La fracturation s'est traduite par un système de failles conjuguées N55°E et N140°E responsables de la mise en place des principales structures.

➤ **Une phase à dominance intensive :**

Cette phase compète la phase précédente. Elle a également fait reculer la mer (régression Pliocène), en particulier dans la région de Terni, qui avait été recouverte par la mer lors d'une transgression précédente (Miocène supérieur ou Mio-Pliocène) (Grabens).

➤ **Une phase récente (Plio-Quaternaire) :**

Pendant cette période, il y a eu des mouvements de terrain en même temps que les sédiments se déposaient (syn-sédimentaire). Ces mouvements ont provoqué des failles qui se sont déplacées latéralement (décrochements dextres) et ont créé des plis dans les roches (G.Thomas , 1985). Cependant, ces déformations n'étaient pas aussi importantes que celles qui se sont produites lors des phases précédentes (Doumergue , 1912). Les anciennes fractures (failles) ont été réactivées, ce qui a accentué la formation de zones surélevées (Horst) et de zones abaissées (grabbens)

➤ **Déformations actuelles :**

Elles se manifestent par les changements morpho-métriques et l'activité des failles.

## **2. Contexte hydrogéologique :**

Ghar Boumaâza est un système karstique unique, entièrement entouré par des terrains imperméables. Cette caractéristique le rend "perché", avec pour principaux exutoires les sources d'Aïn Taga et d'Aïn Hassi El Kelb. Ces deux sources sont situées à environ 500 mètres en aval d'une exurgence de débordement, ou "trop-plein" de Ghar Boumaâza.



Figure. III. 4: la source « Ain Taga ».



Figure. III. 5: la source « Hassi El Kelb »

## 2.1. Propriétés hydrogéologiques des formations :

### a) Dolomies de Terni :

Les dolomies de Terni sont caractérisées par la structure granulaire ; elles sont plus homogènes, donnent naissance à la source d'Ain Taga qui draine pratiquement toutes les

eaux de ce niveau. Ces dolomies jouent un rôle essentiel dans la grotte, tel que la circulation et le stockage des eaux souterraines.

**b) Les grès de Merchiche :**

Les grès de Merchiche influencent la circulation d'eau dans le système karstique de la grotte ; c'est une formation gréseuse d'environ 52m d'épaisseur. Elle est drainée par plusieurs petites sources comme Huissi labiyad (Bensaoula.F,2006).

Le système karstique de Ghar Boumaâza, principalement développé dans les dolomies de Terni, interagit avec les formations de grès de Merchiche. Ces deux formations ont un potentiel hydraulique important.

**c) Marno- calcaire de Hariga et d'Ouled Mimoun :**

Ces formations sont composées d'une alternance de marnes (roches argileuses imperméables) et de calcaires (roches carbonatées perméables). Les marno- calcaires de Hariga et d'Ouled Mimoun sont des formations imperméables dans le sens vertical, même si les calcaires sont perméables horizontalement, donc elles sont à faible potentiel hydraulique.

Le système de Ghar Boumaâza montre l'existence d'une succession de formations, à perméabilité de fissure (calcaires), d'interstices (grès) et imperméables (Marnes). Sur la base des connaissances obtenues, deux formations géologiques possèdent des caractéristiques aquifères : les dolomies de Terni (aquifère fortement karstifié) et les Grès de Merchiche (aquifère à porosité d'interstice). Ces deux grandes entités perméables forment les réservoirs aquifères principaux.

Tableau. III. 1 : caractéristique hydrogéologique des formations

<i>Formations</i>	<i>Terrain karstique</i>	<i>Terrain non karstique</i>	<i>Lithologie</i>	<i>Degré de perméabilité</i>
Argiles de Lamoricière		-	Argiles avec des passées gréseuses	Très faible perméabilité ou nulle
Marno-calcaire d'Ouled Mimoun		-	Calcaire et marnes souvent biodétritique	Très faible perméabilité ou nulle
Grès de Merchiche		-	Formation gréseuse de faible épaisseur.	Perméable
Marno-calcaire de Hariga		-	Alternance de marnes et de calcaires.	Très faible perméabilité ou nulle dans l'ensemble.
Dolomie de Terni	-		Dolomies	Très karstifiées et donnent naissance à une importante Source : Ain Taga qui draine pratiquement toutes les eaux des Dolomies de Terni.
Marno-calcaire de Raourai		-	Alternance de marnes grises Verdâtres et de calcaires.	Très faible perméabilité dans l'ensemble.

Le fonctionnement du système souterrain karstique de Ghar Boumaâza peut être expliqué comme suit (Fig. III. 3)

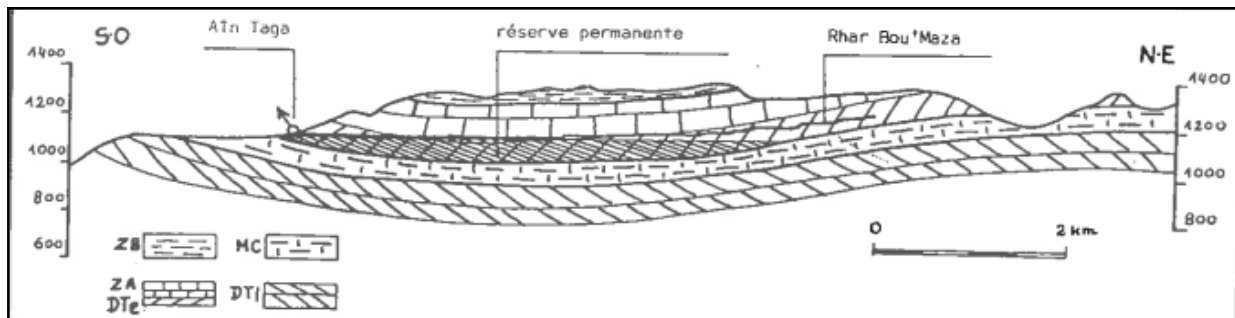
**Infiltration initiale** : Les eaux de pluie s'infiltrent dans les surfaces calcaires en surface (attaque érosive par l'eau acide de pluie).

**Stockage temporaire** : Ces eaux infiltrées sont ensuite stockées dans les grès de Merchiche. L'eau est drainée et émerge sous forme de sources, phénomène favorisé par la présence de bancs marneux au-dessous de cette formation

**3Réinfiltration et formation de pertes** : L'eau s'infiltré à nouveau dans les calcaires et dolomies (notamment les marno-calcaires de Hariga et les dolomies de Terni) via un réseau de fissures, formant ainsi une "perte" (point où l'eau de surface disparaît sous terre).

**Contrôle par le substratum imperméable et formation d'un drain souterrain** : La présence des marno-calcaires de Raourai, qui constitue un substratum imperméable, empêche l'eau de s'enfoncer davantage. Cela force l'eau à se diriger latéralement, favorisant la formation d'un drain souterrain.

**Dynamique amplifiée par l'altitude** : Cette dynamique est accentuée par le gradient altitudinal croissant des Monts de Tlemcen, une chaîne de montagnes en surrection, ce qui contribue à diriger et à accélérer les écoulements souterrains.



**ZB** : Grès de Merchiche et marno-calcaires d'Ouled Mimoun (Tithonien supérieur-Berriasien basal).  
**ZA** : Marno-calcaires de Hariga (Tithonien inférieur).  
**DTe** : Dolomies de Terni et calcaires de Lato (membre calcaréo-dolomitique inférieur Kimméridgien supérieur).  
**MC** : Marno-calcaires de Raourai (membre calcaréo-dolomitique moyen- Kimméridgien moyen).

Figure. III. 6: Coupe à travers la cuvette synclinale de Merchiche (Collignon.B, 1986).

### Conclusion :

Le contexte géologique de Ghar Boumaâza, situé dans le synclinal de Merchiche, révèle une succession stratigraphique particulière. Les dolomies de Terni reposent sur les marno-calcaires de Raourai, qui constituent le substratum imperméable du système aquifère. Au-dessus des dolomies de Terni, on trouve la formation des marno-calcaires de Hariga, elle-même surmontée par les marno-calcaires d'Ouled Mimoun, qui débutent par

les grès de Merchiche. En 1985, Benest a mesuré un pendage de 5° vers le Nord pour ces couches.

Cette disposition géologique, combinant des formations à perméabilité de fissure (calcaires et dolomies), des formations à perméabilité d'interstices (grès) et des formations imperméables (marnes), donne à Ghar Boumaâza la particularité d'être un système karstique perché. Ses principaux exutoires sont les sources d'Aïn Taga et d'Aïn Hassi El Kelb, situées à environ 500 mètres en aval d'une exurgence de débordement de Ghar Boumaâza.

## **Chapitre IV : Hydrochimie**

## **Introduction :**

L'hydrochimie est une branche des sciences de l'eau qui étudie la composition chimique des eaux (eaux de surface et eaux souterraines), ainsi que les processus physico-chimiques qui influencent leur qualité et leur évolution. Elle analyse notamment la présence et la concentration des éléments dissous, les interactions entre l'eau et les roches, ainsi que l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau.

Dans le cadre de ce travail, les données physico-chimiques ont été analysées sur une période s'étendant du 03.01.2004 au 01.07.2013.

### **A. L'hydrochimie de Ghar Boumaaza (partie 01) :**

#### **1. Balance Ionique :**

La balance ionique est une méthode de vérification, utilisée en hydrochimie pour évaluer la cohérence des analyses chimiques d'une eau. Elle repose sur le principe de l'électro neutralité, qui stipule que la somme des charges des cations (ions positifs) doit être égale à la somme des charges des anions (ions négatifs) dans une solution aqueuse.

La balance ionique est généralement exprimée en pourcentage selon la formule :

$$BI = \frac{|\sum r^+ - \sum r^-|}{|\sum r^+ + \sum r^-|} \times 100\%$$

BI : la Balance Ionique en %.

$r^+$  : quantité en réaction des cations (Meq/L).

$r^-$  : quantité en réaction des anions (Meq/L).

Si :

- $BI < 2\%$  Bonne analyse.
- $2\% < BI < 5\%$  Analyse acceptable.
- $BI > 5\%$  Mauvaise analyse.

#### **2. Etude des paramètres physico-chimiques :**

- Les paramètres physiques :
  - Le potentiel d'hydrogène.
  - La conductivité.
  - Le titre hydrotimétrique.

- Les paramètres chimiques :

Elles concernent les éléments majeurs :

- Les cations :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$
- Les anions :  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$

## 2.1. Les paramètres physiques :

### 2.1.1. Le potentiel d'hydrogène PH :

Il mesure l'activité chimique des ions hydrogènes en solution aqueuse, l'acidité, basicité d'une solution. La mesure du pH se fait à l'aide de pH-mètres électroniques ou de papier indicateur. Son contrôle est essentiel pour préserver la qualité de l'eau et éviter des déséquilibres écologiques. Il est un paramètre clé pour la potabilité de l'eau et le traitement des eaux.

$\text{PH} < 7$ , la solution est acide.

$\text{PH} = 7$ , la solution est neutre.

$\text{PH} > 7$ , la solution est basique.

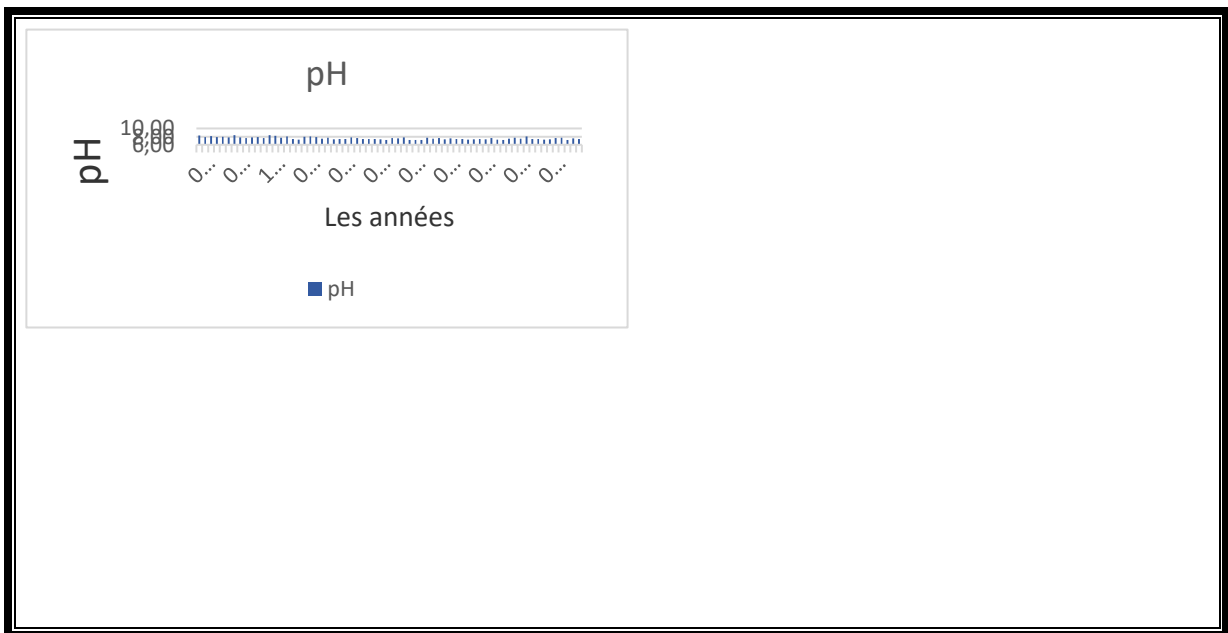


Figure. IV. 1 : Variation temporelle du PH.

D'après la figure 1, les valeurs du pH varient entre 7,16(04/04/09) et 8,4(02/10/04). Ce pH est majoritairement alcalin. Cette alcalinité est due à l'interaction de l'eau avec le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et les minéraux carbonatés du système de Ghar Boumaâza. L'eau, en absorbant du  $\text{CO}_2$  (de l'atmosphère ou du sol) forme de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Cependant, lorsque cet acide réagit avec les roches carbonatées, il dissout le calcium et le magnésium et forme des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). Les bicarbonates

Agissent comme un système tampon très efficace qui stabilise le pH de l'eau dans la plage alcaline.

### 2.1.2. La conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau est sa capacité à conduire le courant électrique. Elle dépend de la présence et de la concentration des ions dissous dans l'eau. Elle est exprimée en siemens par mètre (S/m) ou en microsiemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

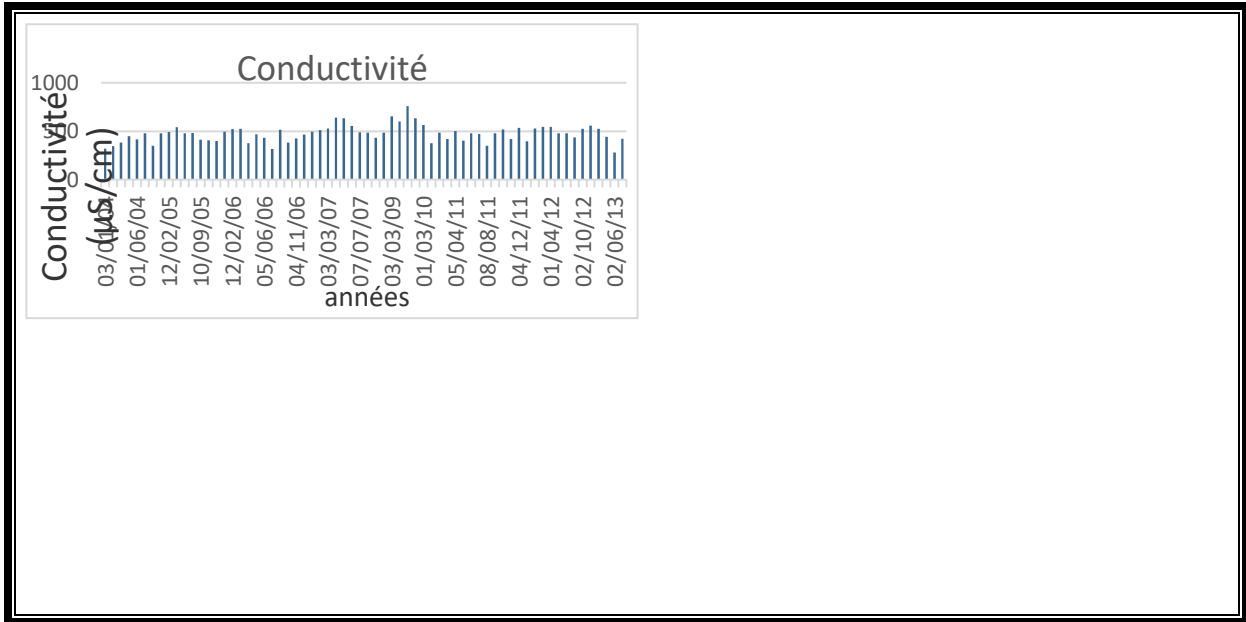


Figure. IV. 2 : Variation temporelle des conductivités électriques.

Les valeurs de la conductivité varient entre  $280 \mu\text{S}/\text{cm}$  (02/06/13) et  $760 \mu\text{S}/\text{cm}$  (04/04/09). En milieu karstique, la conductivité peut varier très rapidement, en réponse aux événements de précipitations : lors de fortes pluies ou de la fonte des neiges, l'eau s'infiltré rapidement dans le système sans avoir eu beaucoup de temps pour interagir avec la roche. Cette eau de surface, généralement moins minéralisée, peut provoquer une dilution de l'eau de l'aquifère, entraînant une baisse rapide de la conductivité. Par contre, pendant les périodes sèches, l'eau circule plus lentement, interagit plus longtemps avec la matrice rocheuse (calcaire/dolomie), et peut dissoudre davantage de minéraux. La conductivité tend à être plus élevée.

Aussi, l'hétérogénéité du système karstique (les différents drains ou conduits au sein d'un même système karstique) peut avoir des conductivités différentes en fonction de leur temps de résidence de l'eau, de leur cheminement et des roches traversées.

### 2.1.3. La minéralisation :

La minéralisation se réfère aux composants présents dans l'eau qui ont la capacité de se décomposer ou de se dissoudre (Rodier, J, 2009).

(Le tableau B en annexe) donne la valeur de la minéralisation et la classification de la conductivité de Ghar Boumaaza.

Tableau. IV. 1: Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier.J, 2009).

<i>Conductivité (μS/cm).</i>	<i>Minéralisation (mg/L).</i>
Conductivité<100	Très faible
100<Conductivité<200	Faible
200<Conductivité<333	Moyenne
333<Conductivité<666	Moyenne a accentuée
666<Conductivité< 1000	Importante
Conductivité> 1000	Elevée

Tableau. IV. 2 : Calcul de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier .J, 2009).

<i>Conductivités (μS/cm)</i>	<i>Minéralisations (mg/L)</i>
Conductivité<50	1,365079× Conductivités
50<Conductivité<166	0,947658×Conductivités
166<Conductivité<333	0,769574×Conductivités
333<Conductivité<833	0,715920×Conductivités
833<Conductivité<10000	0,758544×Conductivités
Conductivité>10000	0,850432×Conductivités

#### 2.1.4. La dureté totale (TH) :

La dureté totale d'une eau correspond à la concentration totale des ions calcium ( $Ca^{2+}$ ) et magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dissous. Elle s'exprime en mg/L de  $CaCO_3$  ou en degrés français (°F), où :

1°F (degré français) = 10 mg/L de  $CaCO_3$

Parfois, elle est aussi exprimée en mmol/L (1 mmol/L = 100 mg/L de  $CaCO_3$ ).

$$TH = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]$$

L'eau de pluie, naturellement chargée en dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) pour former de l'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ), s'infiltre dans les roches carbonatées. La réaction de dissolution qui résulte libère les ions calcium ( $Ca^{2+}$ ) et magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans l'eau

responsables de la dureté totale dans le karst et qui peut varier considérablement en fonction du régime hydrologique.

Tableau. IV. 3: Classification des eaux en fonction du titre hydrotimétrique.

TH (°F)	0 à 7	7 à 15	15 à 25	25 à 35	≥ 35
Eau	Très douce	Douce	Moyennement dure	Dure	Très dure

D'après les calculs de la dureté totale des eaux (tableau C en annexes), les valeurs sont comprises entre 152,21mg/L et 404mg/L en CaCO<sub>3</sub>. Les eaux sont classées entre moyennement dures, dures et très dures.

## 2.2. Les paramètres chimiques :

### 2.2.1. Les cations :

#### a) L'ion calcium (Ca<sup>2+</sup>) :

Provient de la dissolution des roches carbonatées (la calcite CaCO<sub>3</sub> et la dolomie (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) en particulier dans les régions karstiques comme celle de Tlemcen. Il joue un rôle important dans la dureté de l'eau, mesurée en fonction de sa concentration en ion Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>.

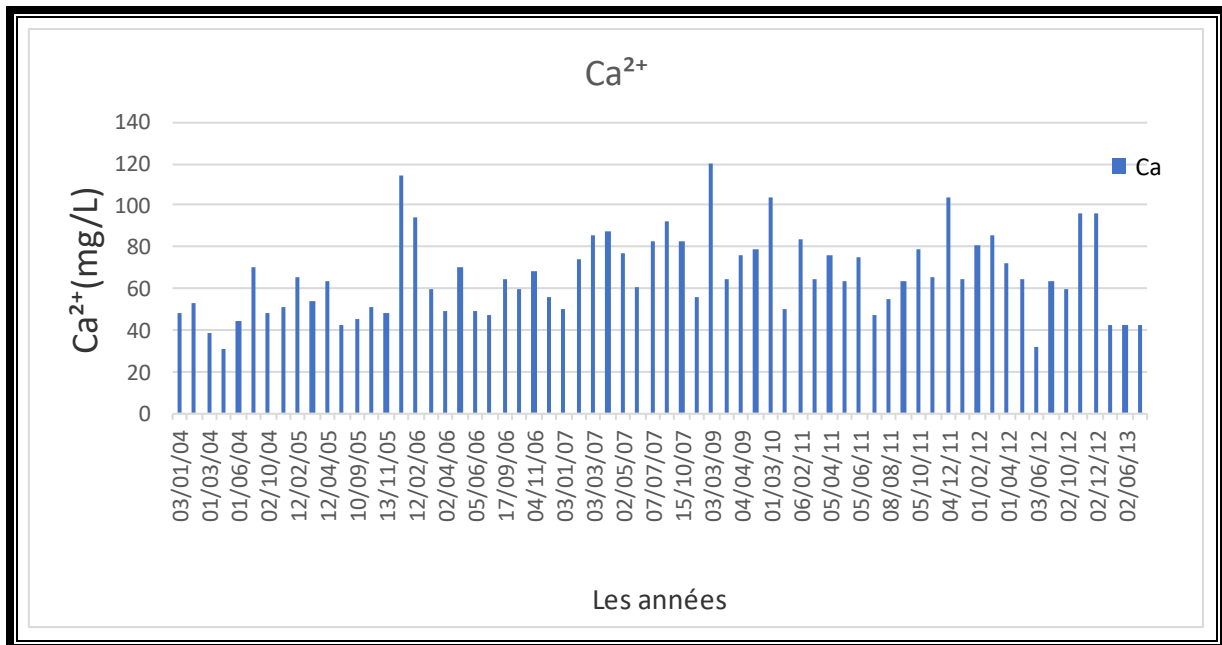


Figure. IV. 3 : Variation temporelle du calcium.

Les valeurs de Ca<sup>2+</sup> varient entre 31mg/L (03.05.2004) et 120mg/L (03.03.2009).

#### b) L'ion magnésium (Mg<sup>2+</sup>) :

Le magnésium est un ion présent dans les roches riche en Mg<sup>2+</sup> comme la dolomie, certains silicates (proxène, amphibole) et les évaporites consternant des sels et magnésium. Le rôle du magnésium est le même que pour le calcium.

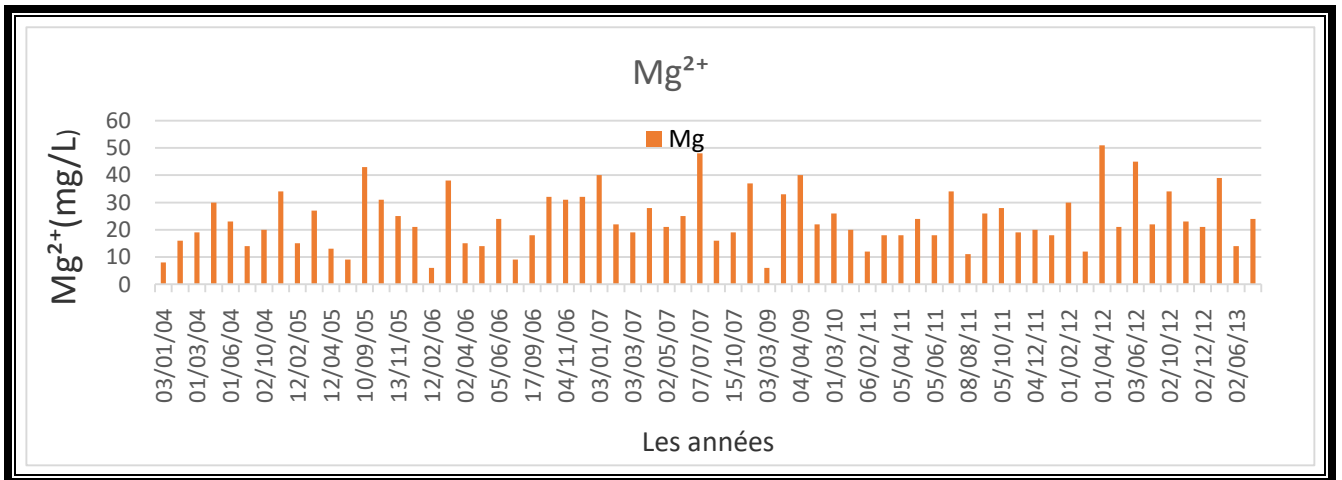


Figure. IV. 4 : Variation temporelle du Magnésium.

Les teneurs de  $Mg^{2+}$  varient entre 6mg/L (03.03.09) et 51mg/L (01.04.12).

**c) L'ion sodium ( $Na^+$ ) :**

Le sodium est un élément chimique issu principalement de l'altération des minéraux silicatés, la dissolution des évaporites et des activités anthropiques (engrais, les eaux usées domestiques comme les détergents...).

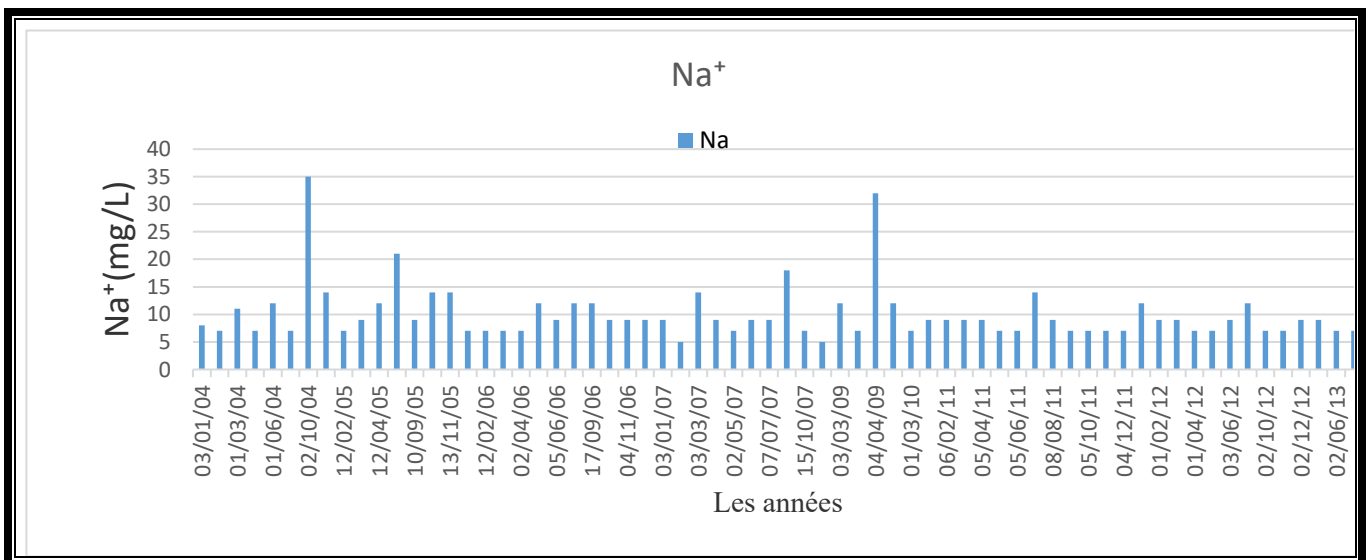


Figure. IV. 5 : Variation temporelle du Sodium.

Les valeurs sont comprises entre 5mg/L (04.11.07) et 35 mg/L (02.10.04).

**d) L'ion potassium ( $K^+$ ) :**

Le potassium est un cation qui se présente avec une faible concentration dans les eaux souterraines, il provient soit d'une activité humaine par l'usage d'engrais (L'excès d'engrais peut être lessivé et contaminer les eaux souterraines), des rejets domestiques ou

par la dissolution des minéraux argileux (Certaines argiles peuvent contenir du potassium et le libérer lors de processus d'altération ou d'échanges ioniques).

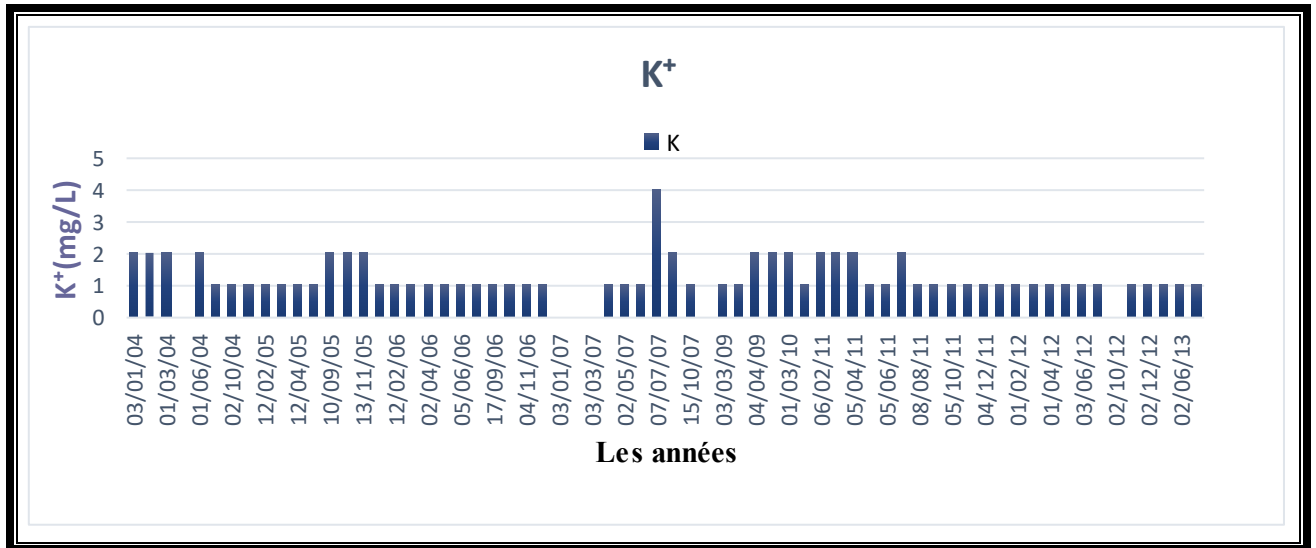


Figure. IV. 6 : Variation temporelle du Potassium.

Les valeurs de K<sup>+</sup> sont comprises entre 0mg/L et 2mg/L.

### 2.2.2. Les anions :

#### a) L'ion chlorure (CL<sup>-</sup>) :

Le chlorure est un anion soluble dans l'eau, chimiquement stable et non réactif. Il est un indicateur de salinité, traceur conservatif. La présence de chlorures dans l'eau est majoritairement due à la dissolution de dépôts salins, et aux activités humaines (rejets d'eaux usées, activités agricoles).

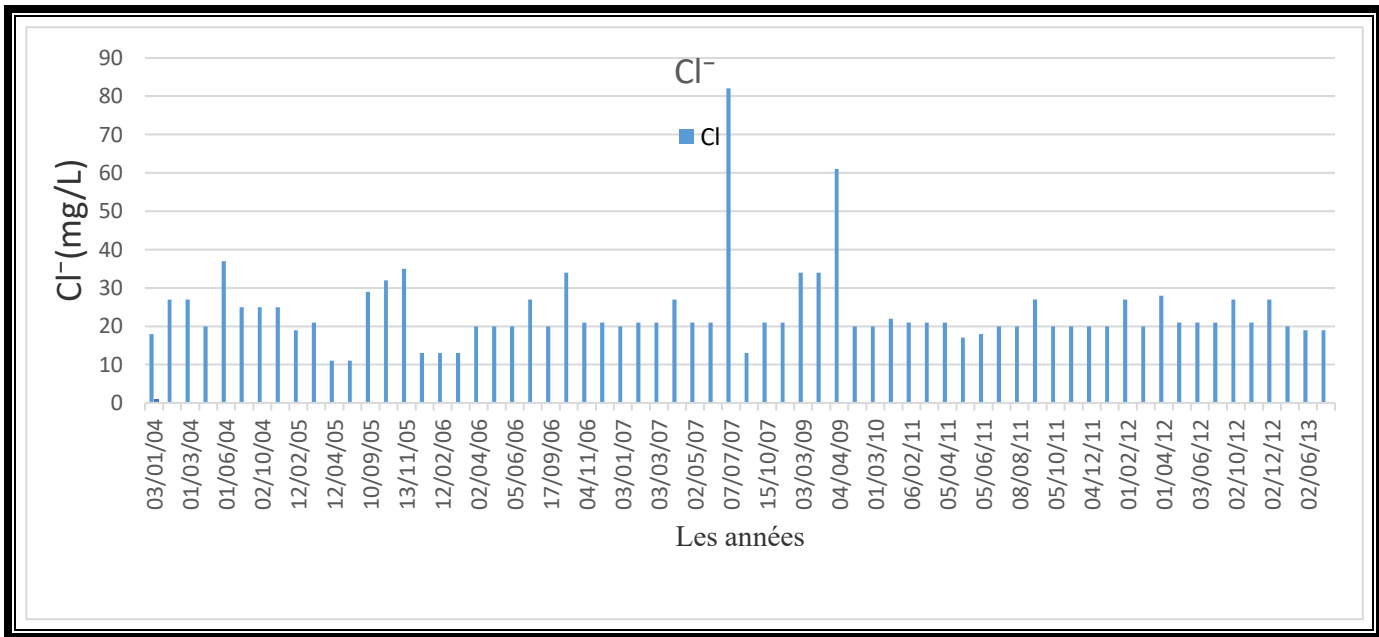


Figure. IV. 7 : Variation temporelle des Chlorures.

Les valeurs de Chlorure sont comprises entre 11 mg/L (12.04.05) (09.0505) et 82mg/L (07.07.07).

**b) L'ion sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) :**

Le sulfate est issu de la dissolution des minéraux sulfurés ou sulfatés et provient aussi des sources anthropiques (rejets domestiques et utilisation des engrais).

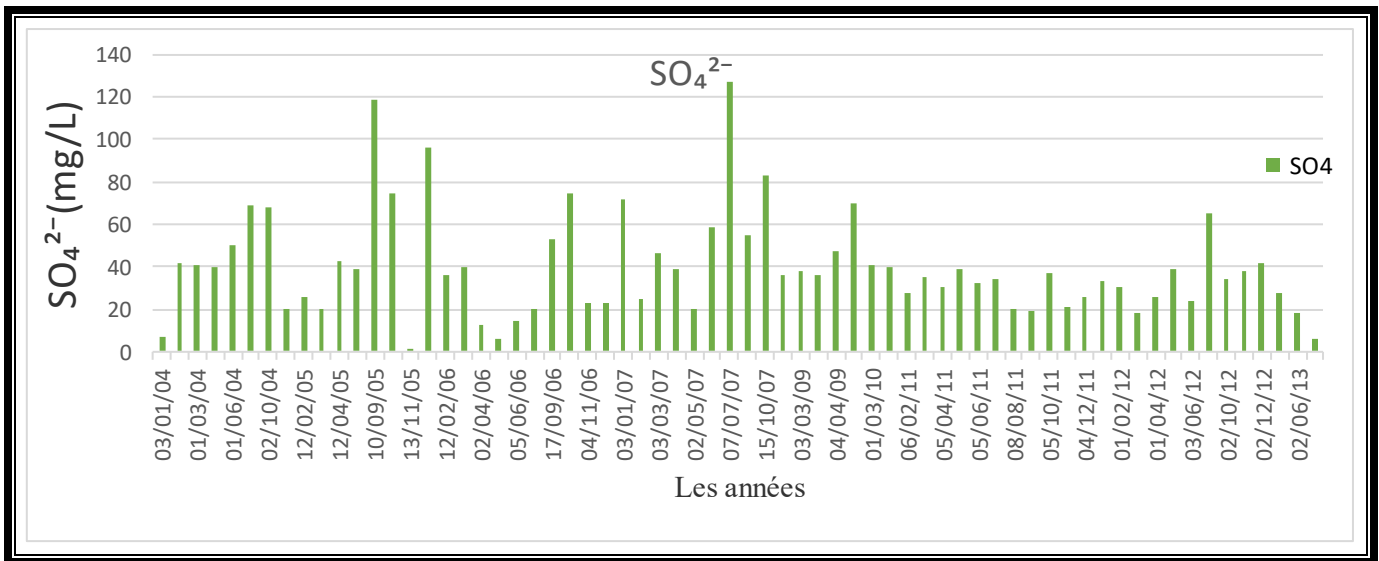


Figure. IV. 8 : Variation temporelle de Sulfate.

Les valeurs de sulfates varient entre 1mg/L (13.11.05) et 127mg/L (07.07.07).

**c) L'ion nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) :**

Les nitrates sont des indicateurs de pollution d'origine anthropique, liées à l'activité humaine (utilisation excessive des engrais et/ ou rejets domestiques).

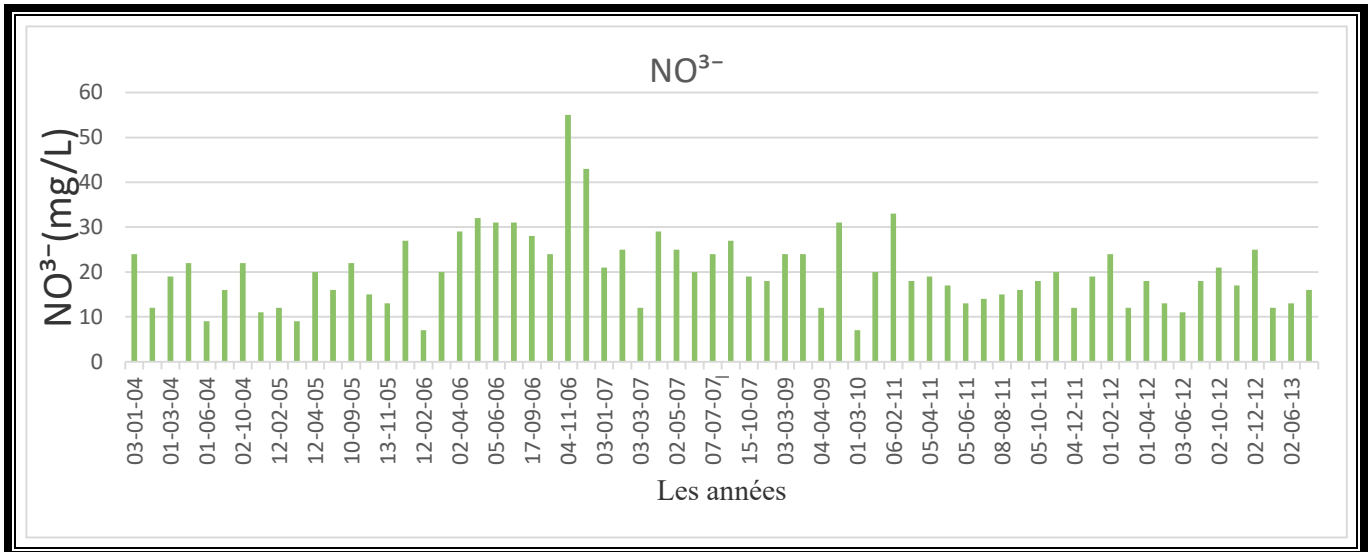


Figure. IV. 9 : Variation temporelle des Nitrates.

Les valeurs des nitrates sont comprises entre 7 mg/L (01.03.10) (12.02.06) et 55mg/L (04.11.06).

**d) L'ion Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) :**

L'ion bicarbonate dépend de la nature des formations traversées : Interaction avec les roches carbonatées (Calcaire et Dolomie), en particulier dans les régions karstiques comme Tlemcen (Ghar Boumaâza). L'eau chargée en acide carbonique entre en contact avec des roches riches en carbonates, telles que le calcaire (majoritairement composé de  $\text{CaCO}_3$ , carbonate de calcium) et la dolomie (composée de  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , carbonate de calcium et de magnésium).

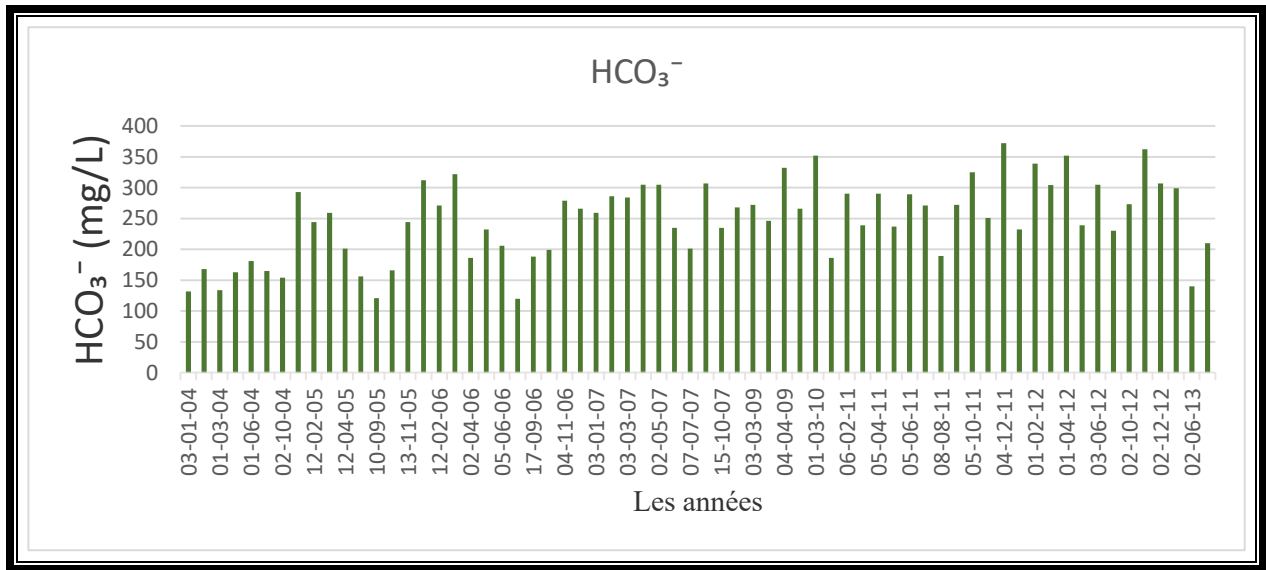


Figure. IV. 10 : Variation temporelle des Bicarbonates.

La valeur la plus basse est de 120mg/L (02.07.06) et la plus élevée est 362mg/L (04.11.12).

### 3. Classifications des eaux :

#### **Diagramme de Schoeller-Berkaloff :**

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure. IV. 11 (A, B, C)) montre que les eaux de Ghar Boumaâza ont deux types de faciès :

- **Facies Bicarbonaté calcique.**
- **Facies Bicarbonaté magnésien.**

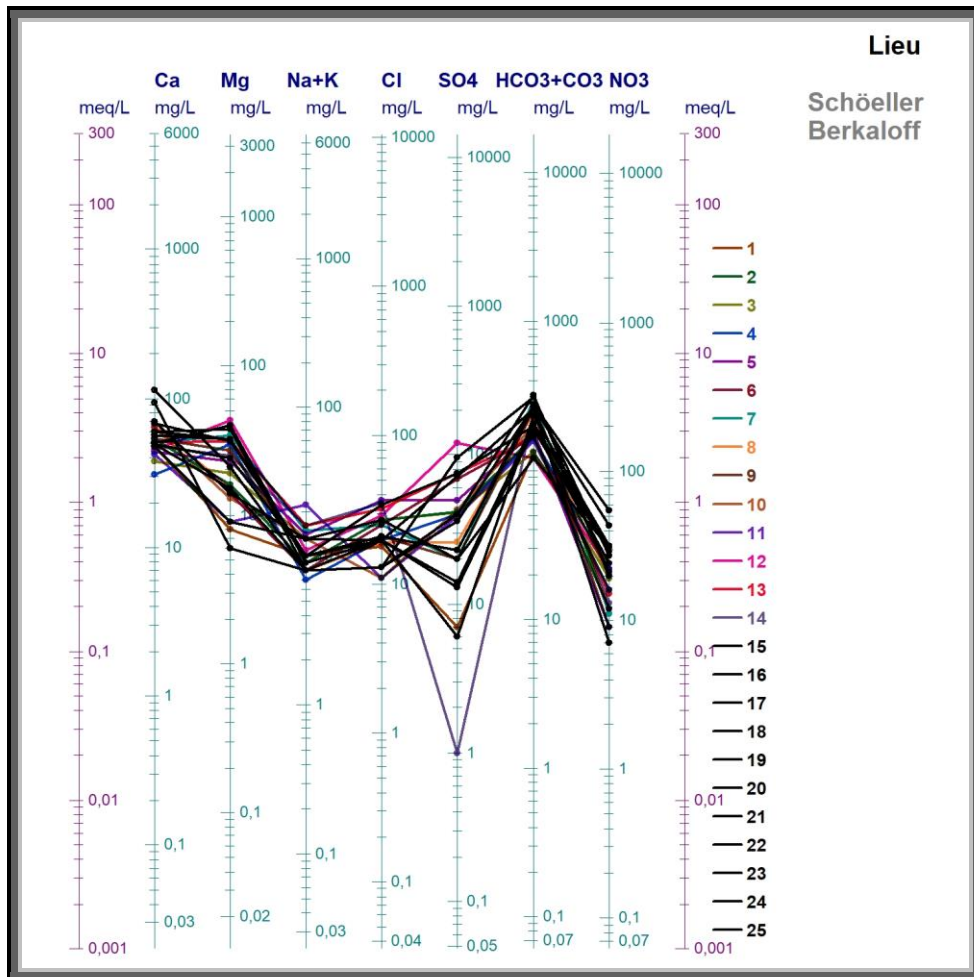


Figure A : Classification des eaux, selon Schoeller-Berkaloff.

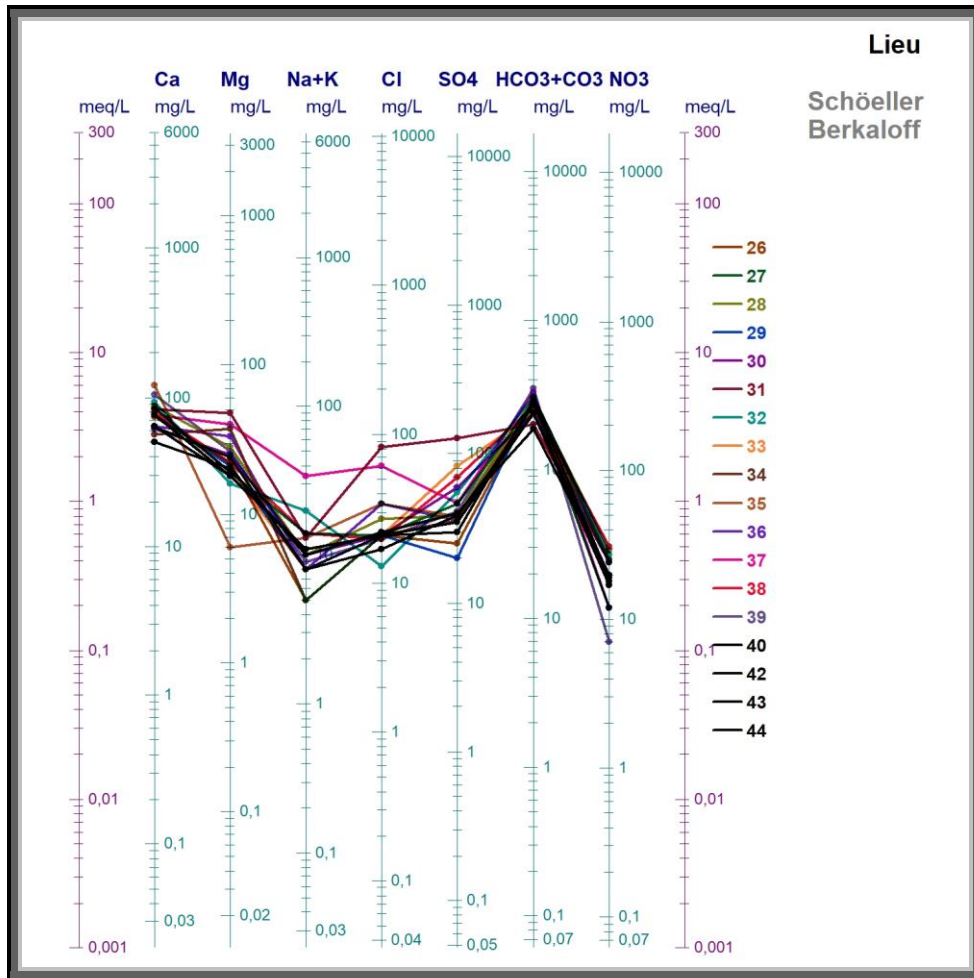


Figure B : Classification des eaux, selon Schoeller-Berkaloff.

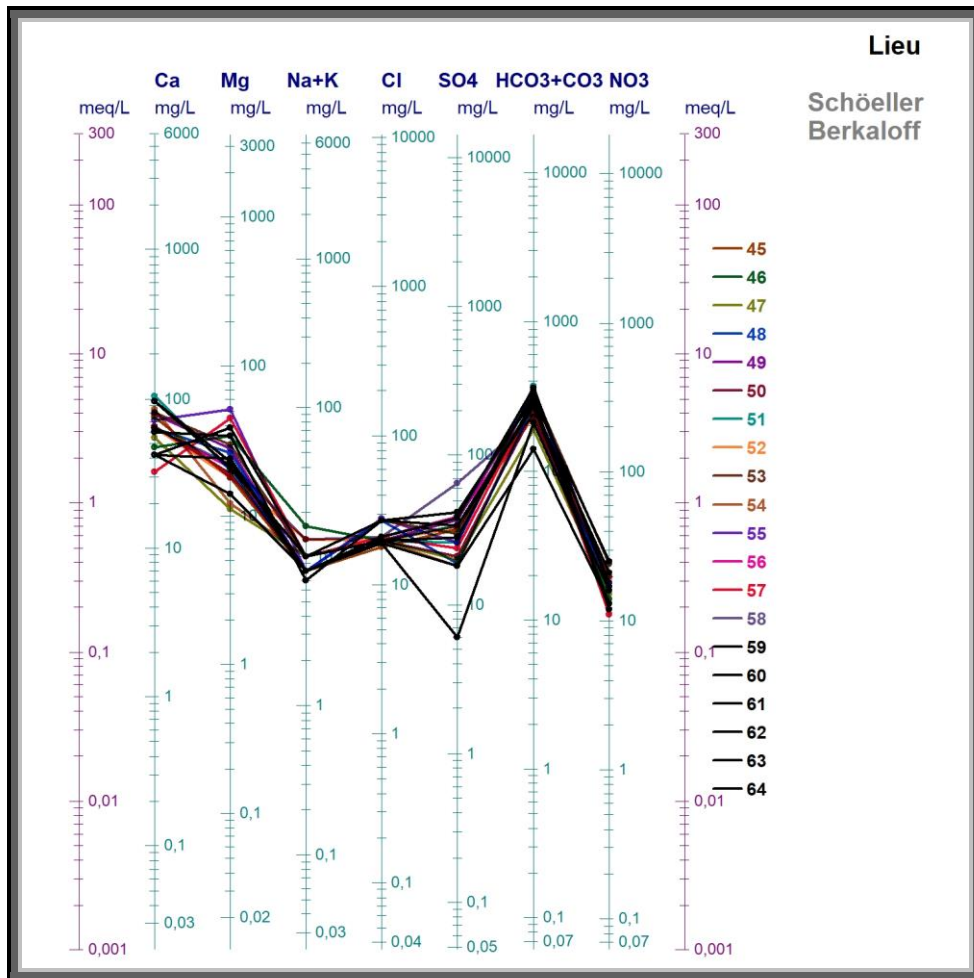


Figure C : Classification des eaux, selon Schoeller-Berkaloff.  
 Figure. IV. 11(A, B, C) : Classification des eaux, selon Schoeller-Berkaloff.

### 🚧 Diagramme logarithmique de Stabler :

Le diagramme de Stabler se caractérise par deux segments, un pour les cations et l'autre par les anions. Les concentrations sont en meq/L. Ce diagramme nous montre deux faciès : (Fig IV. 12(A, B, C)).

- Faciès bicarbonaté magnésien : correspond aux échantillons numérotés par : 4 ; 7 ; 12 ; 17 ; 25 ; 46 ; 55 ; 57 ; 62.
- Faciès bicarbonaté calcique : c'est le faciès le plus dominant et qui correspond au reste des échantillons.

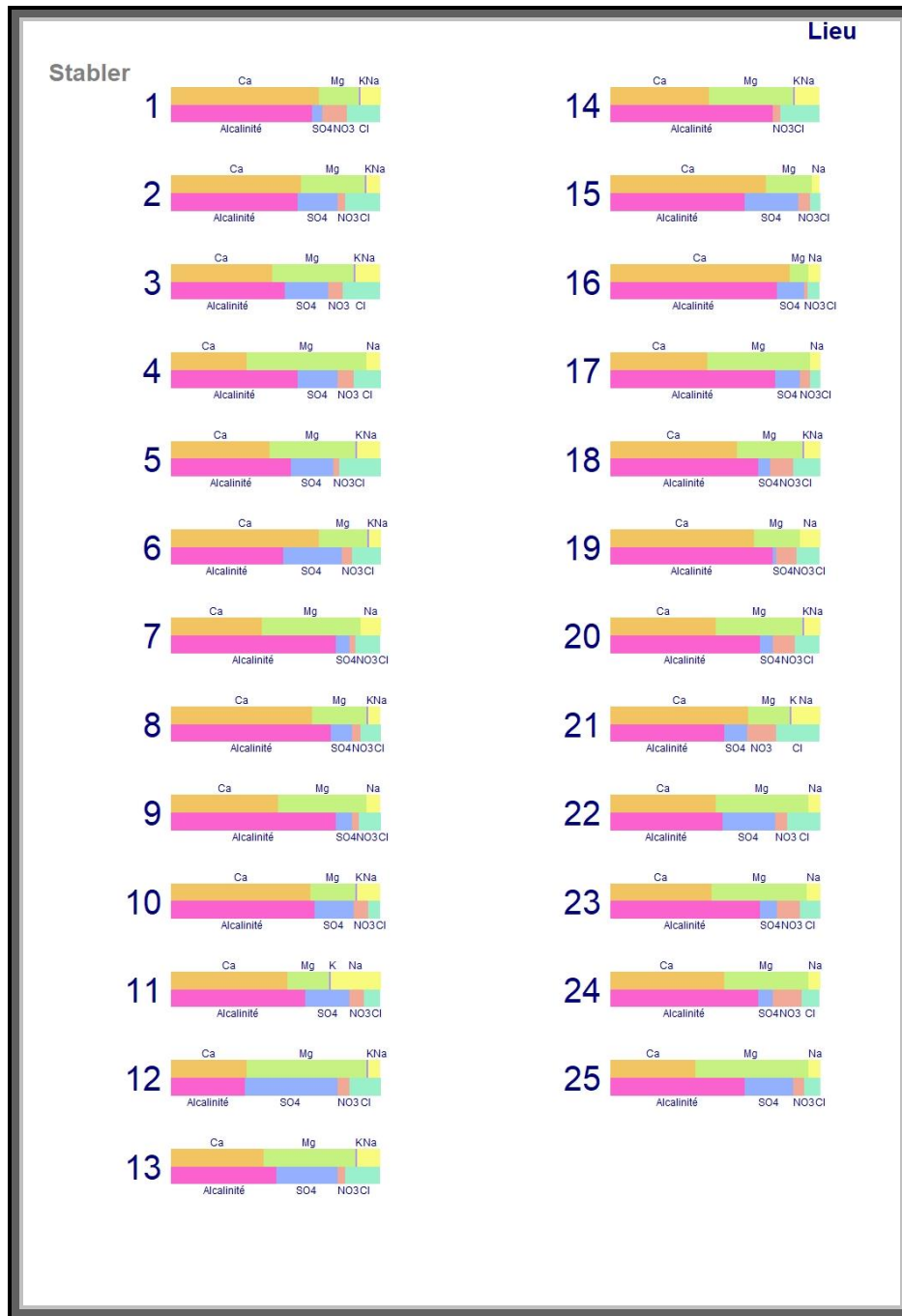


Figure A : Diagramme de Stabler.



Figure B : Diagramme de Stabler.

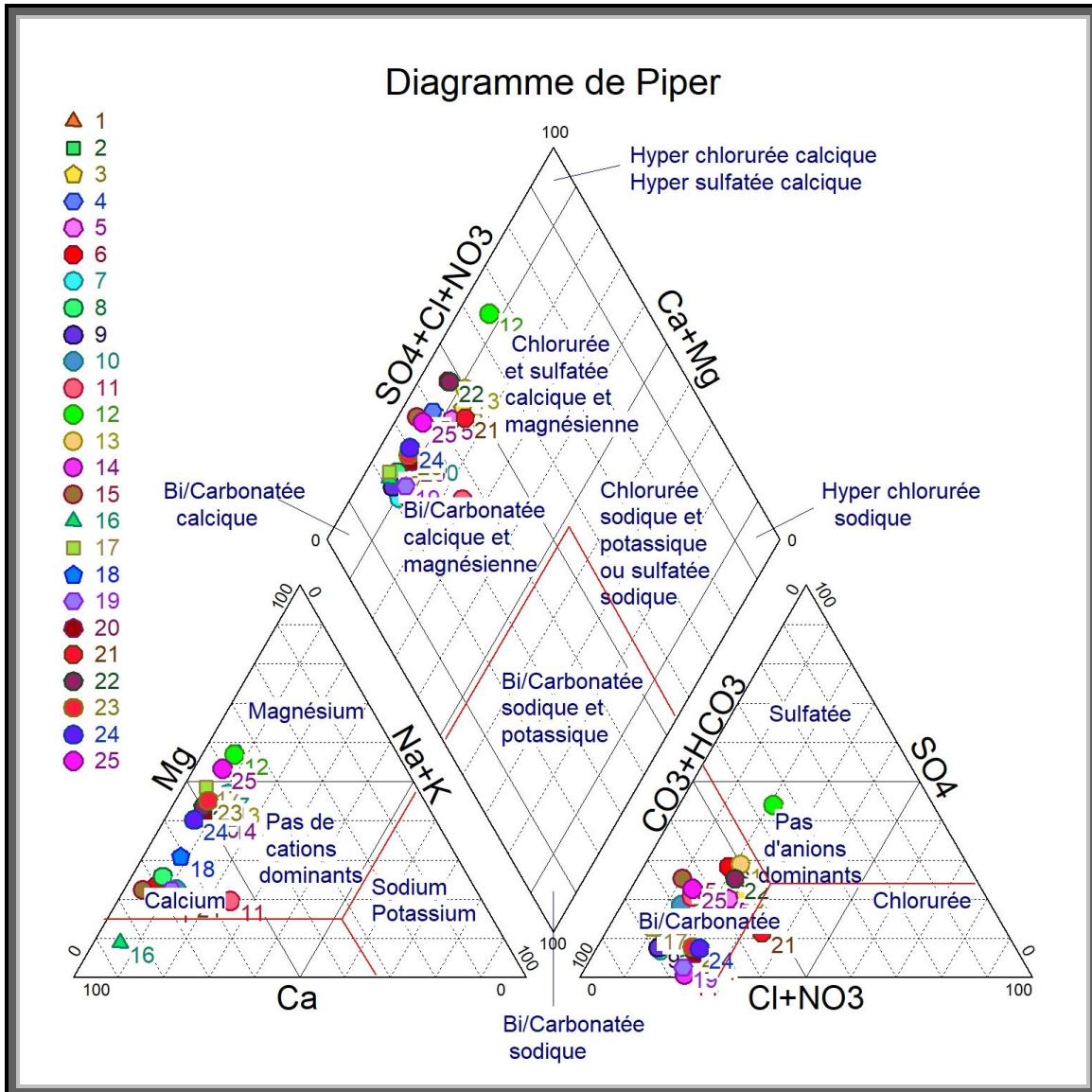


Figure C : Diagramme de Stabler.  
 Figure. IV. 12(A, B, C) : Diagramme de Stabler.

**✚ Diagramme de Piper :**

Le diagramme de Piper représente la chimie d'un ou plusieurs échantillons d'eau, il est constitué en trois parties :

1. Triangle gauche : représente les cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ).
2. Triangle droit : représente les anions ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ).
3. Losange : permet une classification synthétique des eaux en fonction de leurs faciès chimiques dominants. La position d'un point dans le losange indique le type chimique global de l'eau.



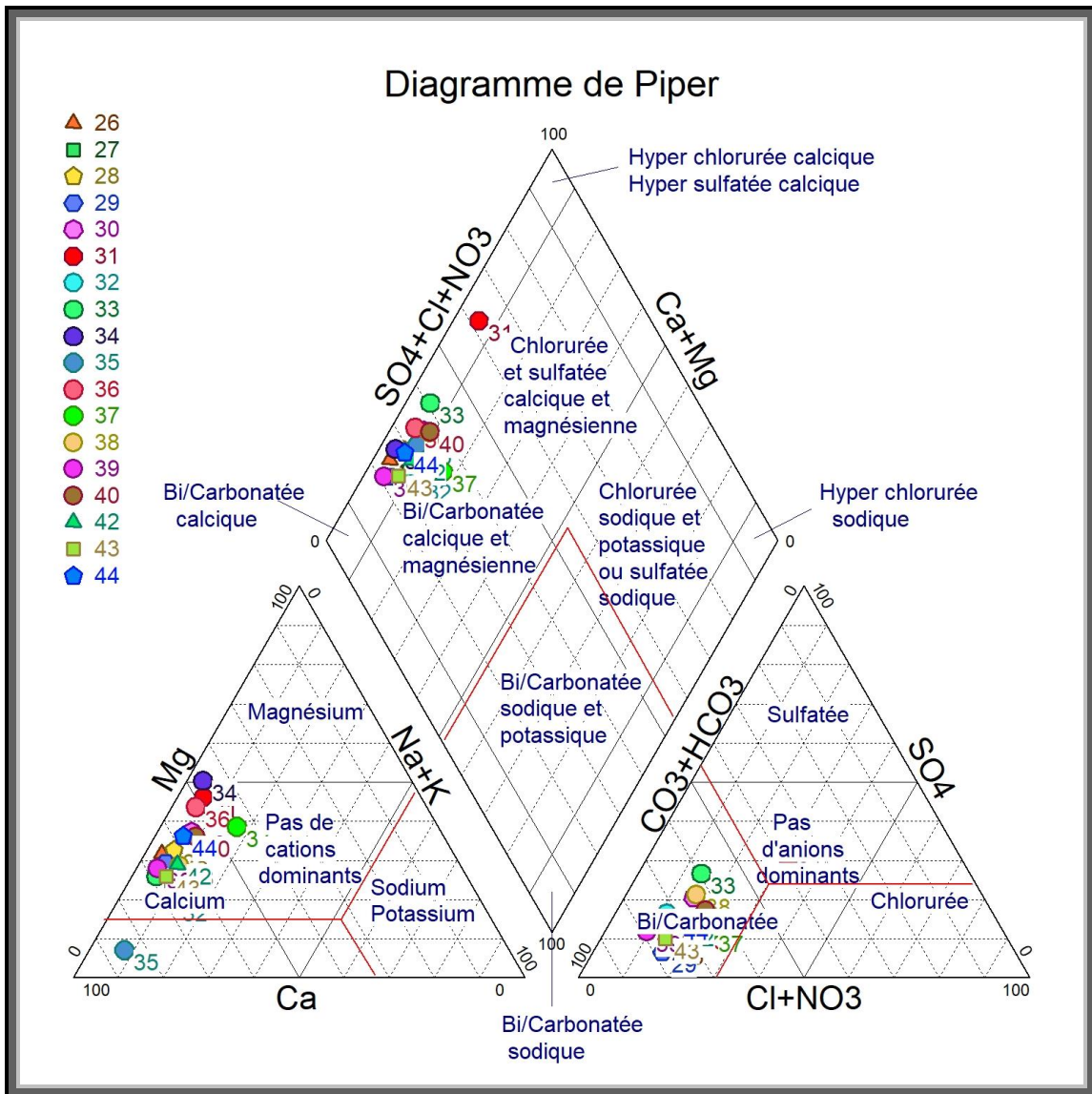


Figure B : Diagramme de Piper

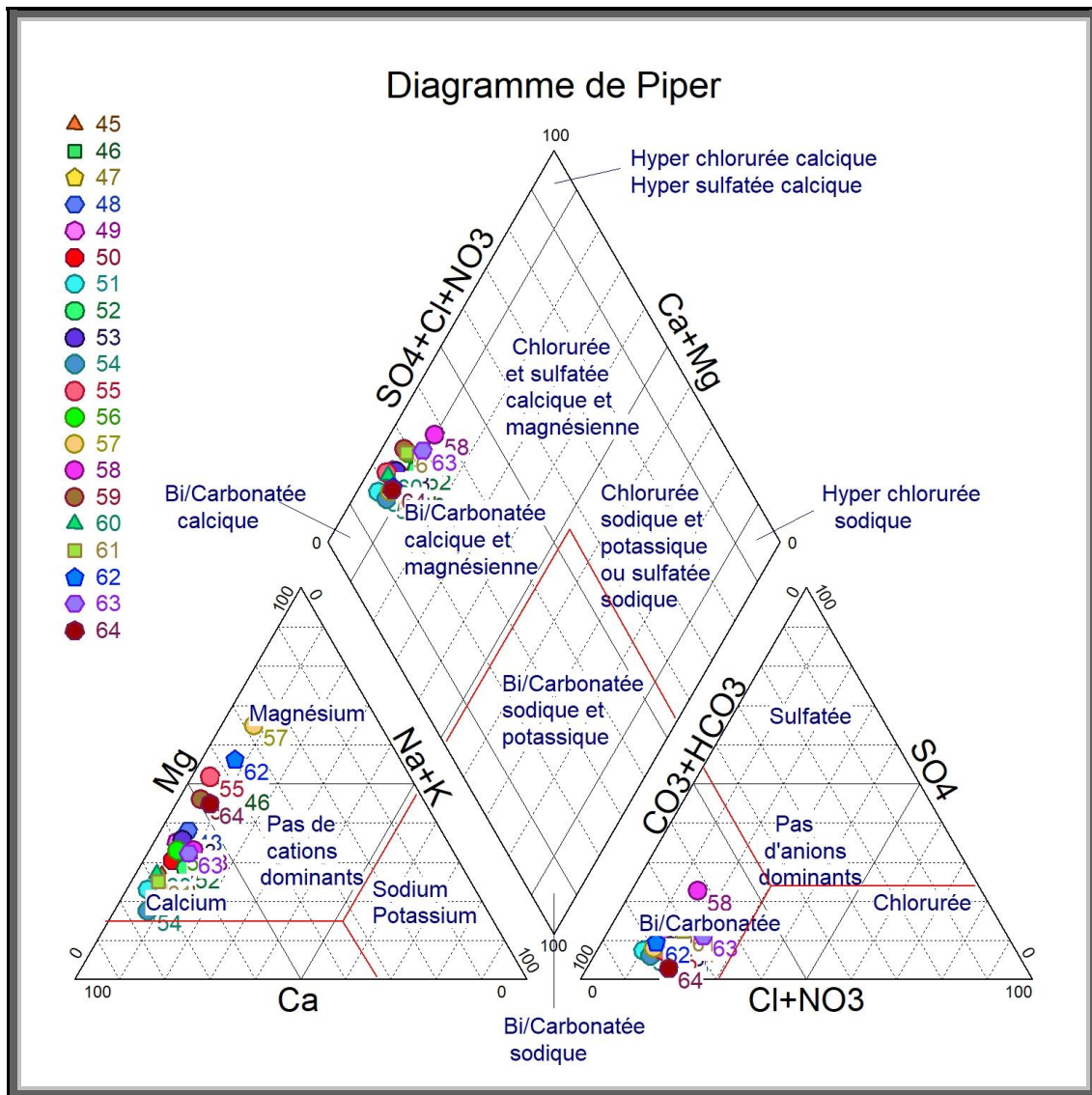


Figure C : Diagramme de Piper.  
 Figure. IV. 13(A, B, C) : Diagramme de piper.

Selon le diagramme de piper (fig IV. 13 (A, B, C)), Nous constatons que toutes les eaux ont un faciès **bicarbonaté calcique et magnésien**, à l'exception du l'échantillon numéro 12 daté du 09/0/2005, et l'échantillon numéro 31 daté 02/05/2007 qui se classent dans la famille **chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne**.

#### 4. Aptitude des eaux destinées à l'irrigation :

##### 4.1. Indice de Kelly's Ratio :

Exprimé par la formule suivante :

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Si :

- $KR < 1$  : l'eau est bonne pour l'irrigation.
- $KR > 1$  : l'eau est mauvaise pour l'irrigation.
- Les concentrations de  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  sont en Meq/L.

Les résultats de l'indice de KR (tableau D en annexes) montrent des valeurs qui varient entre 0,05 et 0,21 qui sont inférieures à 1. Donc, elles sont bonnes pour l'irrigation.

#### 4.2. Pourcentage en sodium %Na<sup>+</sup>:

L'utilisation agricole de l'eau nécessite un taux de sodium inférieur à 60% (limite maximale admise). (Rodier.J, 1996, in Keddah.K, Medjahdi.N, 2018). Ce pourcentage est donné par la formule suivante :

$$\%Na^+ = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$$

Tableau. IV. 4 : classification des eaux d'irrigation selon le %Na<sup>+</sup>.

Classe	Très bonne	Bonne	Admissible	Médiocre	Mauvaise
%Na <sup>+</sup>	< 20	20-40	40-60	60-80	> 80

D'après les résultats de calcul du % Na<sup>+</sup> (tableau E en annexes) on observe que le taux de sodium est inférieur à 60%. Ce qui exprime que les eaux sont bonnes à très bonnes pour l'irrigation.

#### 4.3. Classification de Wilcox :

En 1954, Wilcox a conçu un schéma en prenant en compte le pourcentage de sodium et la conductivité électrique, établissant ainsi cinq classes d'eau (excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise) (Medjahedi.N, Keddah.K, 2018).

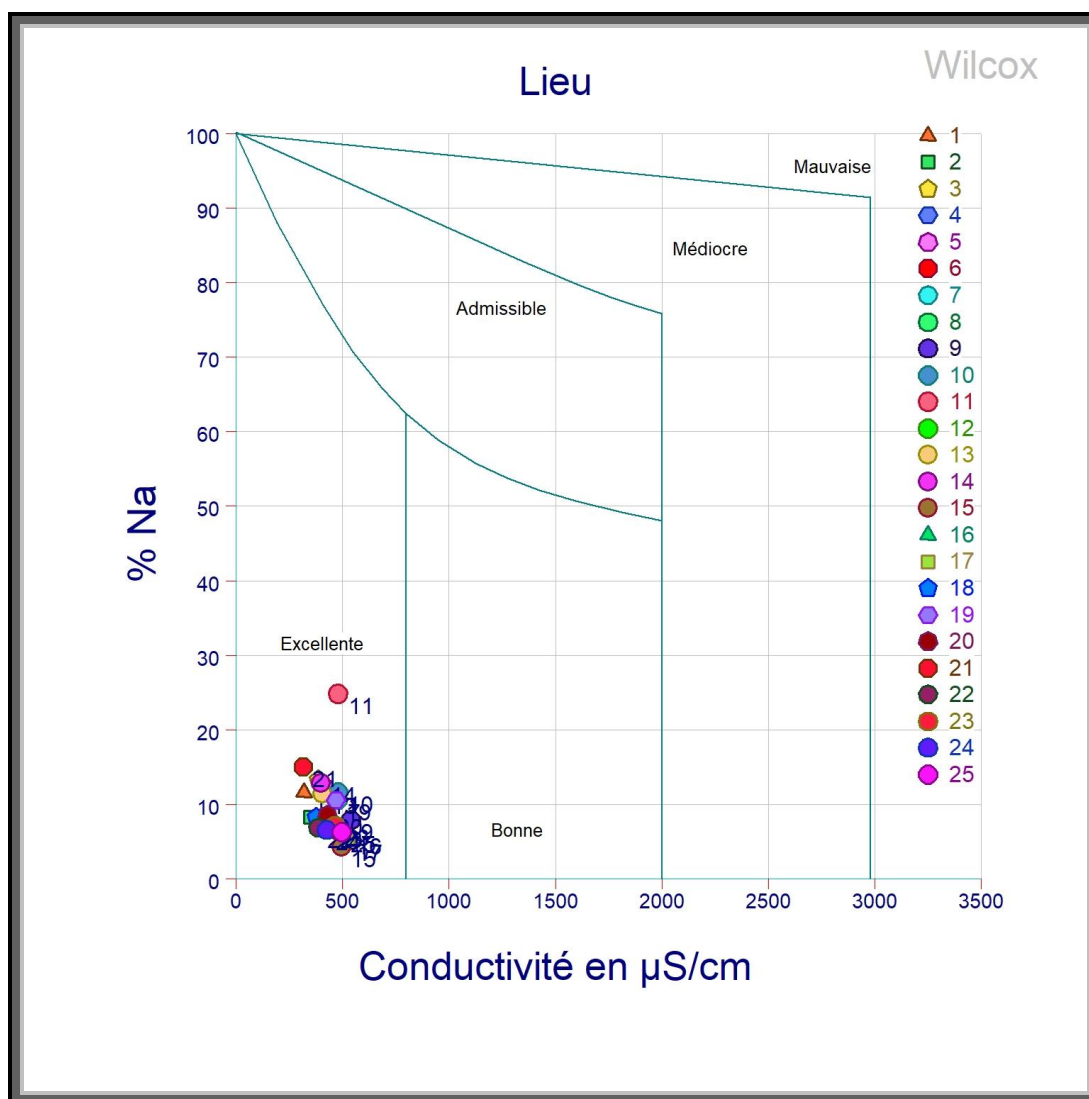


Figure A : Diagramme de Wilcox.

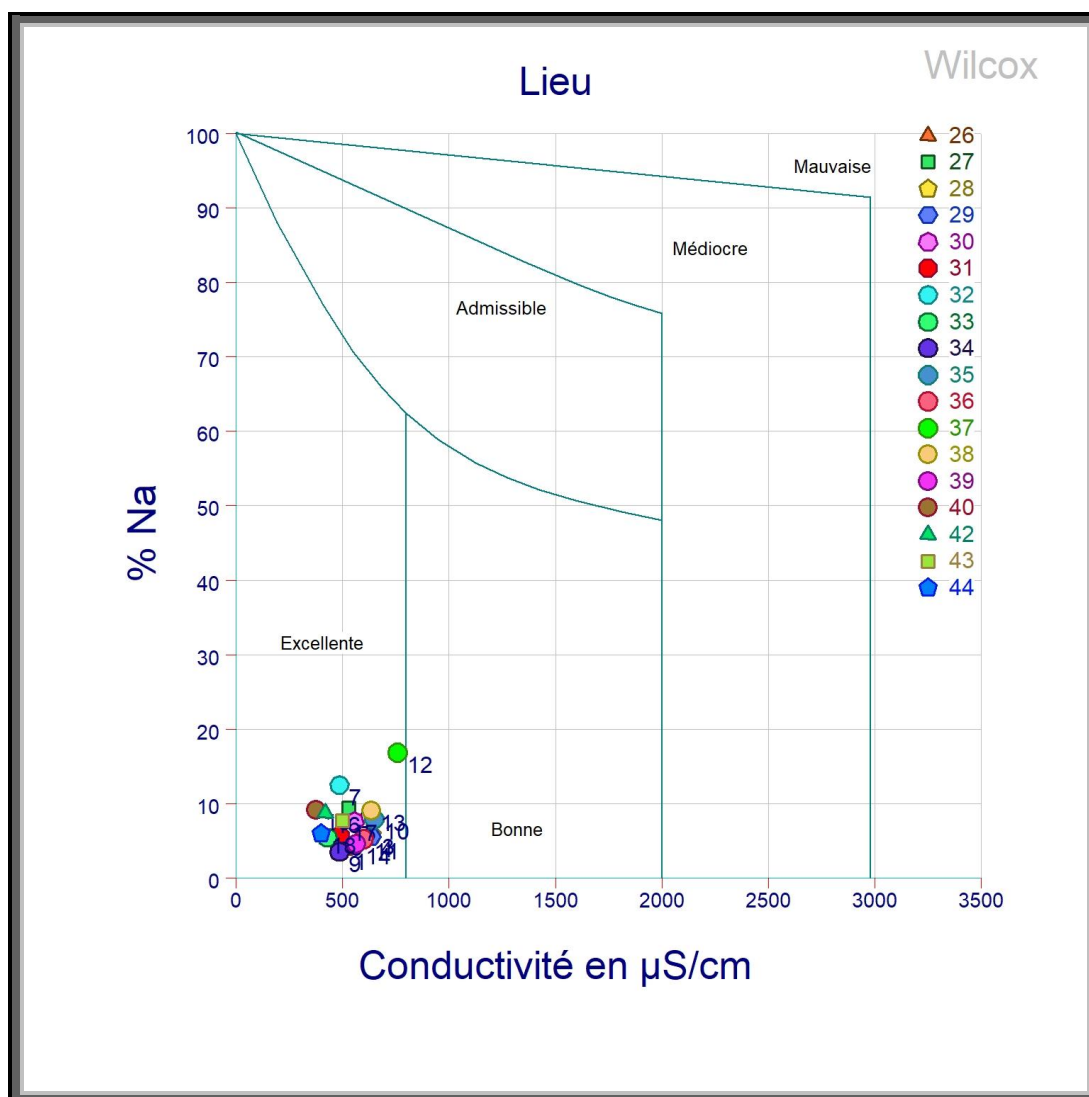


Figure B : Diagramme de Wilcox.

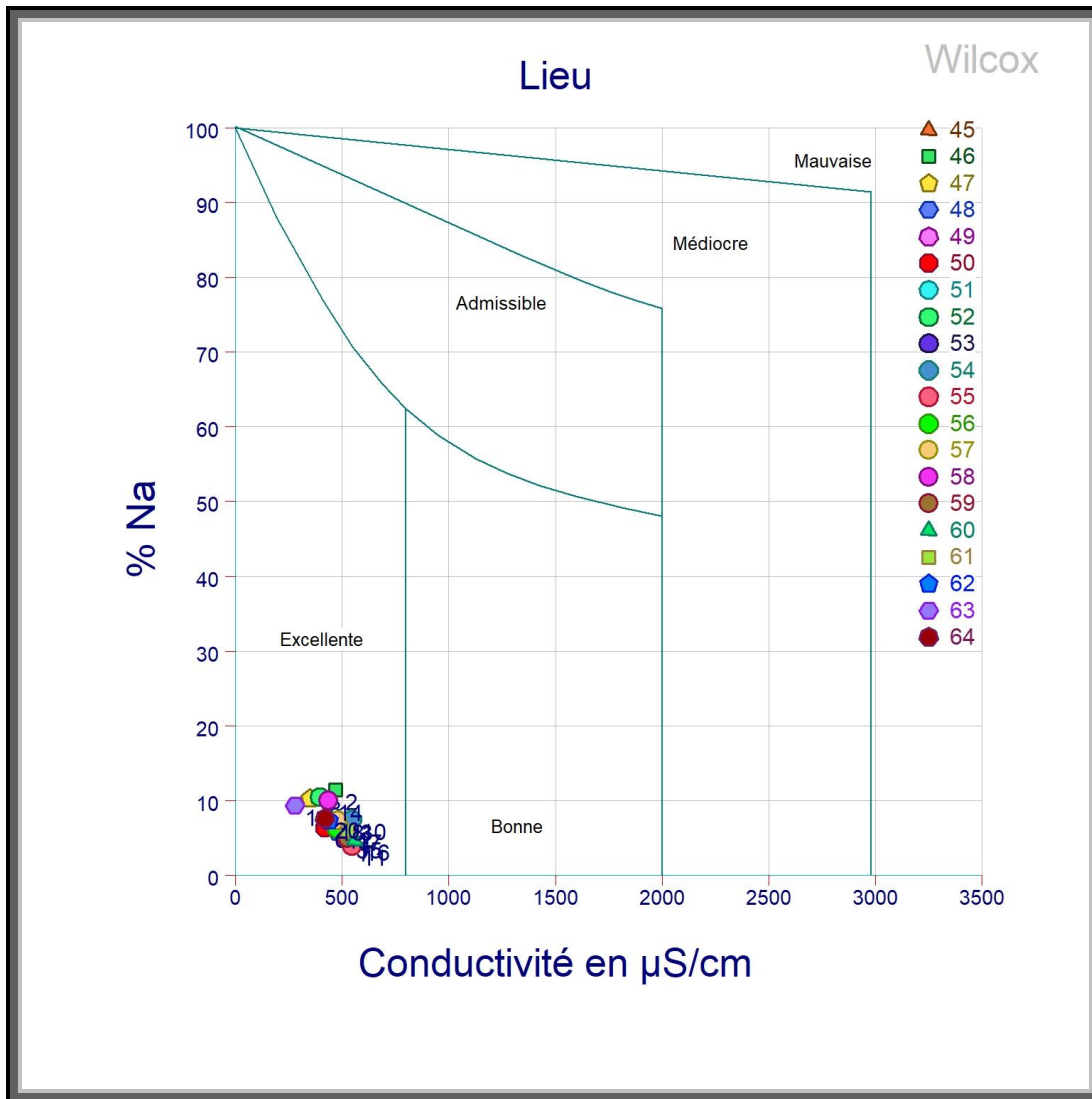


Figure C : Diagramme de Wilcox.

Figure. IV. 14(A, B, C) : Diagramme de Wilcox.

Le diagramme de Wilcox exprime que les eaux de Ghar Boumaaza sont excellentes pour l'irrigation

#### 4.4.Sodium Alkalinity Ratio (SAR) :

Le SAR exprimé par l'équation suivante :

$$S.A. R = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^2}{2}}}$$

- SAR < 10 : eau excellente, faible danger d'alcalisation des sols.
- 10 < SAR < 18 : eau de bonne qualité, danger d'alcalisation assez appréciable.
- 18 < SAR < 26 : eau convenable, danger d'alcalisation important.
- SAR > 26 : Eau de qualité médiocre, danger de forte alcalisation

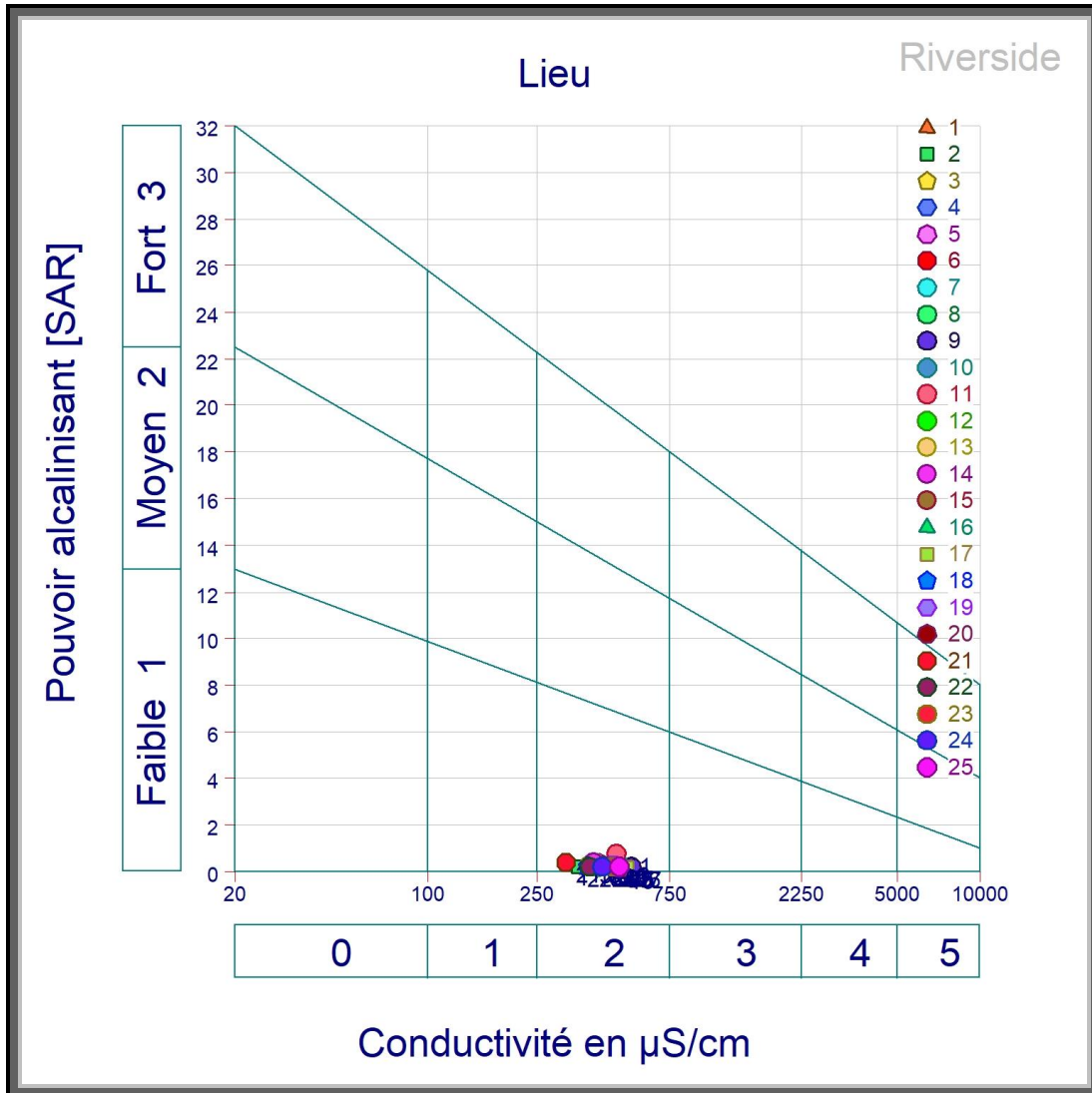


Figure A : Diagramme de Riverside.

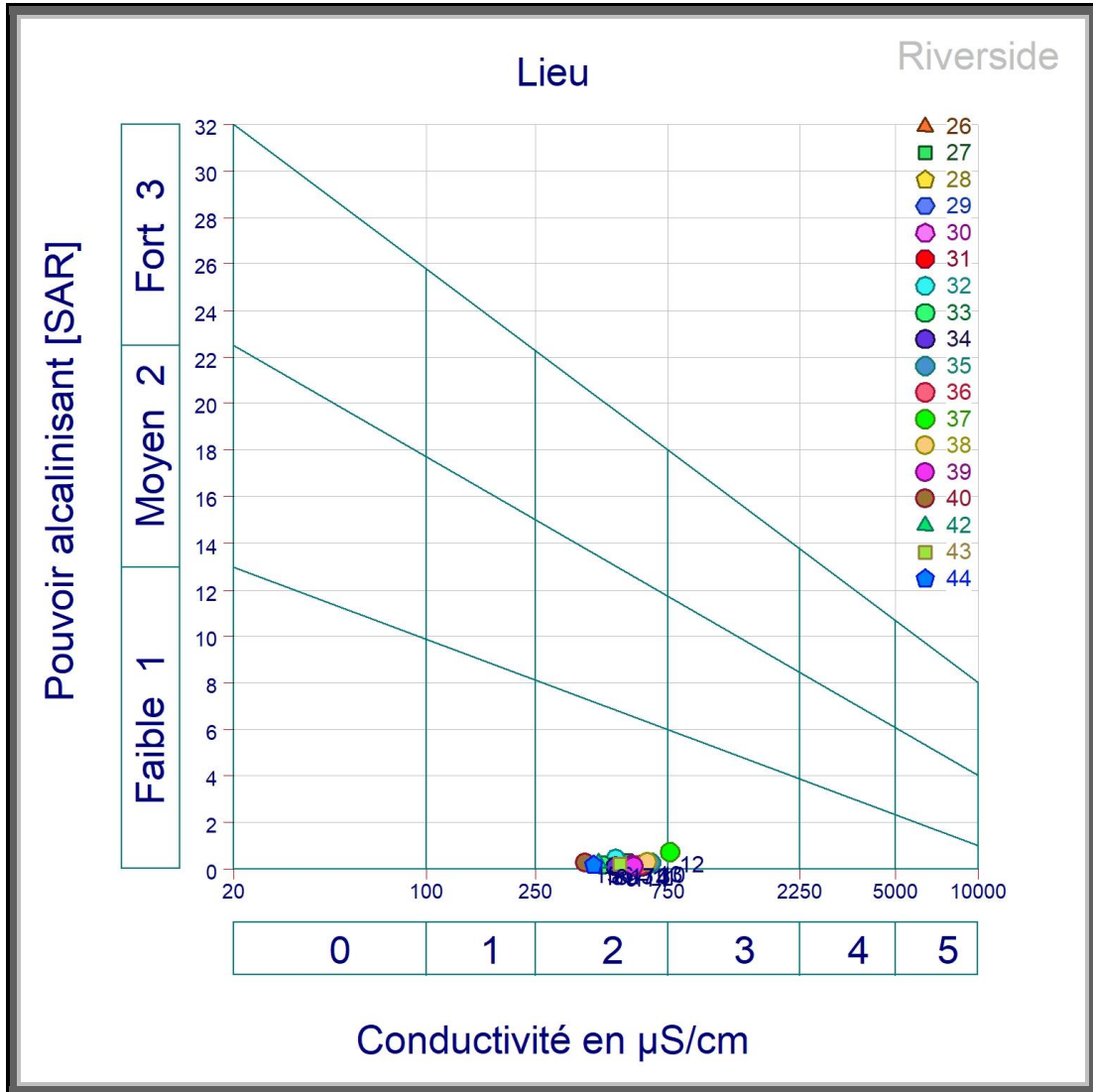


Figure B : Diagramme de Riverside.

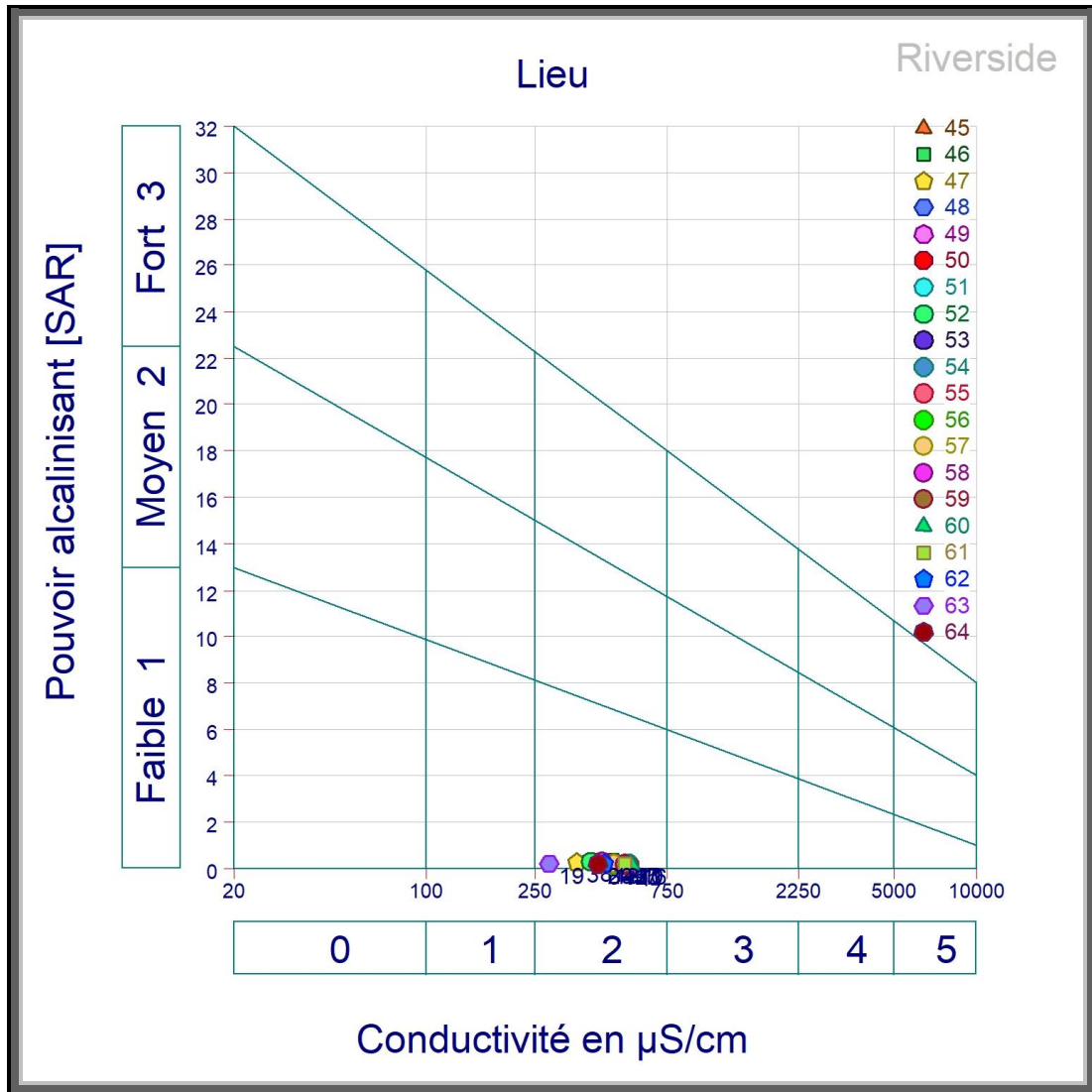


Figure C : Diagramme de Riverside.

Figure. IV. 15(A, B, C) : Diagramme de Riverside.

Le diagramme de Riverside montre que toutes les eaux sont dans la classe C2-S1 (bonnes pour l'irrigation), sauf l'échantillon 12 qui est classé en C3-S1 (admissible pour l'irrigation).

## 5. L'origine de la minéralisation :

L'étude des eaux souterraines a considérablement évolué, passant des techniques graphiques conventionnelles à des approches statistiques multivariées (Piper, 1944 ; Schoeller, 1962 ; Stiff, 1951). Ces méthodes statistiques offrent des informations plus approfondies et plus précises sur la composition chimique des eaux souterraines. L'analyse de corrélation permet d'évaluer la relation entre les variables, d'identifier les origines similaires des éléments et de déterminer les processus de contrôle courants. L'analyse en composantes principales (ACP) simplifie et classe les données, en identifiant les variables les plus importantes et en suivant les sources d'éléments, grâce à l'utilisation de la matrice de corrélation (Abdi et Williams, 2010 ; Granato et coll., 2018 ; Hasan et Abdulazeez, 2021).

Étant donné que la composition chimique de l'eau souterraine est également le résultat de la contribution de plusieurs facteurs, les différents types d'interactions eau-roche peuvent être considérés comme des facteurs. En revanche, les degrés d'interaction peuvent être considérés comme des contributions. De plus, la relation entre les paramètres hydrochimiques individuels a été déterminée à l'aide de l'analyse de corrélation de Pearson. L'analyse en composantes principales (ACP) était la principale méthode d'extraction de l'analyse factorielle. L'analyse factorielle a été effectuée en calculant d'abord le tableau des coefficients de corrélation (matrice de corrélation) pour tous les paramètres hydrochimiques à l'aide du logiciel XLSTAT.

L'analyse descriptive des éléments chimiques des eaux de Ghar Boumaâza a révélé que la majorité des coefficients de variation sont inférieurs à 50 % (tableau IV. 5), ce qui indique une homogénéité prononcée de la concentration de ces éléments dans la zone d'étude, à

l'exception des sulfates, potassium et sodium. Cette hétérogénéité pourrait être attribuée aux facteurs anthropiques influençant la composition chimique des eaux. En revanche, les bicarbonates et le calcium présentent les plus faibles variations dans le temps, suggérant une distribution spatiale relativement homogène. Cette consistance peut indiquer une source ou un processus plus uniforme, régissant la dissolution des formations carbonatées

Tableau. IV. 5: coefficient de variation.

Variable	Minimum	Maximum	CV%
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	120	372	25.32
CL <sup>-</sup>	11	82	44.29
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	07	55	42.34
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	01	127	<b>64.11</b>
Ca <sup>2+</sup>	31	120	29.87
Mg <sup>2+</sup>	06	51	42.81
Na <sup>+</sup>	05	32	43.05
k <sup>+</sup>	0	04	<b>55.97</b>

**a) Indice de saturation :**

**IS=LogK–Log (pi) avec,**

**K** : constante d'équilibre.

**Pi** : produit ionique.

**Si :**

**IS**<-0,5 : eau est sous saturée

**-0,5 < IS < 0,5** : eau est en équilibre avec la roche

**IS > 0,5** : Eau est sursaturée

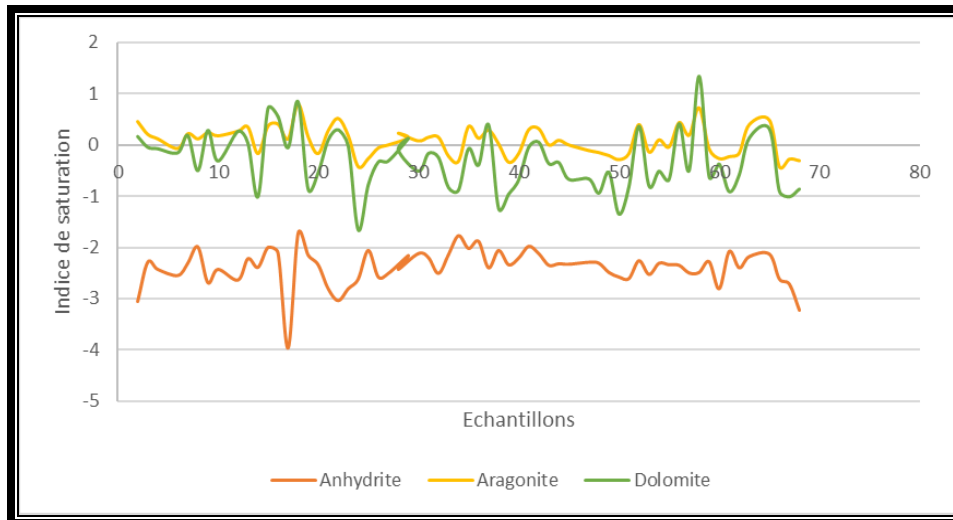


Figure. IV.16: graphe d'indice de saturation.

Le graphique montre que l'eau est sous-saturée en anhydrite, ce qui signifie que ce minéral a tendance à se dissoudre. L'aragonite présente des indices proches de l'équilibre, indiquant qu'elle peut précipiter ou se dissoudre selon les conditions. En revanche, la dolomite est généralement sursaturée, ce qui favorise sa précipitation. Ces résultats traduisent une interaction chimique variable entre l'eau et les minéraux présents dans le milieu.

### b) L'analyse corrélatoire :

La matrice de corrélation du tableau n° IV. 6 révèle des relations faiblement à moyennement significative, cela est due à la variation de temps de séjour des eaux dans l'aquifères. Ces eaux sont connues lors de leurs émergence par de forte concentration et de faible débit, suivie par de forte concentration et de fort débit (effet piston), ensuite de fort débit et de faible concentration (mélange entre les eaux anciennes et les eaux nouvellement infiltrées) et enfin de faibles débits et des concentrations relativement fortes.

La corrélation moyennement significative entre  $(Ca^+/HCO_3^-)$  est due à la dissolution des formations carbonatées, tandis que la corrélation entre le  $K^+/Cl^-$  est due aux facteurs anthropiques.

Tableau. IV. 7 : corrélation entre les éléments chimiques majeurs.

Variables	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	1							
Mg <sup>2+</sup>	-0,215	1						
Na <sup>+</sup>	-0,047	0,018	1					
K <sup>+</sup>	0,042	0,086	0,299	1				
Cl <sup>-</sup>	0,058	<b>0,433</b>	<b>0,316</b>	<b>0,548</b>	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,208	<b>0,311</b>	0,088	<b>0,341</b>	<b>0,386</b>	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,63</b>	0,29	-0,029	-0,181	-0,074	-0,163	1	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,065	0,044	-0,059	-0,059	-0,003	0,044	-0,078	1

### c) Analyse factorielle :

Principal component analysis (PCA).

L'analyse en composantes principales (ACP) effectuée sur 64 échantillons d'eau dans la zone d'étude a révélé huit variables, les quatre premiers facteurs représentant 76,354 % de la variance totale, offrant une compréhension complète des processus de minéralisation dans le système aquifère (tableau n°03). Le facteur 1 (F1), qui représente 27,667 % de la variance est principalement influencé par les éléments chimiques Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, indiquant l'axe de la minéralisation des sels et du sulfate, soulignant le rôle significatif de ces ions dans la minéralisation des eaux souterraines.

Le facteur 2 (F2) et le F3, représentés respectivement par 20,652% et 14,605 % de la variance et sont définis par HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>, mettant en évidence les processus géochimiques de dissolution des formations carbonatées, riches en bicarbonates, du calcium et du magnésium. Le facteur 4 (F4), représenté par 13,43% de la variation, bien défini par le NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, indiquant la présence du facteur anthropique dans cette minéralisation.

Tableau. IV. 8 : pourcentage de factures cumulées

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
<b>Valeur propre</b>	2,213	1,652	1,168	1,074	0,88	0,609	0,378	0,025
<b>Variabilité (%)</b>	27,667	20,652	14,605	13,43	11,006	7,612	4,722	0,306
<b>% cumulé</b>	27,667	48,319	62,924	<b>76,354</b>	87,36	94,971	99,694	100

Tableau. IV. 9 : contributions des variables

	F1	F2	F3	F4
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	-0,001	<b>0,668</b>	-0,357	0,285
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,336	0,165	<b>0,711</b>	-0,29
<b>Na<sup>+</sup></b>	0,313	-0,071	-0,403	-0,27
<b>K<sup>+</sup></b>	<b>0,5</b>	-0,072	-0,328	0,067
<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>0,575</b>	0,05	0,039	-0,052
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>0,446</b>	0,098	0,085	0,351
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,097	<b>0,71</b>	0,078	-0,279
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,007	0,012	0,288	<b>0,744</b>

## **B. L'hydrochimie de la source d'Ain Taga :**

Ain Taga est une source karstique qui représente l'exutoire principal du vaste système karstique de Ghar Boumaâza, une grotte célèbre pour sa morphologie et son réseau souterrain complexe. Cette source est située à environ 500 mètres en aval de la grotte, agissant comme le point de sortie principal des eaux qui s'écoulent à travers le réseau souterrain de Ghar Boumaâza. Ain Taga est réputée pour être une source permanente avec un débit significatif (peut atteindre 35L/s), ce qui témoigne de l'importance du bassin d'alimentation karstique. Le débit peut varier en fonction des saisons et des précipitations (Bensaoula.F,2006), mais cette source maintient généralement un flux constant.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source d'Ain Taga, afin d'évaluer son état de santé environnemental, tout en cherchant à comparer ses caractéristiques avec celles des eaux de la grotte de Ghar Boumaâza. Cela permettra de mieux comprendre les similitudes et les spécificités entre ces deux résurgences, tout en contribuant à la préservation et à la gestion durable de ces ressources hydriques vitales.

Pour cela, les données physico-chimiques ont été interprétées sur une période s'étendant du 19.05.2014 au 14.05.2025 et comparées aux normes algériennes de potabilité. L'analyse bactériologique date de l'année 2025.

### **1. Balance Ionique :**

La balance ionique est généralement exprimée en pourcentage selon la formule :

$$BI = \frac{|\sum r+ - \sum r-|}{|\sum r+ + \sum r-|} \times 100\%$$

BI : la Balance Ionique en %.

r+ : quantité en réaction des cations (Meq/L).

r- : quantité en réaction des anions (Meq/L).

Si :

- BI < 2% Bonne analyse.
- 2% < BI < 5% Analyse acceptable.
- BI > 5% Mauvaise analyse.

Les calculs de la balance ionique (tableau F en annexes) montrent qu'elle est bonne à acceptable.

## 2. Etude des paramètres physico-chimiques :

### 2.1. Les paramètres physiques :

#### 2.1.1. Le potentiel d'Hydrogène pH :

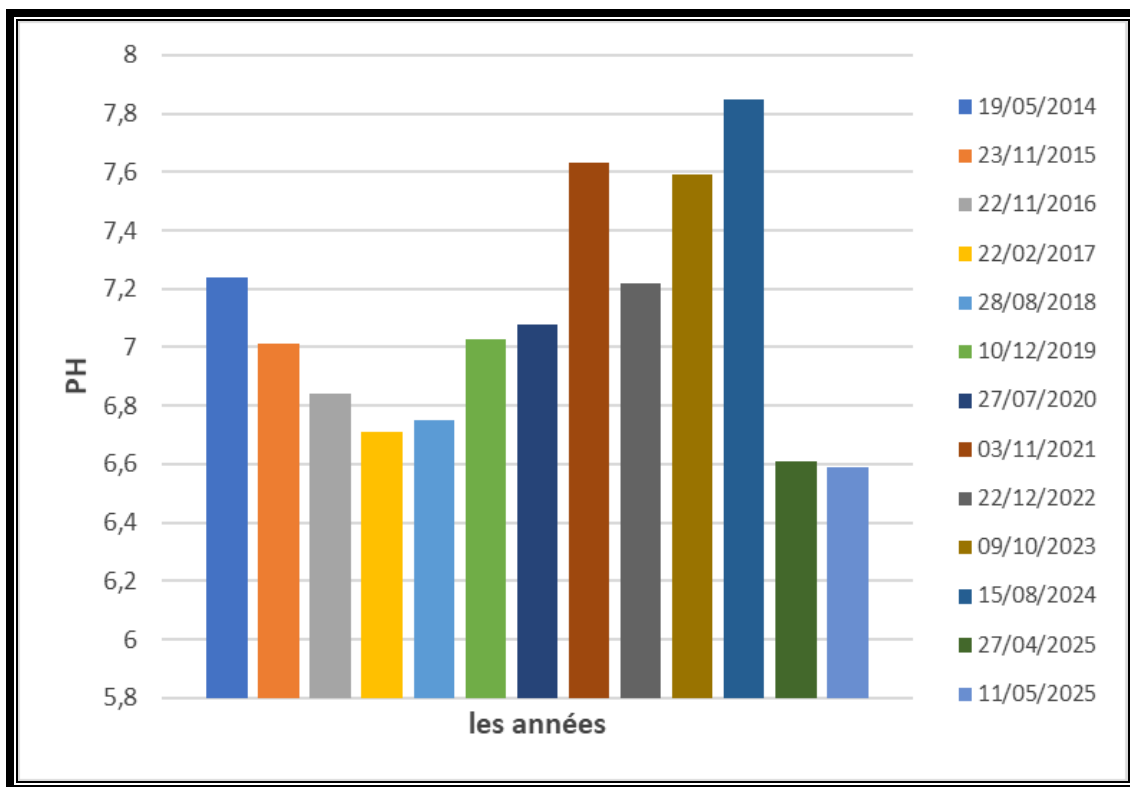


Figure. IV.17: variation temporelle de PH.

Ce graphique présente l'évolution du pH mesuré à Ain Taga à différentes dates, s'étalant de mai 2014 à mai 2025. Les valeurs du pH varient entre **6.6** (28/08/2024) et **7.85**, (27/07/2020). Elles sont inférieures à la norme algérienne de potabilité ( $\geq 6,5$  et  $\leq 9$ ).

### 2.1.2. La conductivité électrique :

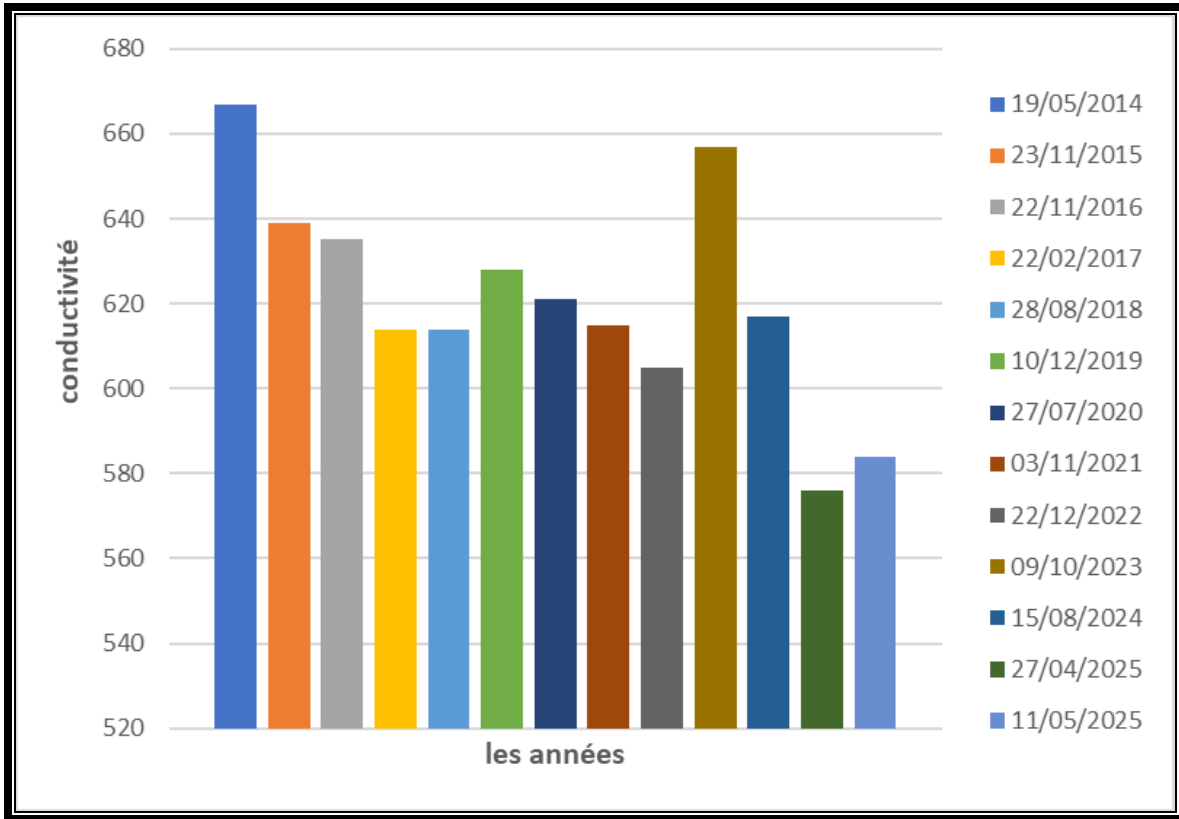


Figure. IV.18: Variation temporelle de Conductivités électriques.

Ce graphique illustre la variation de la conductivité électrique. On observe une fluctuation significative durant cette période d'étude, avec une valeur maximale de 665  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (19-05-2014) et minimale de 575  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces valeurs sont au-dessous de la norme (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### 2.1.3. La Minéralisation :

Selon les résultats du tableau ci-dessous, la minéralisation d'Ain Taga est classée entre moyenne à accentuée. Pour un seul échantillon, elle est classée importante

Tableau IV. 9 : Minéralisation et classification des eaux.

Date	Conductivité	Minéralisation	Classement
19/05/2014	667	477.7	Importante
23/11/2015	639	457.47	Moyenne à accentué
22/11/2016	635	454.57	Moyenne à accentué
22/02/2017	614	439.57	Moyenne à accentué
28/08/2018	614	439.57	Moyenne à accentué
10/12/2019	628	449.60	Moyenne à accentué
27/07/2020	621	444.59	Moyenne à accentué
03/11/2021	615	440.29	Moyenne à accentué
22/12/2022	605	433.11	Moyenne à accentué
10/09/2023	657	470.36	Moyenne à accentué
15/08/2024	617	441.72	Moyenne à accentué
27/04/2025	576	412.37	Moyenne à accentué
11/05/2025	584	418.10	Moyenne à accentué

#### **2.1.4. La dureté totale (TH) :**

Les eaux de la source d'Ain Taga présentent une dureté totale de 292 mg/L à 364.5 mg/L en CaCO<sub>3</sub>. Ces eaux sont considérées comme dures à très dures.

## Chapitre IV : hydrochimie

Tableau IV. 10 : Valeurs et classifications de la dureté totale.

Date	TH(F°)	THmg/L en CaCO <sub>3</sub>	Classifications
19/05/2014	33,95	339,5	Dure
23/11/2015	34,215	342,15	Dure
22/11/2016	35,25	352,5	Très dure
22/02/2017	29,35	293,5	Dure
28/08/2018	36,45	364,5	Très dure
10/12/2019	32,25	322,5	Dure
27/07/2020	30,4	304	Dure
03/11/2021	29,2	292	Dure
22/12/2022	31,25	312,5	Dure
09/10/2023	29,2	292	Dure
15/08/2024	29,75	297,5	Dure
27/04/2025	32,35	323,5	Dure
11/05/2025	32,1	321	Dure

2.2. Les paramètres chimiques :

2.2.1. Les cations :

a) L'ion calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) :

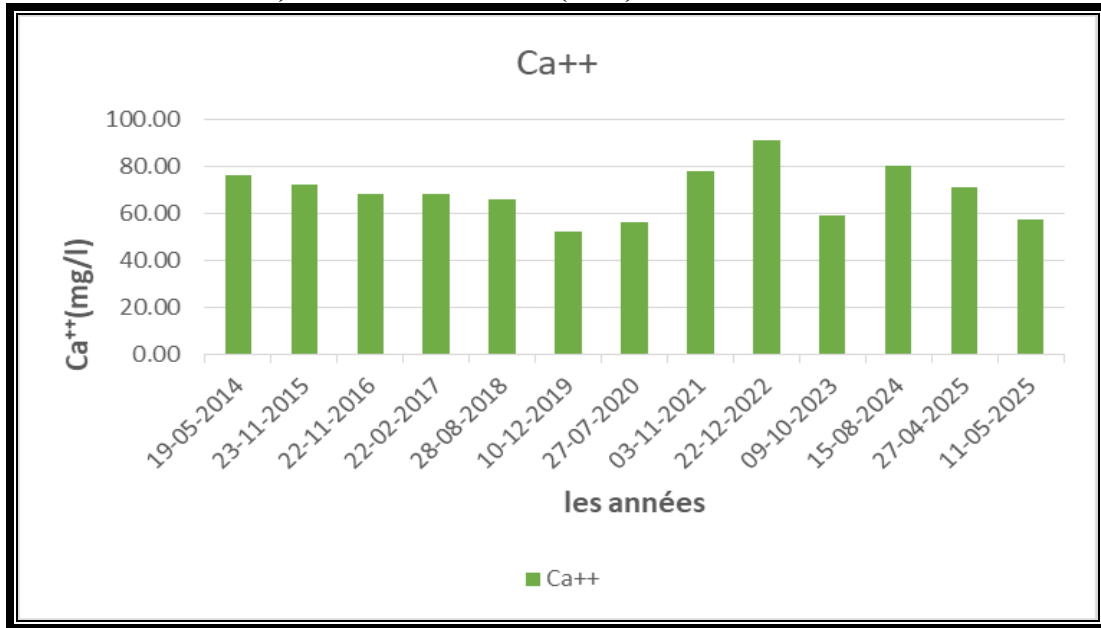


Figure. IV.19: Variation temporelle du Calcium.

Les concentrations en calcium varient entre 52mg/L (10/12/2019) et 91mg/L (22/12/2022). Elles sont inférieures à la norme algérienne de potabilité (200mg/L).

b) L'ion de magnésium :

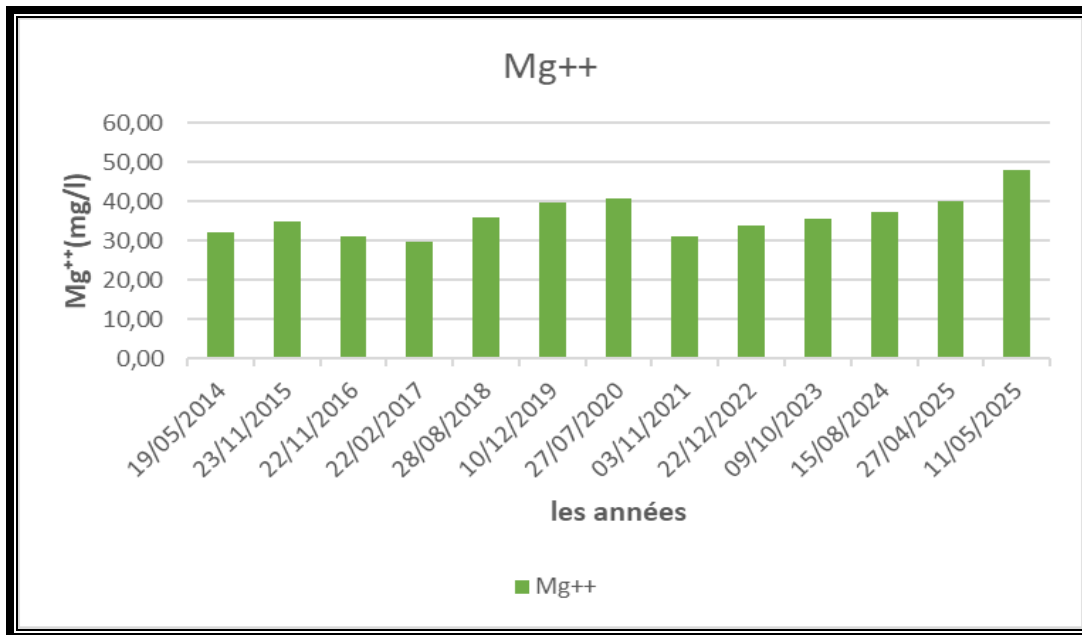


Figure. IV.20: Variation temporelle du Magnésium.

Les valeurs oscillent entre 32mg/l (19/05/2014) et 37mg/l (15/08/2024) avec une augmentation en (27/04/2025) de 40mg/l. Elles sont conformes à la norme prescrite (150mg/L).

c) L'ion sodium

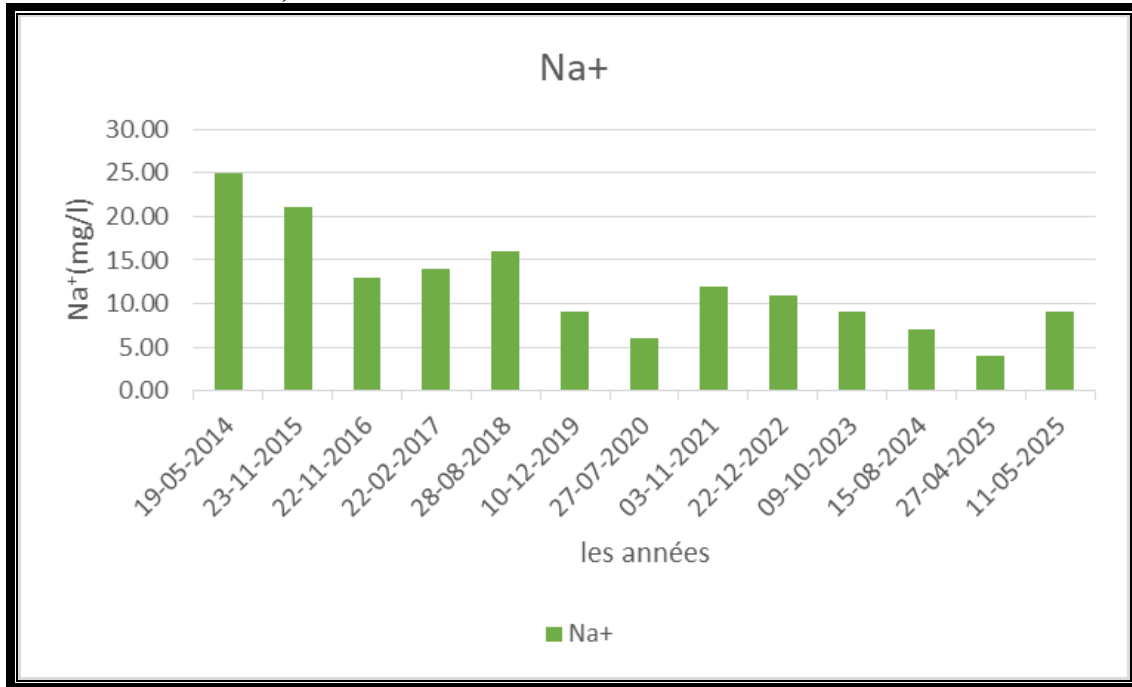


Figure. IV.21: Variation temporelle du Sodium.

Les concentrations en sodium varient entre 3mg/L (27/04/2025) et 25 mg/L (19/05/2014). Elles sont inférieures à la norme (200mg/L).

d) L'ion potassium( $K^+$ ) :

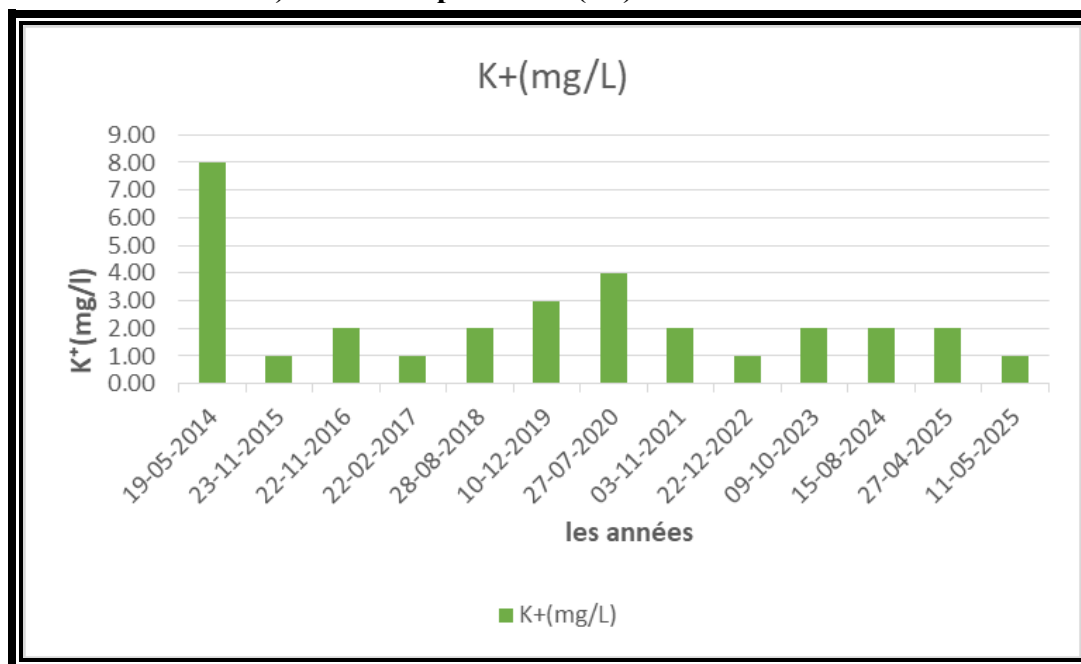


Figure. IV.22: Variation temporelle du Potassium.

Les concentrations en potassium varient de 1mg/L (2015/2017/2022/2025) à 8mg/L(19/05/2014).

Ces valeurs sont au-dessous de la norme algérienne de potabilité (12mg/L).

**2.2.2. Les anions :**

a) L'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) :

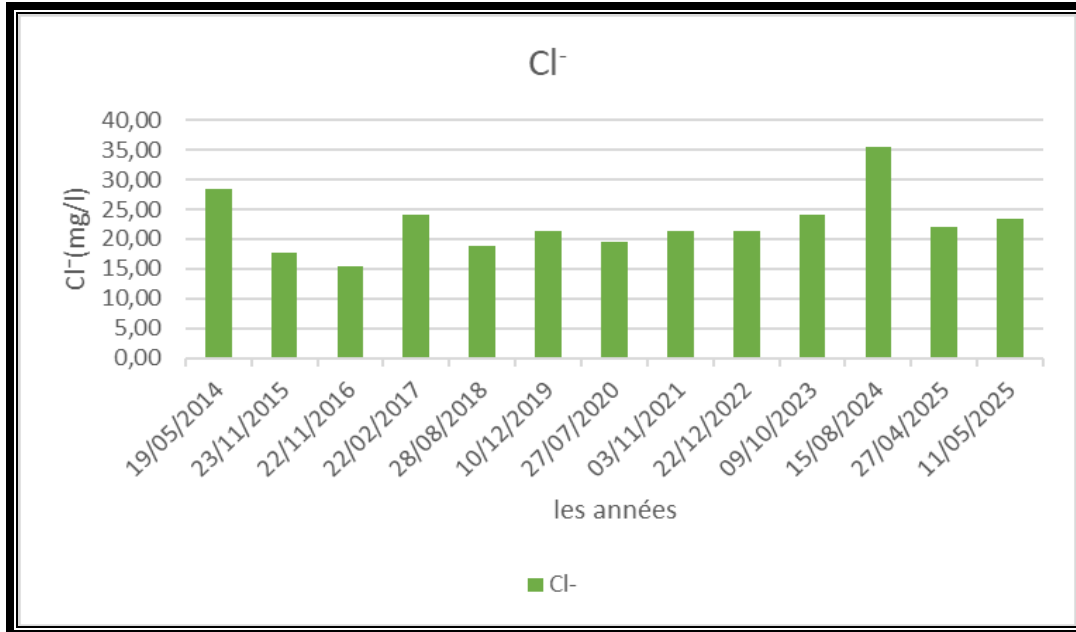


Figure. IV.23: Variation temporelle du Chlorure.

La figure montre une variabilité des concentrations de chlorure, oscillant entre 15 mg/L en (22-11-2016) et 35 mg/L en (15-08-2024). Ces teneurs sont inférieures à la norme (500mg/L).

b) L'ion sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) :

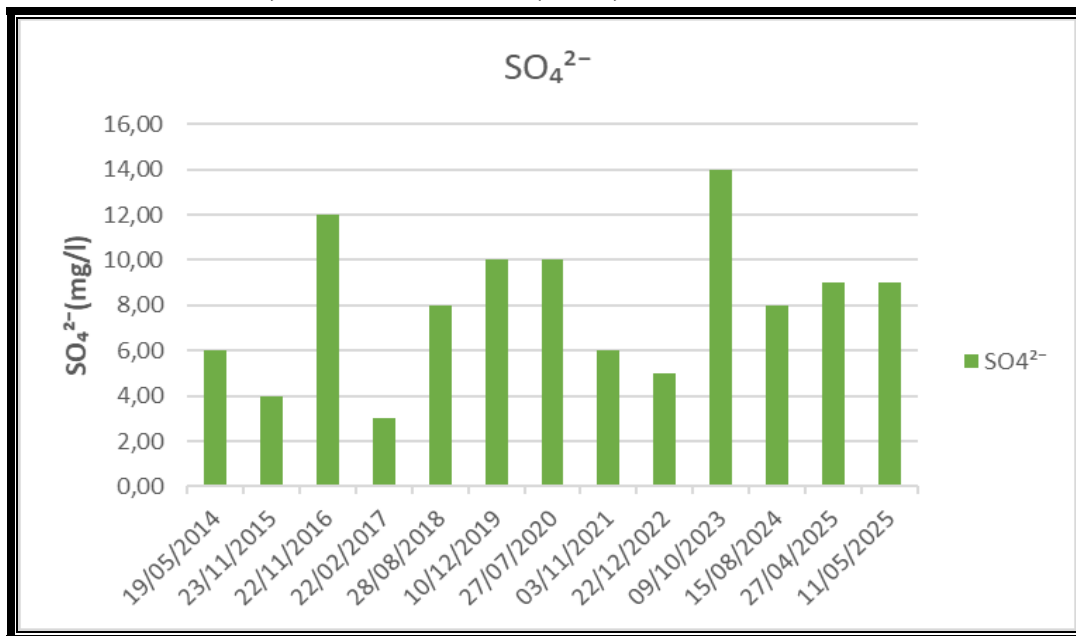


Figure. IV.24: Variation temporelle du sulfate.

Les valeurs sont comprises entre 3mg/L et 14 mg/L. Elles sont dans la norme (400mg/L).

**c) L'ion nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) :**

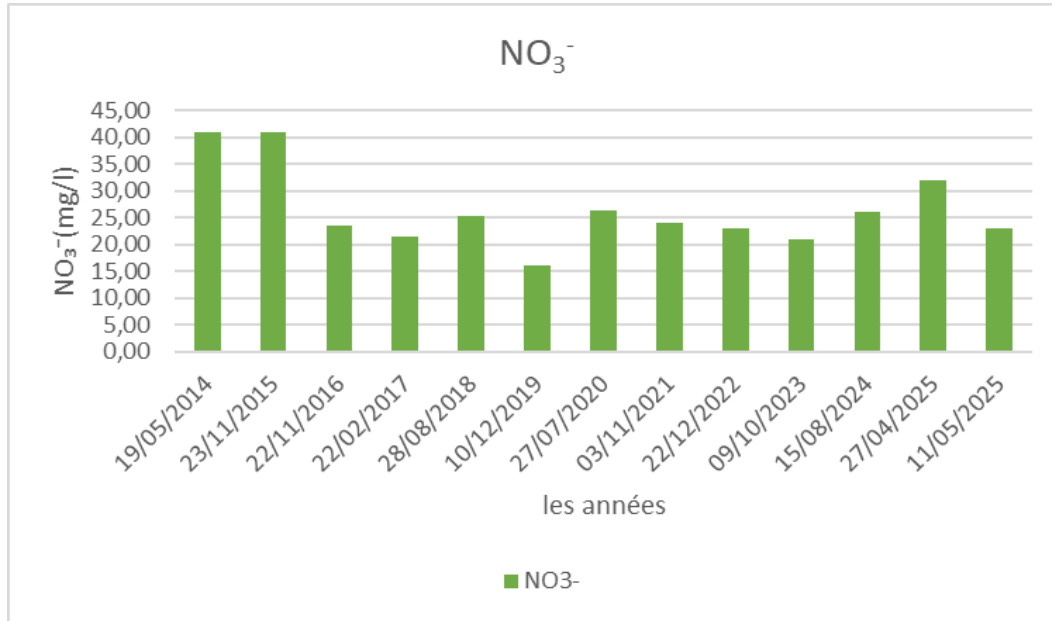


Figure. IV.25: Variation temporelle du nitrate.

Les concentrations en nitrate ont fluctué considérablement au cours de la période d'étude, allant d'une concentration basse de 16 mg/L en (10-12-2019) à une concentration élevée de 41 mg/L en (19-05-2014) et (23-11-2015). Elles sont conformes à la norme (50mg/L).

**d) L'ion Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) :**

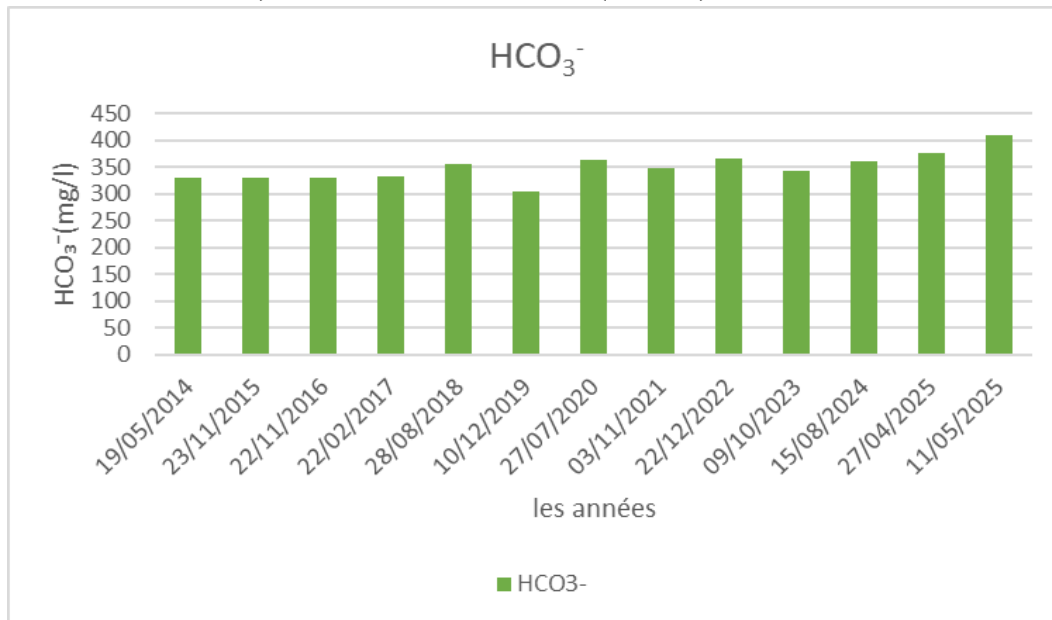


Figure. IV.26: Variation temporelle des Bicarbonate.

Le graphe montre que les teneurs en bicarbonates oscillent entre 300mg/L en (10-12-2019) à 410mg/L à la fin de la période d'étude (11-05-2025). Les normes algériennes ne fixent aucune valeur à ce paramètre.

### 3. Classifications des eaux :

#### ✚ Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff montre que les eaux de la source d'Ain Taga ont deux types de faciès :

- **Faciès bicarbonatée calcique.**
- **Faciès Bicarbonaté magnésien.**

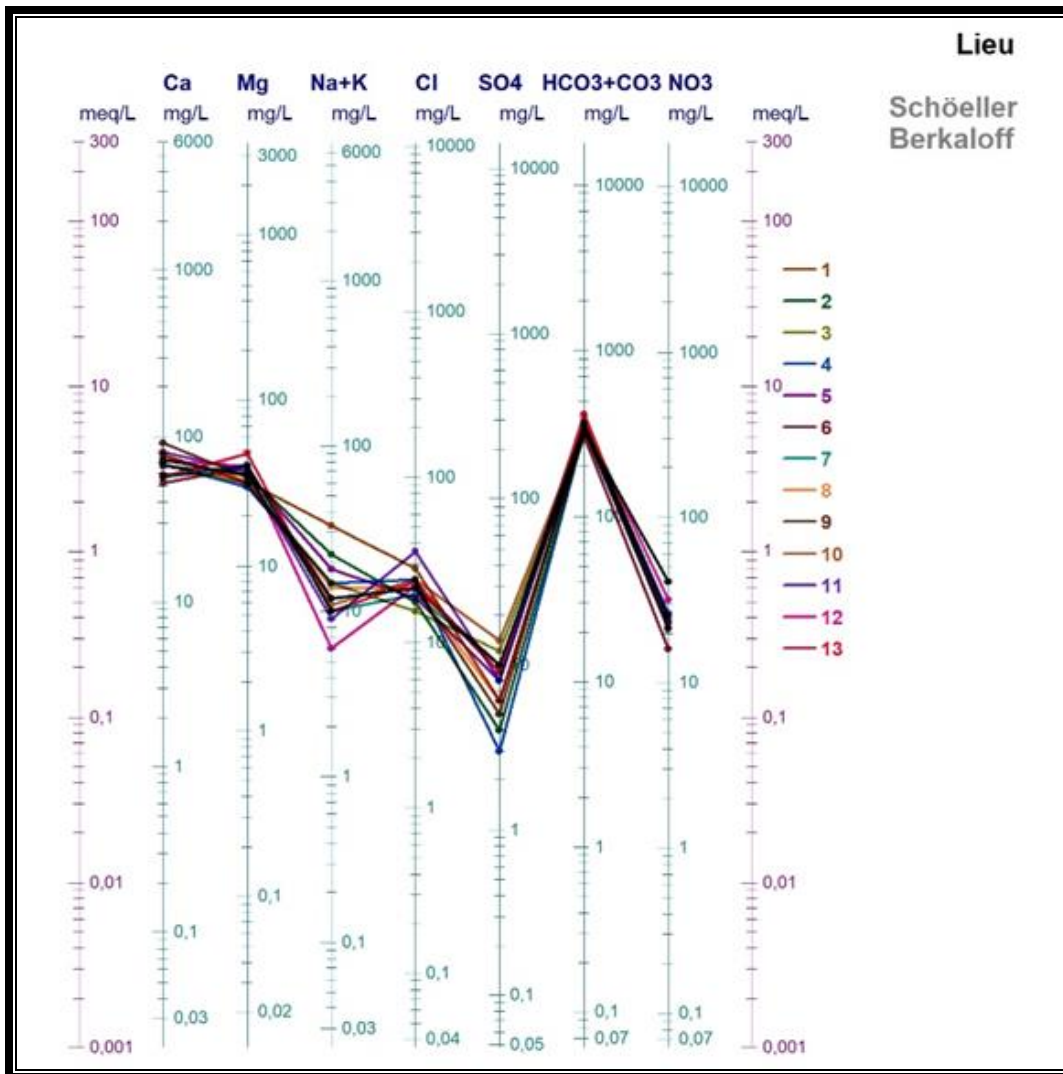


Figure. IV.27: Diagramme de Schoeller-Berkaloff.

#### ✚ Diagramme logarithmique de Stabler:

L'analyse du diagramme permet d'identifier deux faciès caractéristiques des eaux étudiées :

- **Faciès bicarbonatée calcique** : Cela correspond aux échantillons numérotés de 1, 2, 3, 4, 9,13.
- **Faciès bicarbonaté magnésien** : Cela correspond aux échantillons numérotés de 6, 7, 8, 10,11.

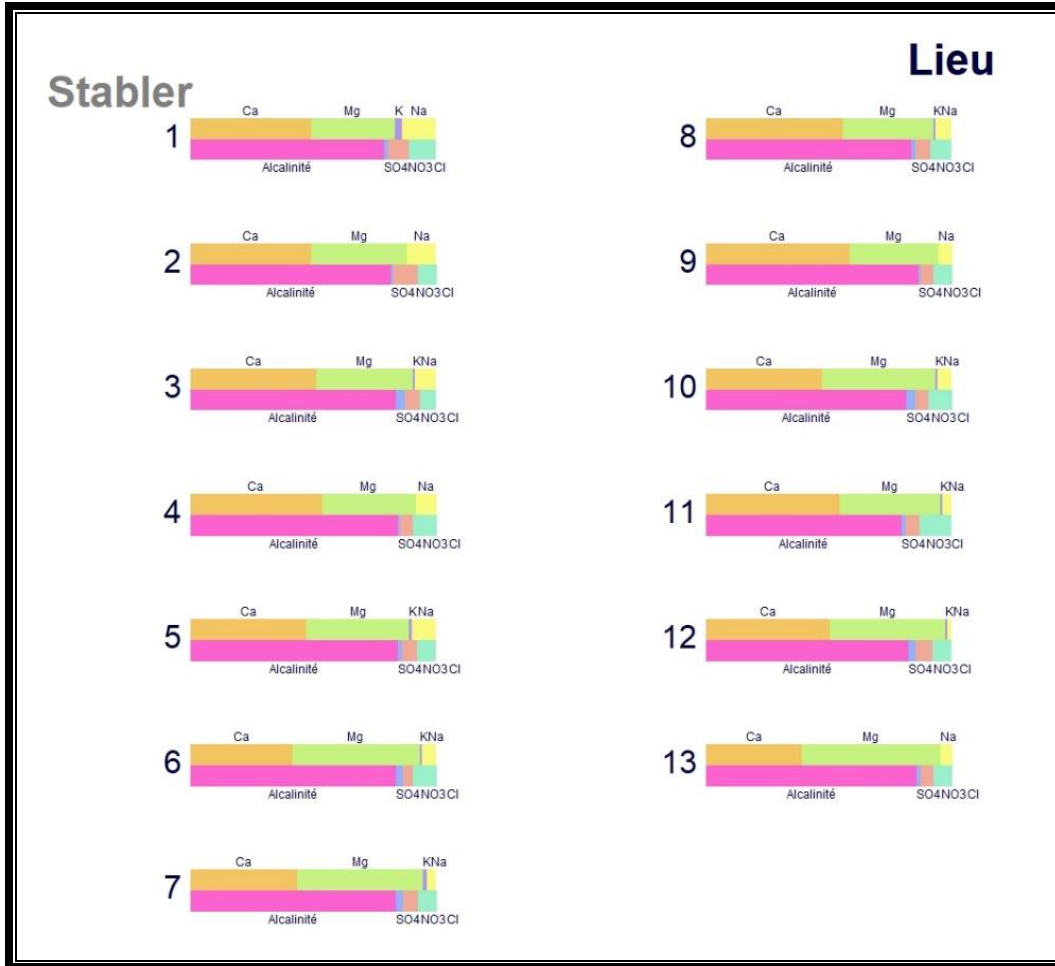


Figure. IV.28: Diagramme de Stabler.

**Diagramme de Piper :**

Le diagramme de Piper montre que les eaux d'Ain Taga ont un faciès **bicarbonaté calcique et magnésien**.

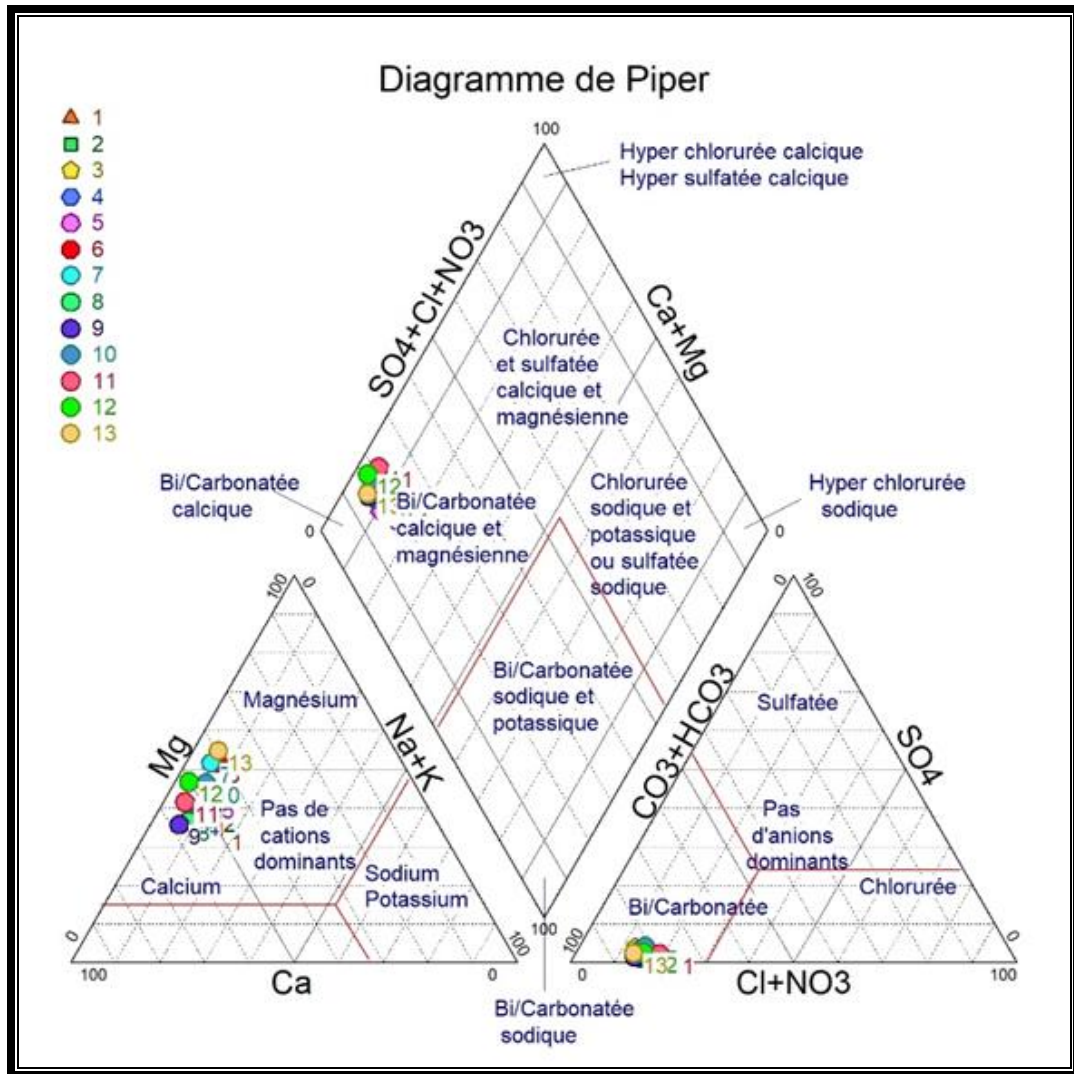


Figure. IV.29: Diagramme de Piper.

#### 4. Aptitude des eaux destinées à l'irrigation :

##### 4.1. Indice de Kelly's Ratio :

L'indice KR de la source étudiée affiche des valeurs oscillant entre 0,04 et 0,23, elles sont toutes inférieures à 1. Donc, elles sont appropriées pour l'irrigation.

Tableau IV.11 : Classification des eaux de la source d'Ain Taga selon l'indice de KR.

Date	KR
19/05/2014	0.09
23/11/2015	0.04
22/11/2016	0.06
22/02/2017	0.10
28/08/2018	0.09
10/12/2019	0.11
27/07/2020	0.06
03/11/2021	0.10
22/12/2022	0.16
09/10/2023	0.14
15/08/2024	0.13
27/04/2025	0.20
11/05/2025	0.23

#### 4.2. Pourcentage en sodium %Na<sup>+</sup>:

Selon les calculs du pourcentage en Na<sup>+</sup>, on note que le niveau de sodium est inférieur à 60%. Cela indique que les eaux sont très bonnes et un seul échantillon est de bonne qualité pour l'irrigation.

Tableau IV. 22 : Pourcentage de sodium et classification des eaux d'Ain Taga.

Date	Na	Classe
19/05/2014	8.70	Très bonne
23/11/2015	5.12	Très bonne
22/11/2016	7.13	Très bonne
22/02/2017	10.42	Très bonne
28/08/2018	8.76	Très bonne
10/12/2019	11.36	Très bonne
27/07/2020	9.36	Très bonne
03/11/2021	11.58	Très bonne
22/12/2022	15	Très bonne
09/10/2023	13.30	Très bonne
15/08/2024	13.13	Très bonne
27/04/2025	17.07	Très bonne
11/05/2025	23.40	Très bonne

#### 4.3. Classification de Wilcox :

Tous les échantillons (1 à 13) sont situés dans la zone **“Excellente”**. Cela signifie que l'eau est **faiblement saline** et contient **peu de sodium**, ce qui la rend **appropriée pour l'irrigation** sans risque majeur pour les sols.

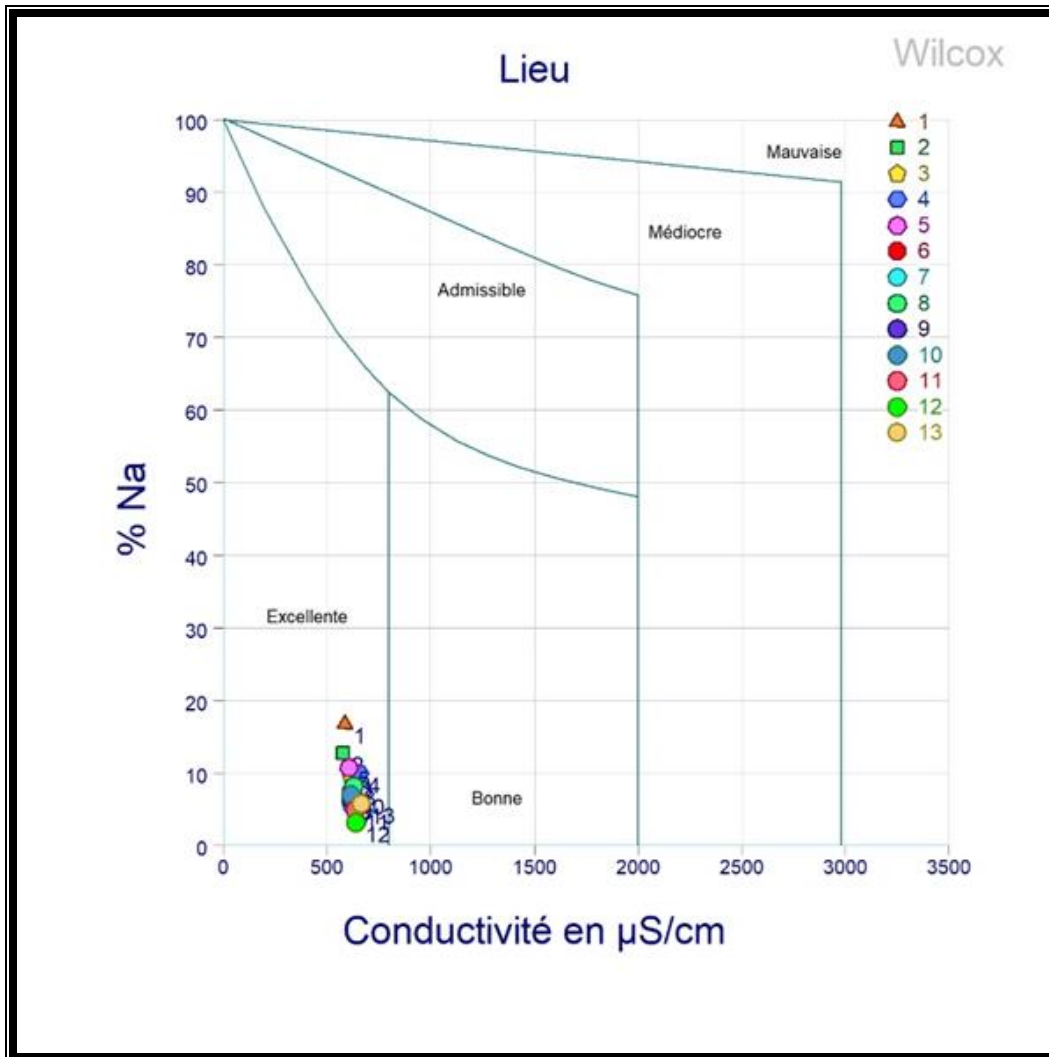


Figure. IV.29: Diagramme de Wilcox.

#### 4.4.Sodium Alcalinity Ratio (SAR):

Selon le diagramme de Riverside (fig 30 ) et le tableau H en annexes, toutes les eaux sont dans la classe C2-S1(qualité bonne) et en général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels ,sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes du aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux).

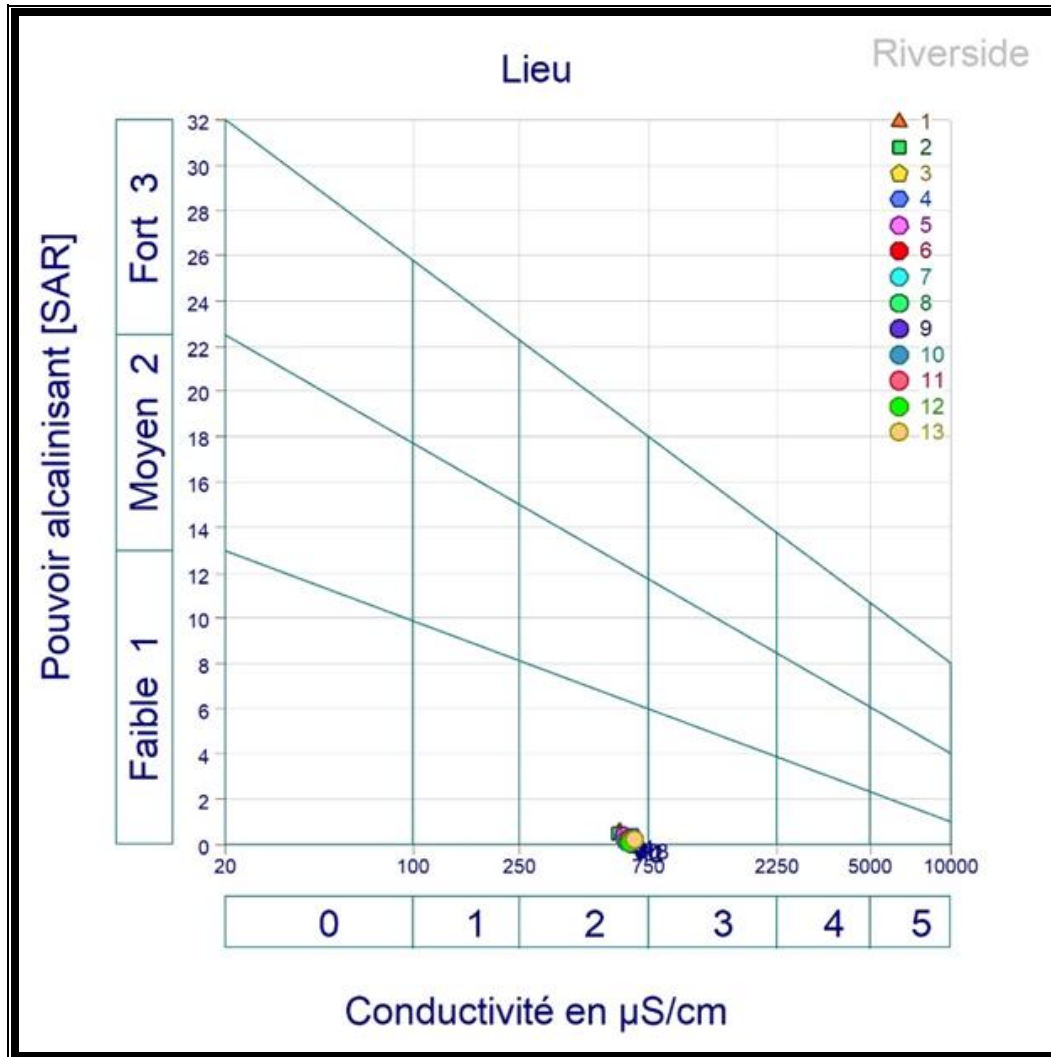


Figure. IV.30: Diagramme de Riverside.

### 5. Interprétation des analyses bactériologiques :

L'analyse bactériologique d'un échantillon d'eau est une méthode qui consiste à rechercher et à identifier la présence de bactéries spécifiques dans l'eau. Le but principal est de vérifier si l'eau est propre à la consommation ou à l'usage prévu, et de s'assurer qu'elle ne présente pas de danger pour la santé humaine.

L'analyse bactériologique de la source d'Ain Taga est effectuée le 14/04/2025 dans le laboratoire de l'ADE afin d'identifier les coliformes totaux (l'Escherichia Coli) et les Streptocoques fécaux.

#### 5.1. Recherche et dénombrement des coliformes totaux :

D'abord, en fait la recherche par la méthode de Filtration sur Membrane (FM) :

- On met 100 ml d'eau d'Ain Taga pour la filtrer à travers une membrane spéciale dont les pores sont suffisamment petits pour retenir les bactéries (généralement 0,45 micromètre).
- Après, on dépose la membrane dans un milieu de culture TTC qui favorise la croissance des coliformes, tout en inhibant d'autres bactéries.
- Ensuite, on met la membrane à une température de 35°C pendant 48 heures.
- Finalement, après 48h on fait la lecture des résultats (les colonies apparaissent souvent avec un éclat métallique ou une coloration spécifique).

✓ Les résultats d'Ain Taga sont **négatifs**.

**5.2. Recherche et dénombrement des coliformes fécaux :**

La recherche des coliformes fécaux s'effectue de la même méthode des coliformes totaux, sauf que le milieu de culture doit être transformé en TAC avec une température plus élevée et précise de **44 à 45°C** pendant 24 heures.

Après, on fait la lecture des colonies, on observe la croissance bactérienne sur les stries des membranes.

**5.3. Recherche d'espèce des Escherichia Coli :**

La recherche se fait par la méthode du Nombre le Plus Probable (NPP) pour les coliformes fécaux, mais avec des milieux liquides contenant le tryptophane pour déterminer l'indole, avec incubation de **35°C à 37°C** ou **44°C à 45°C à 24h**.

Après 24h, si les résultats expriment qu'il y a l'indole c'est à dire il existe Escherichia Coli dans l'eau. Puis on peut faire un test de confirmation par le réactif de Kovac.

✓ Les résultats des Escherichia Coli sont négatifs pour la source d'Ain Taga.

**5.4. Recherche et dénombrement des streptocoques fécaux :**

Les méthodes couramment utilisées pour l'identification des streptocoques fécaux incluent la filtration sur membrane et l'ensemencement sur des milieux de culture (gélose slanetz et baretley), suivis d'une incubation à des températures spécifiques 37°C pour favoriser leur développement.

✓ Les analyses microbiologiques réalisées le 11/04/2025 indiquent que les eaux de la source d'Ain Taga présentent une bonne qualité sur le plan microbiologique.

Tableau IV. 13 : Analyse bactériologique de la source d'Ain Taga (14 Avril 2025).

Source	Coliformes Totaux		Coliformes fécaux		Streptocoques fécaux	
	Valeur (germe/ml)	C.M.A	Valeur (germe/ml)	C.M.A	Valeur (germe/ml)	C.M.A
Ain Taga	00	00	00	00	00	00

### **C. Comparaison des caractéristiques physico-chimiques des eaux de Ghar Boumaâza et celles de la source d'Ain Taga :**

L'analyse chimique des eaux de Ghar Boumaâza et de la source d'Ain Taga révèle que les concentrations en anions et cations respectent les valeurs limites fixés par les normes algériennes relatives à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, attestant ainsi de leur potabilité (pour Ain Taga).

Les deux sites (Ghar Boumaâza et la source Ain Taga) possèdent un faciès hydrochimique similaire, bicarbonaté calcique et bicarbonaté magnésien, selon les diagrammes de H. SCHOLLER et E. BERKALOFF et de STABLER. Bien que les eaux de Ghar Boumaâza présentent une composition chimique légèrement plus complexe, selon Le diagramme de Piper qui a classé les eaux en deux faciès : bicarbonaté calcique et magnésien qui est le plus dominant et chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

Le diagramme de Wilcox a montré que les eaux de Ghar Boumaâza sont excellentes pour l'irrigation, tandis que les eaux de la source Ain Taga sont excellentes à bonnes. Le Diagramme de Riverside a montré que les eaux de Ghar Boumaâza se répartissent en deux classes : C2-S1, indiquant une eau de bonne qualité pour l'irrigation, et C3-S1, correspondant à une eau admissible pour cet usage. En ce qui concerne la source d'Ain Taga, les eaux appartiennent aux classes C2-S1, traduisant une qualité globalement bonne pour l'irrigation. Bien que les deux sources soient adaptées à l'irrigation, Ain Taga présente une qualité légèrement meilleure et plus stable.

L'analyse des résultats du pourcentage en  $\text{Na}^+$  révèle une tendance très favorable pour l'irrigation dans la région. Si le pourcentage de sodium d'Ain Taga met en lumière le fait qu'un seul échantillon se distingue classer de "bonne qualité" tandis que la majorité est "très bonne", le pourcentage de sodium de Ghar Boumaâza généralise cette observation en confirmant que l'ensemble des eaux étudiées affiche un taux de sodium inférieur à 60%. Cette cohérence globale, où toutes les eaux sont classées entre "bonnes" et "très bonnes" est cruciale, car un faible pourcentage de sodium est essentiel pour préserver la structure du sol, garantir une bonne infiltration de l'eau et prévenir les risques de salinisation et de dégradation physique des terres agricoles.

L'analyse comparative de l'indice de KR pour les eaux de Ghar Boumaâza et de la source d'Ain Taga révèle une similarité frappante et un potentiel favorable pour l'irrigation. Pour les deux sites, les valeurs de l'indice de KR se situent entre 0,05 et 0,21 (Ghar Boumaâza) et entre 0,04 et 0,23 (Ain Taga), toutes étant confortablement inférieures à 1.

L'analyse de la minéralisation révèle des profils légèrement différents mais des tendances communes entre Ain Taga et de Ghar Boumaâza, reflétant une complexité hydrogéologique dans la région de Tlemcen. Pour Ghar Boumaâza, la minéralisation est classée entre moyenne, moyenne à accentuée et importante. Cette gamme étendue suggère une variabilité notable au sein de ce système, avec une capacité à atteindre des niveaux de minéralisation significatifs, voire élevés. Cela peut indiquer une interaction prolongée et/ou intense de l'eau, avec des formations géologiques solubles, ou des zones d'écoulement où l'enrichissement en sels est plus prononcé. De son côté, la source d'Ain Taga présente majoritairement une minéralisation moyenne à accentuée. Cependant, la présence notoire d'un seul échantillon classé comme « minéralisation importante » souligne une hétérogénéité interne. Cette singularité peut être attribuée à un chemin d'écoulement spécifique, un temps de résidence plus long pour cet échantillon, ou une interaction localisée avec des formations particulièrement riches en minéraux. En comparaison, les deux sources montrent une tendance générale à une minéralisation au moins moyenne à accentuée, ce qui est cohérent avec un contexte géologique où la dissolution de roches, comme les carbonates est présente. La différence réside dans la fréquence et l'intensité des cas de forte minéralisation : Ghar Boumaâza semble présenter une gamme plus régulièrement "importante" de sa minéralisation, tandis qu'Ain

Taga a un profil majoritairement moins élevé, mais avec une pointe significative (l'échantillon "important").

L'analyse de la dureté totale des eaux révèle une tendance marquée, où la source d'Ain Taga, avec ses valeurs de 292 à 364.5 mg/L en CaCO<sub>3</sub> sert d'exemple concret d'eau dure à très dure. Cette observation ponctuelle est ensuite confirmée par les calculs de dureté totale de l'ensemble des eaux de Ghar Boumaâza, dont les valeurs s'étendent de 152,21 mg/L à 404 mg/L en CaCO<sub>3</sub>. Cette fourchette plus large indique une hétérogénéité significative de la dureté à travers la zone d'étude, allant d'eaux moyennement dures à des eaux très dures. La prépondérance des catégories "dure" et "très dure" confirme que la dissolution des formations carbonatées est un processus dominant affectant la qualité des eaux souterraines dans la région, tandis que l'existence d'eaux "moyennement dures" suggère des variations locales dans les conditions géologiques ou hydrodynamiques.

Suite à ces résultats, la similarité des caractéristiques hydrochimiques entre les eaux de Ghar Boumaâza et celles de la source Ain Taga suggère une liaison hydrogéologique directe, la source Ain Taga peut représenter l'exutoire principal de Ghar Boumaâza.

## Chapitre IV : hydrochimie

Tableau IV. 14 : Comparaison des caractéristiques physico-chimiques des eaux de Ghar Boumaâza et la source d'Ain Taga .

Les paramètres physico-chimiques	Les eaux de Ghar Boumaâza	Source d'Ain Taga
<b>pH</b>	Neutre à alcalin	Acide, neutre et légèrement alcalin
<b>Conductivité (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	Entre 280-760	Entre 575-665
<b>Minéralisation</b>	-Moyennes à accentuées - importante	-Moyennes -Moyennes à accentuées -Importante
<b>Dureté</b>	-Dures -Moyennement dures -Très dures	-Dures -Très dures
<b>Les analyses chimiques</b>	/	Conforment aux normes algériennes
<b>Diagramme de Schoeller-Berkaloff</b>	-Faciès Bicarbonaté calcique. -Faciès Bicarbonaté magnésien	-Faciès bicarbonaté calcique. -Faciès Bicarbonaté magnésien
<b>Diagramme logarithmique de Stabler</b>	-Faciès Bicarbonaté calcique. -Faciès Bicarbonaté magnésien	-Faciès bicarbonatée calcique. -Faciès Bicarbonatée magnésien
<b>Diagramme de Piper</b>	-Bicarbonaté calcique et magnésien. -Chloruré et sulfaté calcique et magnésien.	-Faciès bicarbonaté calcique et magnésien.
<b>Pourcentage de sodium</b>	Eaux bonnes et très bonnes	Très bonnes Un seul échantillon « eau bonne ».
<b>L'indice KR</b>	Entre 0,05 et 0,29 (eau bonne)	Entre 0,04 et 0,23(eau bonne).
<b>Classification de Wilcox</b>	Excellentes	Excellentes à bonnes
<b>Classification de Riverside</b>	Une eau de bonne qualité pour l'irrigation Une eau admissible.	Une eau bonne pour l'irrigation

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

En termes de cette étude portant sur la contribution à l'étude hydro-chimique des eaux de Ghar Boumaâza, nous avons conclu que :

L'étude menée sur le site naturel de Ghar Boumaâza, situé à proximité de Sebdou, a permis de mettre en lumière la richesse géologique, hydrologique et environnementale de ce système karstique classé site Ramsar depuis 2003. Ce classement international confirme son importance écologique, notamment en tant que zone humide de grande valeur.

L'analyse climatologique a révélé un climat semi-aride, caractérisé par des précipitations faibles et une évapotranspiration élevée, entraînant un déficit hydrique significatif, particulièrement en période estivale. Ce facteur climatique, combiné aux spécificités géologiques du synclinal de Merchiche, conditionne fortement la dynamique des eaux souterraines dans le système karstique de Ghar Boumaâza, nous avons :

- Les précipitations moyennes annuelles : 372.8 mm
- Les températures moyennes mensuelles : 17.7 C°.
- La température moyenne maximale marquée au mois d'août est de 29.3°C et la température moyenne minimale est enregistrée en février (7.9 C°).
- Les courbes pluvio-thermiques de Bagnouls et Gausson montrent une saison sèche du mi- avril au début d'octobre, et une saison humide pendant le reste de l'année.
- D'après les méthodes graphiques et les indices climatiques (comme l'indice de DE Martonne et le climagramme d'Emberger), le climat est classé comme **semi-aride**.
- L'Evapotranspiration potentielle est de 878.06 mm.
- L'Evapotranspiration réelle est de 359.81 mm.
- Le Déficit agricole est de 515.25mm.

Sur le plan géologique, la présence de formations carbonatées (calcaires, dolomies) confère au site un comportement hydrogéologique particulier, avec des écoulements souterrains complexes et des sources pérennes, comme celles d'Aïn Taga et d'Aïn Hassi El Kelb, exutoires de Ghar Boumaâza.

❖ L'étude physico-chimique des eaux de Ghar Boumaâza a montré une qualité globalement satisfaisante, majoritairement de type bicarbonaté calcique et magnésien, ce qui les rend appropriées à l'irrigation, selon les classifications de Wilcox et Riverside. Toutefois, la variation des concentrations de certains éléments comme les nitrates, le potassium et les sulfates, reflète une influence anthropique croissante, probablement liée aux pratiques agricoles et domestiques dans la région. Ainsi :

- Les diagrammes de H. SCHOLLER , E. BERKALOFF et de STABLER indiquent l'existence de deux faciès : bicarbonaté calcique (le plus dominant) et bicarbonaté magnésien.
- Le diagramme de Piper a classé les eaux en deux faciès : bicarbonaté calcique et magnésien qui le plus dominant et chloruré et sulfaté calcique et magnésien.
- Le diagramme de Wilcox a montré que les eaux de Ghar Boumaâza sont excellentes pour l'irrigation.
- Le diagramme de Riverside a montré deux classes : «C2-S1» : bonne pour l'irrigation et «C3-S1» : admissible pour l'irrigation.

L'analyse statistique faite pour Ghar Boumaâza a permis d'identifier les principales sources de minéralisation de l'eau, liées à la fois à des processus naturels, comme la

dissolution des carbonates et à des effets anthropiques, ce qui mène la nécessité d'une surveillance continue de la qualité de l'eau et d'une gestion appropriée des activités humaines dans la région.

- ❖ Les résultats des analyses physico-chimiques de la source d'Ain Taga indiquent une qualité des eaux conforme aux standards requis (normes algériennes).
- Selon les diagrammes de H. Schoeller, E. Berkaloff et Stabler, les eaux analysées se caractérisent par des faciès hydro-chimiques de type bicarbonaté calcique et magnésien.
- Le diagramme de Piper a classé les eaux de la source en un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.
- Le diagramme de Wilcox confirme que les eaux de la source sont excellentes pour l'irrigation.
- Le diagramme de Riverside a montré que les eaux de la source appartiennent à la classe « C2-S1 » : bonnes pour l'irrigation.

L'analyse bactériologique de la source d'Ain Taga a montré que tous les résultats sont négatifs pour les coliformes totaux ; les coliformes fécaux ; pour les streptocoques fécaux et l'absence d'*Escherichia coli*, alors l'eau de la source d'Ain Taga est de bonne qualité microbiologique, sans contamination fécale. Elle peut donc être considérée comme propre à la consommation.

Ghar Boumaâza et la source d'Ain Taga présentent une bonne qualité hydro-chimique, c'est des eaux appropriées à l'irrigation. Ain Taga montre une composition plus stable, tandis qu'une variabilité existe à Ghar Boumaâza, notamment en conductivité et faciès chimique.

Afin de protéger les eaux souterraines du système karstique de Ghar Boumaâza et d'Ain Taga, un suivi régulier quantitatif et qualitatif s'impose et des précautions de protection doivent être prises en considération.

**REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

**Abdi, H., et Williams, L. J (2010) :** Analyse en composantes principales. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 433-459p.

**Baba Hamed. K, (1991) :** Contribution à l'Etude hydrogéologique de la haute Tafna en amont du barrage Beni-Bahdel (Monts de Tlemcen). Mém. Univ. 424 p.

**Bakalowicz, M (1995) :** *Les eaux souterraines dans le karst. Hydrogéologie*, Art, 4,18 p.

**Bakalowicz, M (1999) :** *La zone saturée des systèmes karstiques : un milieu original au comportement complexe.* Bulletin d'Hydrogéologie. 20 p.

**Benazzouz, I, et Khatir, O(2016) :** Périmètre de protection des eaux souterraines en milieu karstique, Cas du système karstique de Ghar Boumaza. Mém. Master, Univ. Tlemcen. 125p.

**Benest, M (1984) :** Étude géologique et hydrogéologique des Monts de Tlemcen et des régions limitrophes (Algérie nord-occidentale). Thèse. Doc. Univ. Dijon, France. 381 p.

**Benest, M (1985) :** Evolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord-est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé. Bull. So. Géol. France. XXII.

**Benoit. P, et Collignon.B (1987) :** Spéléologie Algérienne, Bulletin :Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (Grotte Karstique de Ghar Boumâaza, Wilaya de Tlemcen). Tlemcen. 6P.

**Bensaoula, F (2006) :** Karstification, hydrogéologie et vulnérabilité des eaux karstiques. Mise

Au point d'outils pour leur protection (Application aux Monts de Tlemcen – Ouest Oranais). Thèse

Doc, univ. Tlemcen. 203P.

**Bensaoula, F (2008) :** Exportation des carbonates et dissolution spécifique dans le système karstique de Boumaza (Monts de Tlemcen — NW algérien). Art. *Karstologia*, 52, 38P.

**Bensaoula, F., et Boughriba, M., et Bouchelkia, A (2012) :** Contribution à l'étude hydrodynamique et hydro-chimique de l'aquifère karstique de Ghar Boumaâza (Tlemcen, Algérie). *Revue Géographie Physique et Environnement*, 14 p.

**Collignon, M (2010) :** Hydrogéologie et potentialités en ressources en eau dans les karsts des monts de Tlemcen : exemple du système de Ghar Boumaâza. Rapport interne, Agence du Bassin Hydrographique Oranie-Chott Chergui (ABH OCC), Tlemcen. 35 p.

**Cvijić, J (1960) :** La géographie des terrains calcaires. Paris: Armand Colin. Art. 400 p.

- Hasan, R. J,et Abdulazeez, A. M(2021):** Deep Learning Convolutional Neural Network for Face Recognition: A Review. International Journal of Science and Business, 5(2),14 p.
- Keddah. K,et Medjahdi. N (2018) :** Contribution à l'étude physico-chimique de quelques sources dans le groupement urbain de Tlemcen. Mém. Master, Univ. Tlemcen. 100 p.
- Mangin, A (1975) :** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse. Doc. Univ. Dijon, France. 124 p.
- Marsaud, B (1996) :** Structure et fonctionnement de systèmes karstiques à dominante fissurale. Thèse. Doc. Univ. Paris XI-Orsay, France, 270 p.
- Merzoug, D., et Boughriba, M., et Bouchelkia, A., et Laouar, R (2019) :**Caractérisation morpho-structurale et karstologique de la grotte de Ghar Boumaâza (monts de Tlemcen, Algérie). Revue, Géographie Physique et d'Environnement, Vol. 14 p.
- Piper, A. M, (1944):**Une procédure graphique pour l'interprétation géochimique des analyses d'eau. Transactions, AmericanGeophysicalUnion,25(6), 14 p.
- Ranato, P. A., et Hansen, G., et Herding, E.,et Chaudhuri, S., et Tang, S., et Garg, S. K., et Jackson Sickler, J (2018) :** Comparaison des performances des systèmes cobas Liat et Cepheid GeneXpert pour la détection de *Clostridium difficile*. *PLoS ONE*.
- Rodier, J (1996) :** L'Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduelles, eau de mer. 8e édition, DUNOD, Paris. 1383 p.
- Rouissat, K, Benchikh, N (2017) :** Étude hydrologique et hydraulique d'un bassin versant en zone aride : cas du bassin de l'oued M'zi (Laghouat, Algérie). Mém. Magister, univ. Oran. 197 p.
- Schoeller, H(1962) :** Les eaux souterraines: hydrologie dynamique et chimique, prospection, exploitation. Masson Et Cie.742 p.
- Stiff, H. A (1951).:** Interprétation des analyses chimiques d'eau au moyen de diagrammes. Journal of Petroleum Technology. 197 p.
- Verdiel, J (1988) :** Contribution à l'étude des régimes hydrologiques et de la production d'eau des bassins versants Algérie. Mém. Magister. Algérie. 147 p.
- Wundt,W ( 1954) :** Les abaquespour évaluer les débits moyens annuels des rivières d'après les précipitations et les températures. Art, 77 P.
- Zerroki, B. et Bouanani, A (2022) :** Étude hydrologique des aquifères karstiques du bassin de l'Oued Tafna (Algérie occidentale). Revue des Sciences de l'Eau, vol. 35, n° 2,p 63

# ANNEXES

ANNEXES

Tableau A: Coefficient de correction en fonction de la latitude et du mois  
Formule de Thornthwaite d'après Brochet .L Gerbier 1968.

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.00	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

**Tableau G : Normes de potabilité (journal officiel 2011 et 2014).**

Paramètre	Unité	Valeur limites
PH	/	6.5 et 9
Conductivité	$\mu\text{s/cm}$	2800
Dureté Totale	Mg/l en $\text{CaCO}_3$	500
Résidu Sec	Mg/l	1500
Nitrate	Mg/l	50
Sulfate	Mg/l	400
Chlorure	Mg/l	500
Potassium	Mg/l	12
Sodium	Mg/l	200
Magnésium	Mg/l	150
Calcium	Mg/l	200

**ANNEXES**

**Tableau H : Classification des eaux d'irrigation, d'après Servent, 1975(U.S.SALINITY LAB)**

Degré	Qualité	Classe	Description
1	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels, sur sol s ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au Sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux).
3	Admissible	C3-S1	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C4-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel





## RESUME :

### **(CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX DE GHAR BOUMAAZA, TLEMCEN (NORD-OUEST ALGERIEN)).**

Le but de ce travail est de déterminer l'origine de minéralisation des eaux de Ghar Boumaâza.

D'après les interprétations des analyses physico-chimiques, tous les paramètres sont conformes à la norme algérienne de potabilité.

L'application des éléments chimiques sur les diagrammes de Schoeler Berkaloff et Stabler nous a conduits à distinguer deux types d'eaux : **le faciès bicarbonaté calcique et le faciès bicarbonaté magnésien**, par ailleurs le diagramme de piper indique que les eaux de Ghar Boumaaza se répartissent en deux familles : **bicarbonaté calcique et magnésien et chloruré et sulfaté calcique et magnésien**.

D'après le pourcentage de Na % et l'indice de Kr, les résultats des eaux de Ghar Boumaaza sont bons à très bonne pour l'usage en irrigation ; tel que le diagramme de Wilcox montre que l'eau de Ghar Boumaâza est de **très bonne qualité pour l'irrigation** et le diagramme de Riverside indique deux types d'eau : l'un **bon pour l'irrigation (C2-S1)** et l'autre **acceptable (C3-S1)**.

L'étude de l'aquifère de Ghar Boumaâza montre est globalement stable, sauf pour certains éléments comme les sulfates, le potassium et le sodium, influencés par les activités humaines ; ainsi l'analyse statistique explique que certains minéraux, comme l'anhydrite, ne sont pas dissous dans l'eau, tandis que d'autres, varient selon les conditions. Les liens entre certains éléments (comme calcium et bicarbonates, ou potassium et chlorures) montrent à la fois des influences naturelles et humaines.

Mots clés : Ghar Bomaâza, Tlemcen, minéralisation, paramètres physico-chimiques, normes algériennes, Diagrammes, Xlstat.

### **(CONTRIBUTION TO THE HYDROCHEMICAL STUDY OF THE WATERS OF GHAR BOUMAAZA, TLEMCEN (NORTHWESTERN ALGERIA)).**

The aim of this work is to determine the origin of the mineralization of the waters of Ghar Boumaâza.

According to the interpretations of the physicochemical analyses, all parameters comply with the Algerian standard for drinking water.

The application of chemical elements to the Schoeler, Berkaloff, and Stabler diagrams led us to distinguish two types of water: the calcium bicarbonate facies and the magnesium bicarbonate facies. Furthermore, the Piper diagram indicates that the waters of Ghar Boumaâza are divided into two families: calcium and magnesium bicarbonate, and calcium and magnesium chloride and sulfate.

Based on the Na% and Kr index, the water quality of Ghar Boumaaza is good to very good for irrigation use; the Wilcox plot shows that Ghar Boumaaza's water is of very good quality for irrigation, and the Riverside plot indicates two types of water: one good for irrigation (C2-S1) and the other acceptable (C3-S1).

The study of the Ghar Boumaaza aquifer shows that it is generally stable, except for certain elements such as sulfates, potassium, and sodium, which are influenced by human activities. Statistical analysis thus explains that some minerals, such as anhydrite, are not dissolved in the water, while others vary depending on the conditions. The relationships between certain elements (such as calcium and bicarbonates, or potassium and chlorides) reflect both natural and human influences.

Keywords: Ghar Bomaâza, Tlemcen, mineralization, physicochemical parameters, Algerian standards, Diagrams, Xlstat.

### **(مساهمة في الدراسة الهيدروكيميائية لمياه غار بومعزة، تلمسان (شمال غرب الجزائر))**

. يهدف هذا العمل إلى تحديد أصل تمعدن مياه غار بومعزة.

ووفقًا لتفسيرات التحاليل الفيزيائية والكيميائية، تتوافق جميع المعايير مع المعايير الجزائرية لمياه الشرب.

ومن خلال تطبيق العناصر الكيميائية على مخططات شولر وبركالوف وستابلر، تم التمييز بين نوعين من المياه: سحنة بيكربونات الكالسيوم وسحنة بيكربونات المغنيسيوم. علاوة على ذلك، يشير مخطط بايبر إلى أن مياه غار بومعزة تنقسم إلى فئتين: بيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم، وكلوريد وكبريتات الكالسيوم والمغنيسيوم.

واستنادًا إلى مؤشري الصوديوم والبروم، تتراوح جودة مياه غار بومعزة بين جيدة وجيدة جدًا للاستخدام في الري. يُظهر مخطط ويلكوكس أن مياه غار بومعزة ذات جودة عالية جدًا للري، بينما يُشير مخطط ريفرسايد إلى نوعين من المياه: أحدهما صالح للري (C2-S1) والآخر مقبول (C3-S1).

تُظهر دراسة طبقة المياه الجوفية في غار بومعزة أنها مستقرة بشكل عام، باستثناء بعض العناصر مثل الكبريتات والبوتاسيوم والصوديوم، والتي تتأثر بالأنشطة البشرية. وبالتالي، يُوضح التحليل الإحصائي أن بعض المعادن، مثل الأنهيدريت، لا تذوب في الماء، بينما يختلف البعض الآخر حسب الظروف. تعكس العلاقات بين بعض العناصر (مثل الكالسيوم والبيكربونات، أو البوتاسيوم والكلوريدات) التأثيرات الطبيعية والبشرية.

**الكلمات المفتاحية:** غار بومعزة، تلمسان، التمعدن، المعايير الفيزيائية والكيميائية، المعايير الجزائرية، الرسوم البيانية، إكسلستات.