

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN
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

HADJ BOULENOUAR Fatna& KEDJAR Lila

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie.

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOCHIMIQUE DE LA SOURCE D'EL ONSOR,
WILAYA DE TLEMCEN, NORD-OUEST ALGERIEN.**

Soutenu le juin 2026, devant le jury composé de :

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

Année universitaire 2025 /2026.

Remerciements

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que nous ressentons aujourd'hui. Ce travail est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes, d'efforts, mais surtout de belles rencontres et de soutiens inestimables.

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

À nos parents, vous qui avez toujours cru en nous, même lorsque la fatigue prenait le dessus. Merci pour votre amour inconditionnel, vos encouragements silencieux et vos sacrifices que nous mesurons un peu plus chaque jour. Votre présence a été notre plus grande force.

À **Mme GUETTAIA.S** et **M. BOUDJEMA.A** qui nous ont encadrées et aidées, nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour votre patience, votre écoute et vos conseils avisés. Votre accompagnement bienveillant a été essentiel dans la réalisation de ce travail et nous a permis de grandir autant sur le plan académique que personnel.

Un grand merci aux membres du jury,

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.

Nous remercions également nos familles et nos proches, pour leurs mots rassurants, leurs gestes réconfortants et leur indéfectible soutien dans les moments de doute. Vous avez su rendre ce parcours plus doux.

Enfin, une pensée sincère à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont croisé notre chemin durant nos parcours d'études. Chacun de vous a contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce projet.

Ce mémoire n'est pas seulement le fruit d'un travail d'équipe, mais aussi le reflet de tout l'amour, la confiance et l'accompagnement que nous avons reçus.

Merci, du fond du cœur.

Dédicaces.

Du plus profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui ont été une lumière sur mon chemin, un soutien dans mes moments de faiblesse et une source d'espoir dans mes instants de doute.

Alhamdoulillah, pour tout... pour la force dans la faiblesse, pour la patience dans l'épreuve et pour la lumière qui a guidé mes pas jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

A mon cher père Kedjar Zakaria

Aucune dédicace ne peut exprimer l'amour et le respect que je te porte. Ce travail est le fruit de tes sacrifices pour ma réussite, Je te le dédie avec tout mon amour. Que Dieu te protège.

A ma chère mère

Tu es ma source de tendresse et de force. Tes prières et ton soutien m'ont permis d'avancer. Aucune dédicace ne peut t'exprimer pleinement.

A mes frères et à mes sœurs

Avec tout mon amour et ma gratitude. Vous êtes mon soutien constant, Merci pour votre amour, votre aide et les moments précieux que nous avons partagés ensemble. Merci d'avoir toujours été à mes côtés, dans les moments de joie comme dans les moments difficiles. Votre présence a été une source de motivation et de force tout au long de mon parcours.

A ma chère binôme Fatna,

Merci d'être la meilleure version de toi-même, ta contribution a été essentielle à cette réussite.

A mes amis

Fares, Merwa, Wissem, Ikrame, Yasmine, Riheme votre amitié inestimable a illuminé mon parcours et enrichi cette expérience, merci vous êtes les meilleurs.

A toute ma famille,

Pour votre présence constante et votre soutien indéfectible qui ont été les piliers de ma réussite. Ce travail est le fruit de votre patience et de vos encouragements. Que ce mémoire soit pour vous un témoignage de ma profonde reconnaissance et de mon amour éternel.

À mon cher oncle Hicham et son épouse,

Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde gratitude. Merci d'avoir éclairé mon choix vers cette spécialité et de m'avoir soutenu avec tant d'affection durant ces cinq années d'études. Votre confiance a été le moteur de ma réussite. Que ce mémoire soit le reflet de mon immense amour et de ma reconnaissance éternelle.

Dédicaces.

Du profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers.

À mes chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mon honorable encadrant et mon Co-encadrant,

Mr Boudjema Abderrezak & Mme Guettaia Sabrine

En témoignage de ma profonde gratitude pour votre encadrement précieux, vos conseils avisés et votre patience tout au long de la réalisation de ce mémoire.

À ma chère binôme, Lila,

En témoignage de notre complicité, de nos efforts partagés et de ton soutien précieux tout au long de ce travail. Ce fut un réel plaisir de collaborer avec toi.

Aux membres du jury,

Qui me font le grand honneur d'évaluer et de juger ce travail universitaire.

À la mémoire de mon cher grand-père Abderrahmane, de ma chère grand-mère Rachida et de ma chère regrettée Aïcha,

À ceux qui ont quitté ce monde mais qui ne quitteront jamais nos cœurs. En gage de ma fidélité éternelle et en reconnaissance de vos bienfaits et de votre bienveillance inoubliable. Votre souvenir restera à jamais une lumière sur mon chemin. Nous prions Dieu le Tout-Puissant de vous accorder sa sainte miséricorde, Son infini pardon, et de vous accueillir dans son vaste paradis parmi les vertueux.

À ma chère grand-mère Fatima et à mon cher grand-père Miloud,

À qui je souhaite une excellente santé, une longue vie pleine de sérénité, de douceur et de bénédiction.

À mon cher frère Wahid et à mes chères sœurs Sabah, Houria et Nadjat ,

Pour votre soutien indéfectible, votre patience et vos encouragements qui m'ont toujours poussé à atteindre mes objectifs.

À mes chers neveux et nièces, Khadidja, Achref, Amani, Sohaib, Yasser, Sirin, Zayd et Meriem,

Qui apportent de la joie et de la lumière à ma vie.

À mes chères cousines Wided, Yakhlef et Mohammed

Pour leur affection et leur présence précieuse à mes côtés.

À mes fidèles amis, Karima, Housseem, Ilyes, Merwa, Yassmina, Wissem, Ikram et Rihem,

Pour votre aide, votre support et votre présence dans les moments importants de mon parcours.

Enfin, à toute ma famille, petits et grands,

Avec toute mon affection et ma professionnelle gratitude pour leur présence à mes côtés tout au long de ce cursus universitaire.

ملخص:

المساهمة في الدراسة الهيدروجيوكيميائية لمنبع عين العنصر، ولاية تلمسان (شمال غرب الجزائر)

يهدف هذا العمل إلى تحديد أصل التمدن وتقييم جودة مياه منبع "عين العنصر" من خلال المتابعة الفيزيوكيميائية شملت الفترة الممتدة بين 2017 و2024 (85 عينة).

تُظهر نتائج تفسير التحاليل الفيزيوكيميائية أن مياه المنبع تتميز بـ pH قاعدي عموماً (6.90 إلى 8.10) وهي مطابقة لمعايير صلاحية الشرب. تشير الموصلية الكهربائية (598 إلى 1430 ميكروسيمنز/سم) إلى أنها أدنى من الحد المسموح به في المعايير الجزائرية. كما أن جميع العناصر الكيميائية (الكاتيونات والأنيونات) تتوافق مع معايير الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية (JORA)، باستثناء محتويات النترات (NO_3^-) التي تسجل تبايناً حرجاً (18 إلى 180 ملغ/لتر) متجاوزة في معظم العينات المدروسة الحد المسموح به والمقدر بـ 50 ملغ/لتر، مما يبرز بوضوح تأثيراً بشرياً رئيسياً. تُبين مخططات "شولر بيركالوف" و"ستابلر" سيادة ثلاث سحنات: بيكربونات الكالسيوم، بيكربونات المغنيسيوم، وبيكربونات الصوديوم. في حين يُصنف مخطط "بايير" هذه المياه إلى عائلتين من السحنات: كلورية وكبريتات كالسيوم ومغنيسيوم، وبكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم. من جهة أخرى، توضح النسب المئوية لنسبة الصوديوم ومؤشر "Kelly's Ratio" أن مياه منبع عين العنصر ممتازة إلى جيدة للاستخدام في الري. ويصنف مخطط "ويلكوكس" المياه في الفئة الجيدة، بينما يشير مخطط "ريفرسايد" إلى أن المياه مقبولة للري. (C3-S1) أخيراً، كشف تطبيق الأساليب الإحصائية متعددة المتغيرات (ACP) و (CAH) أن كيمياء المياه تتحكم فيها بشكل أساسي ظاهرتان: التفاعل الطبيعي بين الماء والصخر (إذابة التكوينات الكربونانية للمكمن الكارستي المرتبط بزم من المكوث)، وتلوث خارجي منتشر. هذا التلوث، المتميز بالثلاثي البشري المنشأ البوتاسيوم و النترات و الكبريتات-، يرتبط مباشرة بالممارسات الفلاحية ومياه الصرف الصحي المنزلية.

الكلمات المفتاحية: عين العنصر، تلمسان، مكمن كارستي، المعايير الفيزيائية-كيميائية، النترات، المخططات، التمدن، Xlstat، ACP، CAH

RESUME :

CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOCHIMIQUE DE LA SOURCE D'EL ONSOR, WILAYA DE TLEMCCEN, NORD-OUEST ALGERIEN.

Le but de ce travail est de déterminer l'origine de la minéralisation et d'évaluer la qualité des eaux de la source El Onsor à travers un suivi physico-chimique étalé sur la période 2017–2024 (85 échantillons).

D'après les interprétations des analyses physico-chimiques, les eaux de la source présentent un pH globalement alcalin (6,90 à 8,10) et conforme à la norme de potabilité. La conductivité électrique (598 à 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est au-dessous de la norme algérienne prescrite. Tous les paramètres chimiques (cations et anions) sont au-dessous des normes du JORA, excepté les teneurs en nitrates (NO_3^-) qui affichent une variabilité critique (18 à 180 mg/L) dépassant souvent le seuil admissible de 50 mg/L dans la majorité des échantillons étudiés, ce qui met en évidence un impact anthropique majeur.

Les diagrammes de Schoeller Berkloff et Stabler montrent 3 faciès : bicarbonaté calcique, bicarbonaté magnésien et bicarbonaté sodique, tandis que le diagramme de Piper classe les eaux en deux familles de faciès : Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et Bicarbonatée calcique et magnésienne .

Les pourcentages en $\% \text{Na}^+$ et l'indice de Kelly's Ratio montrent que les eaux de la source d'El Onsor sont très bonnes à bonnes pour l'usage en irrigation. Le diagramme de Wilcox classe les eaux dans la catégorie bonne tandis que celui de Riverside indique une eau admissible pour l'irrigation (C3-S1).

L'application des méthodes statistiques multivariées (ACP et CAH) révèle que la chimie des eaux est principalement régulée par deux phénomènes : l'interaction naturelle eau-roche (dissolution des formations carbonatées de l'aquifère karstique liée au temps de séjour) et une pollution exogène diffuse. Cette pollution, caractérisée par le triptyque anthropique K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^- , est directement associée aux pratiques agricoles et aux rejets domestiques.

Mots clés : Aïn El Onsor, Tlemcen, aquifère karstique, paramètres physico-chimiques, nitrates, Diagrammes, minéralisation, Xlstat, ACP, CAH.

ABSTRACT :

CONTRIBUTION TO THE HYDROGEOCHEMICAL STUDY OF THE EL ONSOR SPRING, TLEMCEN WILAYA (NORTH-WESTERN ALGERIA).

The aim of this work is to determine the origin of mineralization and to assess the quality of the waters of the El ONSOR spring through physicochemical monitoring carried out over the period 2017–2024 (85 samples).

Based on the interpretation of physicochemical analyses, the spring waters show a globally alkaline pH (6.90 to 8.10) and comply with drinking water standards. The electrical conductivity (598 to 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$) is below the prescribed Algerian standard. All chemical parameters (cations and anions) are below the JORA standards, except for nitrate (NO_3^-) contents, which display a critical variability (18 to 180 mg/L), frequently exceeding the admissible threshold of 50 mg/L in the majority of the studied samples, highlighting a major anthropogenic impact.

The Schoeller-Berkaloff and Stabler diagrams show 3 facies: calcium bicarbonate, magnesium bicarbonate, and sodium bicarbonate, while the Piper diagram classifies the waters into two facies families: chloride and sulfate calcium and magnesium, and calcium and magnesium bicarbonate.

The percentages of $\% \text{Na}^+$ and Kelly's Ratio show that the waters of the El ONSOR spring are very good to good for irrigation use. The Wilcox diagram classifies the waters in the "good" category, while the Riverside diagram indicates acceptable water for irrigation (C3-S1).

The application of multivariate statistical methods (PCA and HCA) reveals that water chemistry is mainly regulated by two phenomena: natural water-rock interaction (dissolution of carbonate formations of the karst aquifer related to residence time) and diffuse exogenous pollution. This pollution, characterized by the anthropogenic triptych K^+ , SO_4^{2-} , and NO_3^- , is directly associated with agricultural practices and domestic wastewater.

Keywords : Ain El ONSOR, Tlemcen, karst aquifer, physicochemical parameters, nitrates, Diagrams, mineralization, Xlstat, PCA, HCA.

LISTE DES ABBREVIATIONS.

P : Précipitations.

T : Températures.

IRR: irrigation.

BI : Balance Ionique.

Meq/L : Milliéquivalent par litre.

r : Quantité en réaction.

CE : Conductivité électrique.

NTU : Néphélométrie Turbidité Unit.

Ca²⁺ : Ion Calcium.

Mg²⁺: Ion Magnésium.

Na⁺: Ion Sodium.

K⁺ : Ion Potassium.

Cl⁻ : Ion Chlorure.

HCO₃⁻ : Ion Bicarbonate.

SO₄²⁻ : Ion Sulfate.

NO₃⁻ : Ion Nitrate.

PH : Potentiel d'Hydrogène.

TH : Titre Hydrotimétrique.

°F: degré français.

KR : Indice de Kelly's Ratio.

%Na⁺ : Pourcentage de Sodium.

SAR : Sodium Alcalinité Ratio.

A.N.R.H. : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

LISTE DES FIGURES

• Chapitre I : Situation géographique et climat de la région d'étude

Fig.01 : Carte géographique de la wilaya de Tlemcen (ResearchGate,2024).....	04
Fig.02 : Situation géographique de la zone d'étude	05
Fig.03 : Variations des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (1996-2025).....	07
Fig.04 : Variation des précipitations saisonnières.....	08
Fig.05 : Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales (1996-2025).....	09
Fig.06 : Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gausson.....	10
Fig.07 : Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne.....	11
Fig.08 : Climagramme d'EMBERGER.....	13
Fig.09 : Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).....	15
Fig.10 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (P.VERDEIL,1988).....	17

• Chapitre II : Contexte Géologique et Hydrogéologique

Fig.01 : Carte géologique de la zone d'étude indiquant l'emplacement de la source d'Aïn El Onsor (Tlemcen).....	28
Fig.02 : Colonne litho-stratigraphique des Monts de Tlemcen (D'après BENEST et al, 1999 in BENZINA.M, 2012).....	29
Fig.03 : Schéma structural simplifié des Monts de Tlemcen (ELMI.S, 1970).....	32

• Chapitre III : Hydrochimie

Fig.01 : Variation temporelle du pH.....	40
Fig.02 : Variation temporelle des conductivités électriques.....	41
Fig.03 : Variations des minéralisations.....	42
Fig.04 : Variation temporelle du calcium.....	43
Fig.05 : Variation temporelle du Magnésium.....	44
Fig.06 : Variation temporelle du sodium.....	45
Fig.07 : Variation temporelle du Potassium.....	46
Fig.08 : Variation temporelle des chlorures.....	47
Fig.09 : Variation temporelle des Sulfates.....	48
Fig.10 : Variation temporelle des nitrates.....	49
Fig.11 : Variation temporelle des Bicarbonates.....	50
Fig.12. A : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	53
Fig.12. B : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	54
Fig.12. C : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	55
Fig.12. D : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	56
Fig.12. E : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	57
Fig.12. F : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	58
Fig.12. G : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff	59
Fig.13.A : Diagramme de Stabler.....	60
Fig.13.B : Diagramme de Stabler.....	61
Fig.13.C : Diagramme de Stabler.....	62
Fig.13.D : Diagramme de Stabler.....	63
Fig.14.A : Diagramme de Piper.....	65
Fig.14.B : Diagramme de Piper.....	66
Fig.14.C : Diagramme de Piper.....	67
Fig.14.D : Diagramme de Piper.....	68
Fig.15.A: Diagramme de RIVERSIDE	72
Fig.15.B: Diagramme de RIVERSIDE	73
Fig.15.C: Diagramme de RIVERSIDE	74

Fig.15.D: Diagramme de RIVERSIDE	75
Fig.16.A : Diagramme de WILCOX.....	76
Fig.16.B : Diagramme de WILCOX.....	77
Fig.16.C : Diagramme de WILCOX.....	78
Fig.16.D : Diagramme de WILCOX.....	79
Fig.17 : Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) portées les résultats d'analyse chimiques des éléments majeurs des eaux d'El Onsor.....	87

LISTE DES TABLEAUX

- **Chapitre I : Situation géographique et climat de la région d'étude**

Tab 01 : Caractéristiques de la station climatologique de Tlemcen (A.N.R.H).....	06
Tab 02 : Précipitations moyennes annuelles (1996-2025).....	07
Tab 03 : Précipitations moyennes mensuelles (1996-2025).	08
Tab 04 : Précipitations saisonnières.....	09
Tab 05 : Températures moyennes, maximales et minimales.....	10
Tab 06 : Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (1996-2025).....	11
Tab 07 : Indice d'aridité de DE Martonne.....	12
Tab 08 : Résultats des indices d'aridité mensuels de DE Martonne.....	14
Tab 09 : Indice d'Emberger.....	14
Tab10 : Calcul de l'ETR par la méthode de TURC.....	16
Tab11 : Valeur du déficit d'écoulement (d'après P. VERDEIL).....	18
Tab12 : Valeurs de l'ETP corrigée à la station de Tlemcen (1996-2025).....	19
Tab13 : Bilan hydrologique selon Thornthwaite (1996-2025).....	20

- **Chapitre II : Hydrochimie**

Tab.01 : Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier.J.2009).....	41
Tab.02 : Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier .J.2009).....	42
Tab.03 : Classification des eaux de la source d'el Onsor , selon les normes algériennes.....	51
Tab.04 : Classification des eaux, selon le pourcentage en Na^+	70
Tab.05 : Coefficient de variation.....	81
Tab.06 :Matrice des corrélations.....	82
Tab.07 :Valeurs propres.....	82
Tab.08 :Corrélations entre les variables et les facteurs	83
Tab.09 : Décomposition de la variance pour la classification optimale.....	83

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Dédicaces	
Résumés	
Liste des Abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Situation géographique et climat de la région d'étude.

I-1 Situation Géographique de la région d'étude.....	04
I.1.1 Situation géographique générale.....	04
I.1.2 Situation géographique locale.....	05
I.2 Etude Climatologique.....	06
I.2.1 Les précipitations	06
I.2.1.1 Les précipitations moyennes annuelles.....	06
I.2.1.2 Les précipitations moyennes mensuelles.....	08
I.2.2 Les précipitations saisonnières.....	08
I.2.3 Températures.....	09
I.3 L'étude du climat.....	10
I.3.1 Méthodes graphiques (méthodes de visualisation).....	11
I.3.2 Les indices climatiques.....	12
a) Indice d'Aridité de DE Martonne (1923).....	12
Indice d'aridité annuel.....	12
Indice d'aridité mensuel.....	13
b) Indice d'EMBERGER.....	14
I.3.3 Bilan Hydrologique.....	15
I.4 CONCLUSION.....	21

Chapitre II : Contexte Géologique et Hydrogéologique

II.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE	23
II.1.1 LITHO-STRATIGRAPHIE DES MONTS DE TLEMCEN.....	23
A. LE SECONDAIRE.....	23
➤ Le Trias.....	23
➤ Le Lias et le Dogger.....	23
➤ Les argiles de Saïda.....	24
➤ Les Grès de Boumediène.....	24
➤ Les calcaires de Zarifet.....	24
➤ Les dolomies de Tlemcen.....	24
➤ Les Calcaires de Stah.....	25
➤ Les marno- Calcaires de Raourai.....	25
➤ Les Calcaires de Lato.....	25
➤ Les dolomies de Terni.....	25
➤ Les marno-calcaires de Hariga.....	25
➤ Les Marno-Calcaires D'Ouled Mimoune.....	25
B. LE CRÉTACÉ.....	25
➤ Les argiles de Lamoricière.....	25
➤ Les grès de Berthelot.....	25
➤ Les calcaires de Zigyne.....	25
C. LE TERTIAIRE.....	25
a) L'ÉOCÈNE.....	2
5	
b) LE MIOCÈNE.....	25
c) Le Pliocène.....	26
D. LE QUATERNAIRE.....	27

II.1.2 ANALYSE STRUCTURALE.....	27
A. PRINCIPALES PHASES TECTONIQUES.....	30
B. Contexte géologique de la zone étudiée.....	32
II.2 HYDROGEOLOGIE.....	33
II.2.1 Propriétés hydrogéologiques des formations.....	33
A. Les formations du Jurassique supérieur.....	33
B. Les formations du Crétacé.....	34
C. Les formations du Mio-Plio-Quaternaire.....	34
II.2.2 Conditions d'émergence de la source d'El Onsor.....	35
II.3 CONCLUSION.....	36
Chapitre III : Hydrochimie	
III.1 Introduction.....	38
III.2 Balance ionique.....	38
III.3 Etude des paramètres physico-chimiques.....	38
III.3.1. Les paramètres physiques.....	39
❖ Potentiel d'Hydrogène Ph.	39
❖ Conductivité électrique.....	40
❖ La minéralisation.....	42
III.3.2 Les paramètres chimiques.....	43
❖ Les cations.....	43
• L'ion calcium.....	43
• L'ion Magnésium.....	44
• L'ion sodium.....	44
• L'ion Potassium.....	45
❖ Les anions.....	46
• L'ion chlorure.....	46
• L'ion sulfate.....	47
• L'ion nitrate.....	48
• L'ion Bicarbonate.....	49
III.4 Potabilité de l'eau étudiée (Classification selon les normes Algériennes).....	51
III.4.1 Classification des eaux selon les paramètres physico-chimiques.....	51
III.5 Classifications des eaux.....	53
III.5.1 Le diagramme de H. SCHOELLER et E. BERKALOFF.....	61
III.5.2 Diagramme logarithmique de Stabler.....	65
III.5.3 Le diagramme triangulaire de PIPER.....	70
2 Aptitude des eaux destinées à l'irrigation.....	70
III.2.1 Le pourcentage en Sodium (% Na ⁺).....	71
III.2.2 Indice de Kelly's Ratio (Kr).....	71
III.2.3 Diagramme de Riverside.....	77
III.2.4 Diagramme de WILOX.....	79
III.3 L'origine de la minéralisation.....	81
a) L'analyse corrélative.....	82
b) Analyse factorielle.....	83
c) Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	85
Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	89
Références bibliographiques	93
Annexes.....	95
Résumés.....	115

INTRODUCTION GENERALE.

L'eau représente pour l'environnement ce que le sang est au corps humain : une ressource vitale pour tout organisme. Au-delà de son caractère indispensable à la vie, elle constitue un levier stratégique du développement durable et des activités humaines.

À Tlemcen, la diversité des ressources hydriques impose une gestion rigoureuse. L'exploitation de ces eaux, qu'elle soit à usage domestique ou agricole, doit impérativement tenir compte de leurs spécificités physico-chimiques face aux menaces croissantes de pollution. Ainsi, le suivi de la qualité de l'eau est devenu un impératif majeur pour la sauvegarde des écosystèmes.

Cette étude se propose pour analyser, sous un angle hydrogéochimique, les eaux de la source El Onsor à Tlemcen. L'objectif est de déterminer l'origine de leur minéralisation et d'évaluer leur conformité aux normes de potabilité et d'irrigation. Ce travail est subdivisé en plusieurs chapitres :

Chapitre I : *Situation Géographique et Climat de la région d'étude* : il s'étale en deux parties :

- **1^{ère} partie** : Présentation géographique générale et localisation de la zone d'étude.
- **2^{ème} partie** : détermination du type du climat qui caractérise la zone d'étude, ainsi que les variations des paramètres climatiques qui affectent le régime de la source.

-Chapitre II : *Contexte Géologique et Hydrogéologique*. Il englobe :

- **La géologie** : son objectif est de décrire les différentes formations géologiques et les grands traits structuraux présents dans la région d'étude.
- **L'Hydrogéologie** : Pour la détermination des formations géologiques qui peuvent être aquifères.

-Chapitre III : *Hydrogéochimie*.

Le but principal de ce chapitre est de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux de la source. A partir des analyses physico-chimiques que nous disposons, nous avons aussi caractérisé la qualité des eaux pour la consommation, leurs faciès chimiques et leur aptitude pour l'irrigation.

À la fin, ce travail sera clôturé par une **Conclusion Générale**.

**Chapitre I : Situation géographique et
climat de la région d'étude.**

I.1.2 Situation géographique locale :

Tlemcen, ville des sources, elle est connue par sa richesse en eaux souterraines et de surface. Parmi les sources d'eau, nous allons étudier la source d'El Onsor, située entre les localités d'Oujlida et d'Aïn El Houtz, dans une zone à caractère montagneux appartenant aux Monts de Tlemcen. Elle a pour coordonnées :

X= 130.75 Y=188.22

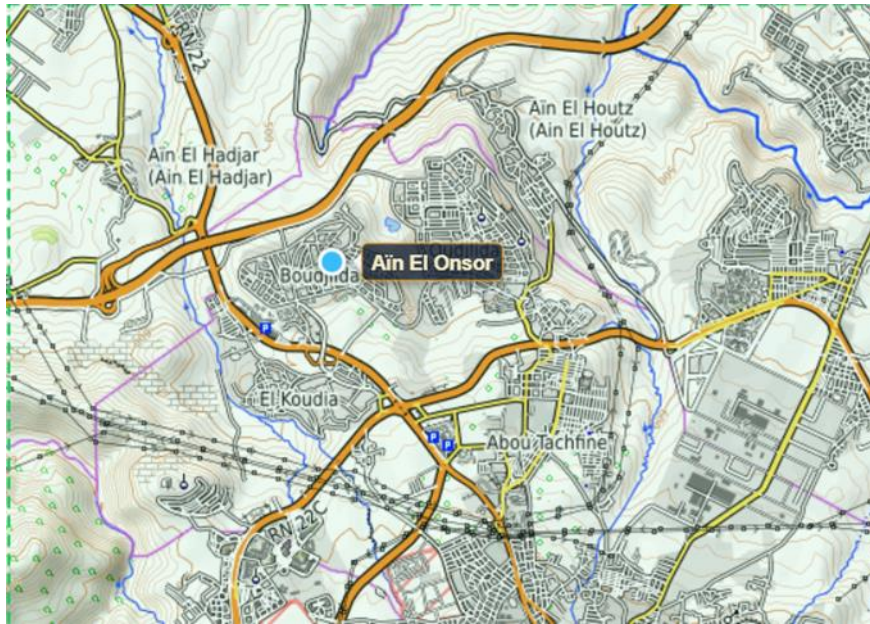


Fig02 : Situation géographique de la source étudiée

I.2 Etude Climatologique

La climatologie constitue une composante essentielle du milieu géographique, dans la mesure où elle dépend étroitement des caractéristiques physiques telles que le relief et l'altitude propres à chaque région. Afin de mieux appréhender les conditions climatiques de la région d'étude, il est nécessaire d'en présenter les principaux aspects climatiques de manière détaillée. Pour cela, nous avons utilisé les données des précipitations et des températures de la station de Tlemcen (1996-2025).

Tab 01 : Caractéristiques de la station climatologique de Tlemcen (A.N.R.H).

La station	Altitude (m)	Latitude	Longitude
Tlemcen / A.N.R.H.	620m	34.87°N	-1.28° W

I.2.1 Les précipitations :

Les précipitations sont l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface terrestre à l'état liquide ou solide.

I.2.1.1 Les précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles désignent la hauteur moyenne des précipitations enregistrées en un lieu sur une année, établie à partir d'une série d'observations pluriannuelles. On s'est basé sur les données de la station météorologique de Tlemcen couvrant la période de 1996 à 2025.

Tab 02 : Précipitations moyennes annuelles (1996-2025).

Années	1996	1997	1998	1999	2000	2001
P(mm)	600,5	564,8	354,9	663,6	311,8	507,1
Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007
P(mm)	470,4	654,8	519,8	366,4	460,1	467,7
Années	2008	2009	2010	2011	2012	2013
P(mm)	646	569	618,7	642,4	604,5	805,7
Années	2014	2015	2016	2017	2018	2019
P(mm)	614,4	407,6	687,7	376	384,3	410
Années	2020	2021	2022	2023	2024	2025
P(mm)	380	256	320	216	315	353

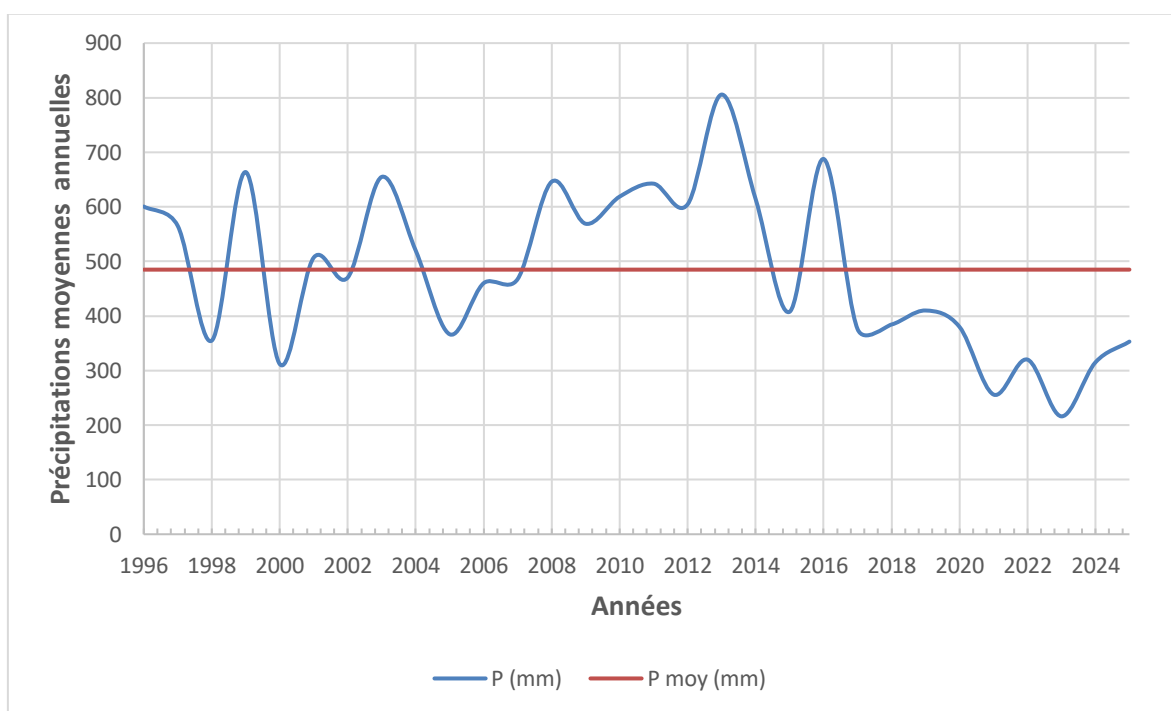


Fig.03 : Variations des précipitations moyennes annuelles à la station de Tlemcen (1996-2025).

La pluviométrie annuelle moyenne relevée à la station de Tlemcen a présenté une variabilité significative sur la période étudiée. Un pic pluviométrique de 805,7 mm a ainsi été atteint en 2013, alors que le minimum, s'établissant à 216 mm, a été enregistré en 2023. En parallèle, la moyenne annuelle des précipitations s'est élevée à 484,9 mm

I.2.1.2 Les précipitations moyennes mensuelles :

Tab 03 : Précipitations moyennes mensuelles (1996-2025).

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC
P(mm)	69	59,3	52,1	48,6	37,3	7,4	2,1	5,4	25,7	44,8	70,2	63

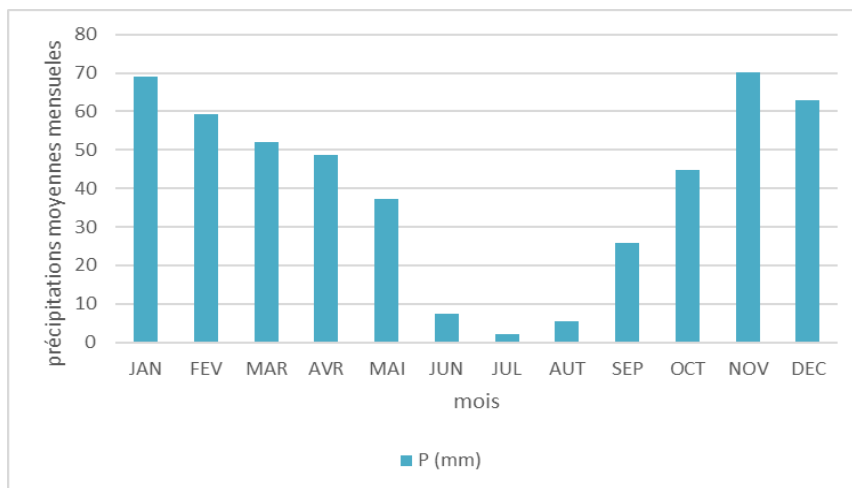


Fig.04 : Variations des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (1996-2025).

La figure 04 illustrant la variation des précipitations mensuelles moyennes pour la station de Tlemcen, indique que le mois de novembre enregistre le volume le plus important, atteignant 70.2 mm. À l'opposé, juillet présente la pluviométrie la plus faible, avec seulement 2,1 mm.

I.2.2 Les précipitations saisonnières :

Représentées par les quatre saisons de l'année :

- **Automne** : Septembre, Octobre Novembre.
- **Hiver** : Décembre, Janvier, Février.
- **Printemps** : Mars, Avril, Mai.
- **Été** : Juin, Juillet, Août.

Tab 04 : Précipitations saisonnières.

Saisons	P (mm)
Printemps	138
Été	14,9
Automne	140,7
Hiver	191,3

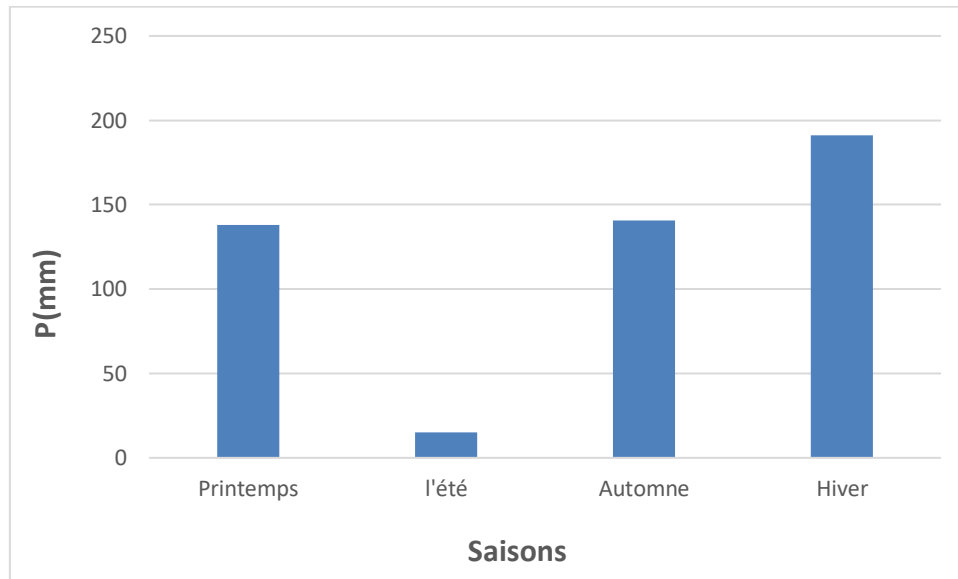


Fig.05 : Variation des précipitations saisonnières.

Les variations des précipitations, segmentées par saison, indiquent que la période hivernale est caractérisée par une humidité maximale (191.3mm), en contraste avec la période estivale qui présente les niveaux de pluviométrie minimaux (14.9mm).

I.2.3 Températures :

Le climat est directement influencé par la température, qui interagit avec les éléments biogéographiques et météorologiques. Elle permet de déterminer les indicateurs climatiques grâce à l'analyse des prélèvements.

Tab 05 : Températures moyennes, maximales et minimales.

Mois	JAN	FEV	MAR	ARV	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC
T moy	10,5	11,2	13,4	15,8	19,2	23,8	27,1	27,4	23,6	19,8	14,4	11,3
T max	15,5	16,4	19	21,7	25,2	30,7	34,5	34,8	30,2	26	19,6	16,4
T min	5,7	5,9	7,8	9,7	13	16,3	19,5	20,2	17,3	14,1	9,5	6,6

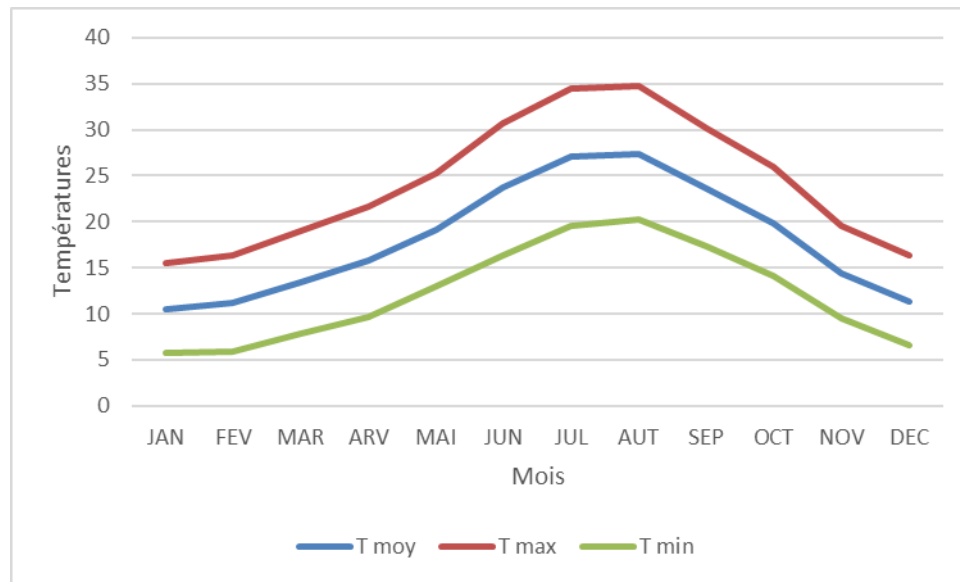


Fig.06 : Températures moyennes mensuelles, minimales et maximales (1996-2025).

Conformément aux relevés effectués à la station de Tlemcen, la température moyenne mensuelle est de 18.1 °C, tandis que la température moyenne minimale est enregistrée à 5,7 °C en janvier. Par ailleurs, la moyenne mensuelle des températures maximale atteint son pic en août, avec une valeur de 34,8 °C.

I.3 L'étude du climat :

L'analyse du climat peut être effectuée à partir :

- Des graphes, illustrant des phases sèches et humides.
- Du calcul des indices climatiques annuels et mensuels, basé sur les informations météorologiques.

Tab 06 : Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (1996-2025).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aut	Sep	Oct	Nov	Déc
P (mm)	69	59,3	52,1	48,6	37,3	7,4	2,1	5,4	25,7	44,8	70,2	63
T °C	10,5	11,2	13,4	15,8	19,2	23,8	27,1	27,4	23,6	19,8	14,4	11,3

I.3.1 Méthodes graphiques (méthodes de visualisation) :

- Les courbes pluviothermiques :

Selon Gaussen et Bagnols, un mois est considéré comme sec lorsque la courbe des températures se situe au-dessus de celle des précipitations. Il est qualifié d'humide si la courbe des précipitations dépasse celle des températures. Cette approche permet de construire des diagrammes pluvio-thermiques où la température est représentée à une échelle double de celle des précipitations ($P=2T$).

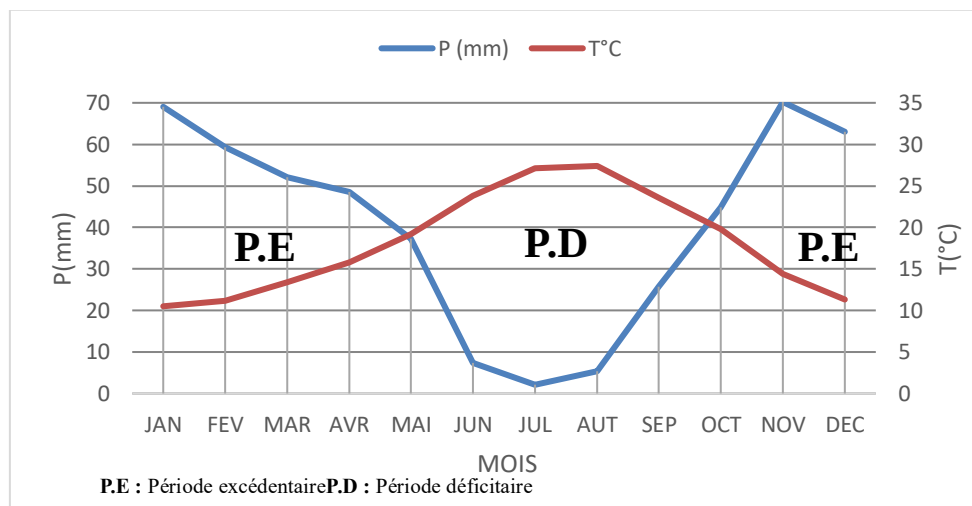


Fig.07 : Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen.

Le diagramme pluvio-thermique (Fig n° 07) révèle l'alternance de deux régimes climatiques distincts. La première phase, caractérisée par un excédent hydrique, débute au mois de janvier jusqu'au mois de mai, et de la fin septembre au début du mois de décembre. La seconde, une phase déficitaire, s'étend sur le reste de l'année (début mai à la fin septembre), période durant laquelle les apports pluviométriques s'avèrent insuffisants au regard des exigences climatiques locales.

I.3.2 Les indices climatiques :

a) Indice d'Aridité de DE Martonne (1923) :

Cet indice est couramment utilisé pour décrire l'aridité climatique, en intégrant la pluviométrie annuelle et la température annuelle moyenne.

- Indice d'aridité annuel :

Selon De Martonne, l'indice annuel d'aridité s'exprime par le rapport entre la pluviométrie annuelle et la température moyenne annuelle : $I = \frac{P}{T+10}$

DE Martonne propose la classification suivante :

- P : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- T : Température moyenne annuelle (°C).
- I : indice d'aridité annuel.

Tab 07 : Indice d'aridité de DE Martonne

Valeur de I	Type de climat
$30 < I < 60$	Climat humide.
$20 < I < 30$	Climat tempéré
$10 < I < 20$	Climat Semi-aride
$7.5 < I < 10$	Climat steppique
$5 < I < 7.5$	Climat désertique
$I < 5$	Climat hyper- aride

$P = 484,9$; $T = 18,1$ alors **$I = 17,25$**

Selon le tableau n°07, la valeur calculée de I est entre 10 et 20, c'est-à-dire que la zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride. La projection des précipitations et température dans l'abaque de DE Martonne (fig n°08) montre aussi que le climat de la région étudiée est semi-aride à écoulement temporaire.

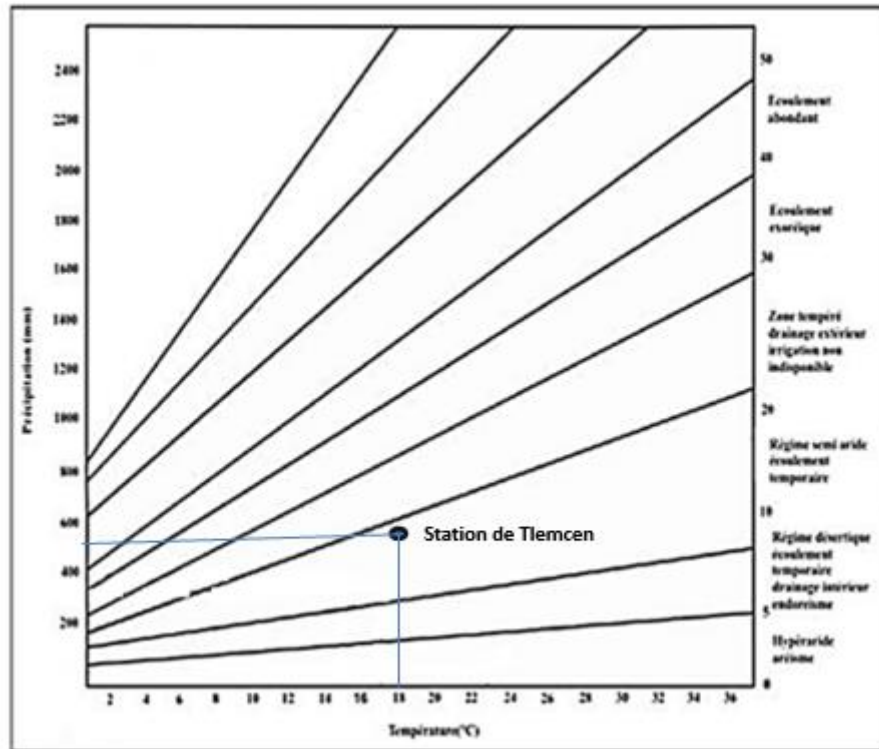


Fig.08 : Abaque de l'Indice d'aridité annuel de DE Martonne.

L'abaque de DE Martonne (fig.08) a classé la zone étudiée dans un climat semi-aride à écoulement temporaire.

➤ Indice d'aridité mensuel :

La formule ci-dessous fournit la valeur : $i = \frac{12P}{t+10}$

- P : Précipitations moyennes mensuelles (mm)
- t : Températures moyennes mensuelles (°C)
- i: indice d'aridité mensuelle.

Avec :

H : Humide ; **T**:Tempéré ; **SA**:Semi- Aride ; **HA** : Hyper- Aride ; **S** :Steppique.

Tab 08 : Résultats des indices d'aridité mensuels de DE Martonne

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC
i	40,4	32,1	26,8	22,7	15,3	2,7	0,7	1,8	9,1	18,0	35,5	35,4
Type de régime	H	H	T	T	SA	HA	HA	HA	S	SA	H	H

b) Indice d'EMBERGER :

Ce diagramme climatique facilite l'identification de la strate bioclimatique d'une certaine région. Il est déterminé à partir de la formule suivante : $Q2 = \frac{1000 \times P}{\frac{M+m}{2}(M-m)}$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

M : Moyenne des maximas de la température en (°K) du mois le plus chaud (Août : 34,8 °C).

m : Moyenne des minimas de la température en (°K) du mois le plus froid (Janvier : 5,7°C).

Q2 : Quotient pluviothermique d'Emberger.

Avec : $K = T (^{\circ}\text{C}) + 273$

Tab 09 : Indice d'Emberger.

P (mm)	M	m	Q2
484,9	307,8	278,7	56,82

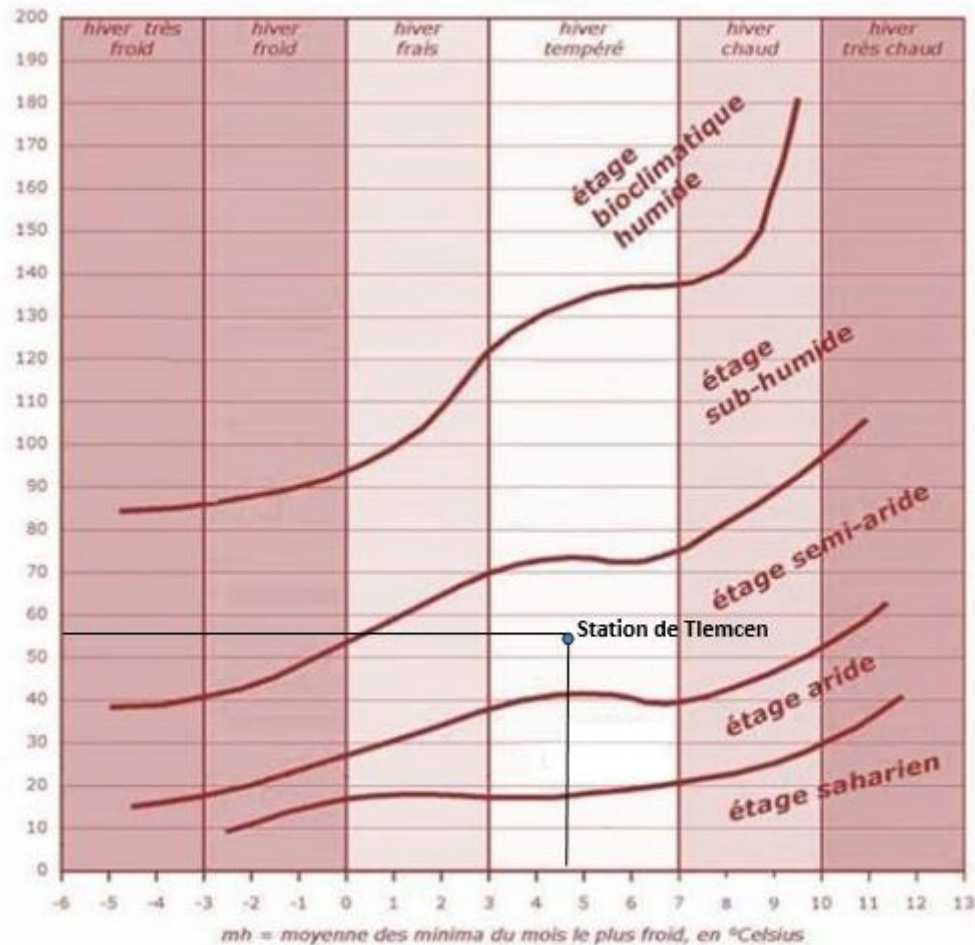


Fig.09 : Climagramme d'EMBERGER.

Dans le climagramme d'Emberger (Fig n°09), où les ordonnées représentent Q2 et les abscisses, la moyenne des minima du mois le plus froid, la projection de ces valeurs reflète que la zone d'étude appartient à l'étage semi-aride.

I.3.3 Bilan Hydrologique :

Evapotranspiration et déficit d'écoulement :

L'évapotranspiration représente la quantité totale d'eau transférée du sol vers l'atmosphère, résultant à la fois de l'évaporation directe du sol et de la transpiration des plantes. On distingue généralement deux formes : l'évapotranspiration réelle (ETR), qui correspond à l'eau effectivement évaporée dans les conditions naturelles, et l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui désigne la quantité maximale d'eau pouvant être évaporée si l'eau était disponible en quantité suffisante. Par ailleurs, le déficit d'écoulement correspond à la différence entre les précipitations reçues et la lame d'eau effectivement écoulee.

L'estimation de ce paramètre peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes.

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

❖ Evapotranspiration réelle (ETR) :

a) La méthode de TURC.

La formule proposée par Turc (1954) constitue une approche empirique pour estimer l'ETR annuelle à partir des données de pluie et de température moyenne annuelle, comme

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

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

P : pluviométrie moyenne annuelle, en (mm).

T : température moyenne annuelle, en (C°).

ETR : évapotranspiration réelle annuelle, en (mm/an).

Tab10 : Calcul de l'ETR par la méthode de TURC.

P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm/an)
484,9	18,1	1048,98	460,4

L'application de l'équation de TURC aux paramètres de la zone donne une évapotranspiration réelle de 460,4 mm/an.

b) Méthode de WUNDT :

Wundt a mis en place une table des courbes, révisée par M. Coutagne, qui permet de déterminer une valeur du déficit d'écoulement « D » en relation avec la température moyenne annuelle « T » et les précipitations « P ».

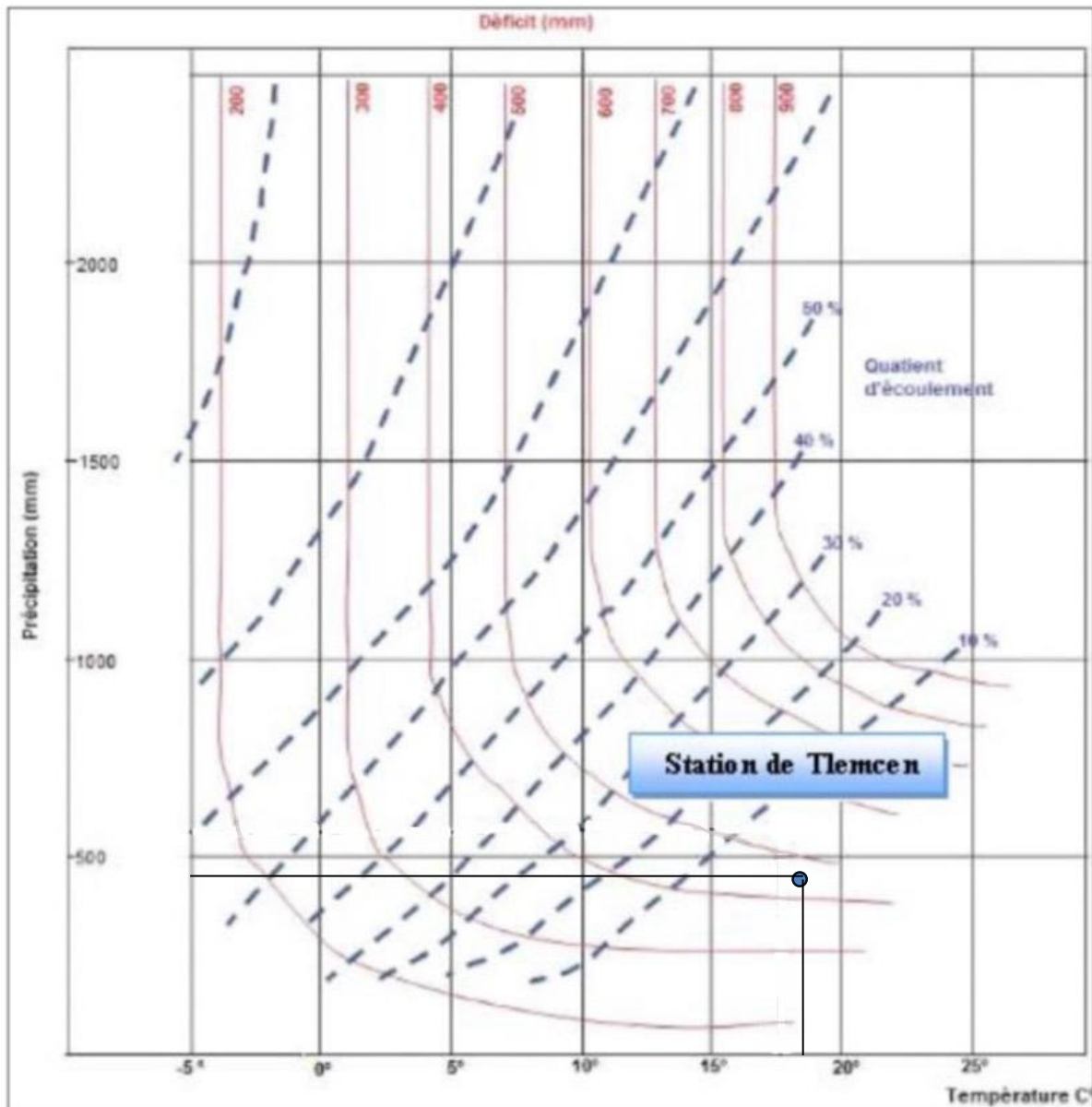


Fig.10 : Détermination du déficit d'écoulement (Abaque de WUNDT).

La projection des paramètres climatiques sur le diagramme de Wundt a permis d'estimer un déficit d'écoulement de l'ordre de 480 mm/an.

c) Méthode de P.VERDEIL :

Verdeil (1988) a conçu un abaque bi-logarithmique pour l'Algérie, se basant uniquement sur les prélèvements annuels, pour estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou du déficit d'écoulement, en tenant compte des spécificités des régions semi-arides.

Tab11 : Valeur du déficit d'écoulement (d'après P. VERDEIL).

P(mm)	Déficit (mm/an)	Ecoulement et infiltration (mm)
484,9	480	23,1

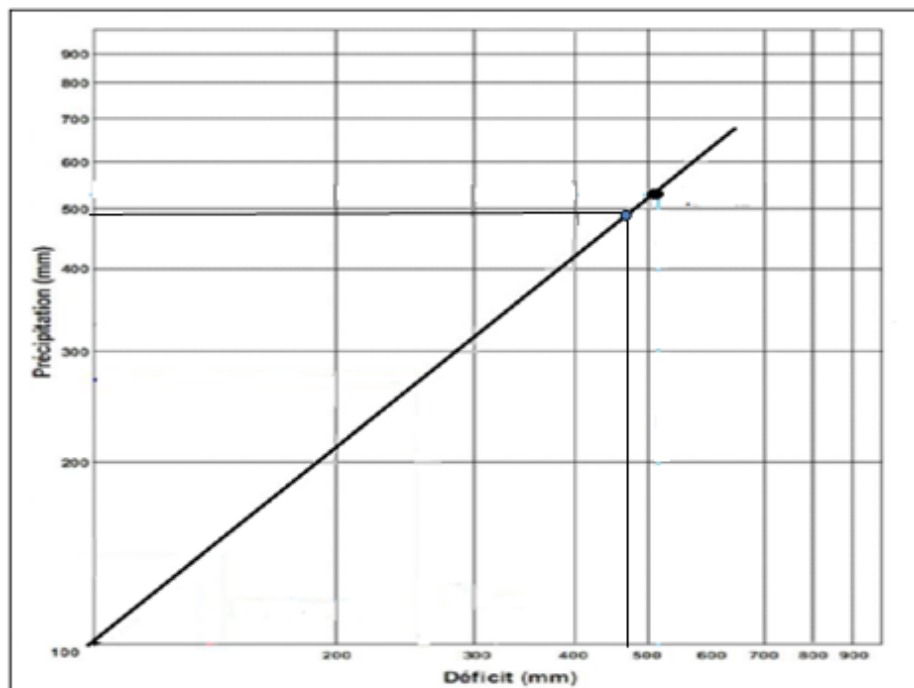


Fig.11 : Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie (P.VERDEIL, 1988)

❖ **Evapotranspiration potentielle (ETP) :**

a) Méthode de THORNTHWAITE :

Selon l'approche empirique de C.W. Thornthwaite, l'évapotranspiration potentielle est déterminée pour chaque mois en fonction de la température, puis ajustée selon la latitude. Le développement de cette relation conduit à la formule suivante :

1) ETP non corrigée : $16 \left(\frac{T}{I} \times 10 \right)^a$

Avec : $a = 0,016 I + 0,5$

2) ETP corrigée : $16 \left(\frac{T}{I} \times 10 \right)^a \times K$

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm),

i : Indice thermique mensuel, $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$

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 Tlemcen (34°N).

a = 1,9

Tab12 : Valeurs de l'ETP corrigée à la station de Tlemcen (1996-2025).

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC	Annuel
T(°C)	10,5	11,2	13,4	15,8	19,2	23,8	27,1	27,4	23,6	19,8	14,4	11,3	18,1
I	3,07	3,39	4,44	5,7	7,66	10,61	12,92	13,13	10,47	8,03	4,96	3,43	87,8
ETP Noncorrigée	22,47	25,4	35,72	48,85	70,75	106,4	136,18	139,06	104,71	75,01	40,96	25,84	831,35
K	0.88	0,85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86	/
ETPcorrigée (mm)	19.77	21.59	36.79	53.24	84.90	127.68	166.13	161.30	107.85	72.75	35.63	22.22	909.85

❖ **Evapotranspiration réelle (ETR) :**

Puisque l'évapotranspiration réelle est Associée aux stocks d'eau disponibles, nous pouvons envisager deux scénarios :

- Si les P dépassent l'ETP, alors l'ETR est égal à l'ETP.
- Dans le cas où les prélèvements sont moindres que l'ETP, l'ETR sera identique à l'ETP tant que les réserves d'eau dans le sol pourront maintenir l'équilibre ; passé ce seuil, un déficit se crée.

↪ Calcul de la réserve en eau du sol :

La R.F.U est déterminée en appliquant la formule de Hallaire (1960), qui s'exprime comme suit

$$: Ru = \frac{C-F}{100} HD + 30$$

Ru : Réserve utile en eau du sol.

C : Capacité au champ.

f : Capacité au point de flétrissement.

H : Profondeur du sol (H=500 mm).

D : Densité apparente du sol (D=1).

30 mm : Enracinement capillaire.

Les valeurs de (C – f) dépendent de la nature du sol, d'après les travaux antérieurs consultés :

C-f = 20%, donc : Ru=130 mm.

Tab13 : Bilan hydrologique selon Thornthwaite (1996-2025).

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN (mm)
P (mm)	69	59,3	52,1	48,6	37,3	7,4	2,1	5,4	25,7	44,8	70,2	63	484,9
ETP Corr (mm)	19,77	21,59	36,79	53,24	84,9	127,68	166,13	161,3	107,85	72,75	35,63	22,22	909,85
Ru (130mm)	49,23	86,94	102,25	97,61	50,01	0	0	0	0	0	34,57	75,35	495,96
ETR (mm)	19,77	21,59	36,79	53,24	84,9	57,41	2,1	5,4	25,7	44,8	35,63	22,22	409,55
DA (mm)	0	0	0	0	0	70,27	164,03	155,9	82,15	27,95	0	0	500,3
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Écoulement (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Infiltration (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.CONCLUSION :

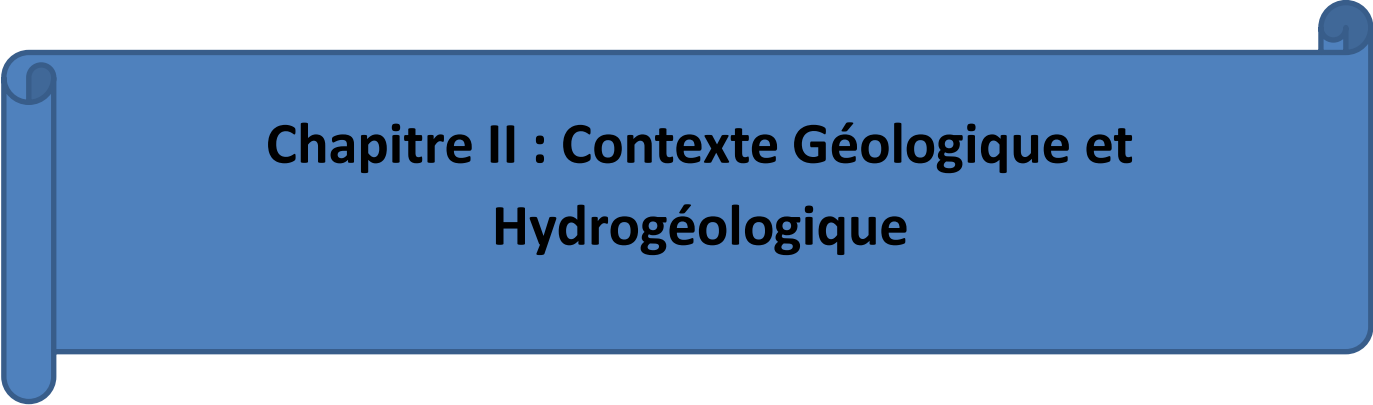
La zone d'étude s'inscrit dans un contexte climatique de type semi-aride, marqué par une variabilité interannuelle des paramètres météorologiques, en particulier les précipitations et les températures.

L'exploitation des données climatiques met en évidence une pluviométrie annuelle moyenne avoisinant 484,9 mm. Parallèlement, le régime thermique montre des variations mensuelles modérées à élevées, la moyenne mensuelle des températures est de 18,1 °C. La température moyenne minimale est de 5,7 °C marquée en janvier. Par ailleurs, la moyenne mensuelle des températures maximales est de 34,8°C enregistrée en août.

Le régime pluviométrique se caractérise par une concentration des apports durant la saison la plus froide (l'hiver), tandis que la période estivale (l'été) est dominée par des conditions nettement sèches, traduisant un contraste saisonnier prononcé.

L'analyse du diagramme pluvio-thermique révèle une alternance nette entre deux périodes : une humide s'étend du début janvier au début mai, puis de nouveau de la fin septembre au début d'octobre, et une période sèche correspondant au reste des mois de l'année. Cette organisation reflète clairement l'influence du climat méditerranéen à tendance semi-aride qui prévaut dans la région.

Par ailleurs, l'établissement du bilan hydrologique permet de mieux appréhender la dynamique de l'eau dans le système étudié. L'évapotranspiration potentielle, estimée à environ 909.85mm/an, dépasse largement l'évapotranspiration réelle, évaluée à 409,55 mm/an. Ce déséquilibre engendre un déficit agricole annuel important, de l'ordre de 500.3 mm. En l'absence d'excédent hydrique significatif, l'écoulement de surface ainsi que l'infiltration restent négligeables. L'ensemble de ces résultats met en évidence une faible disponibilité des ressources en eau, fortement dépendante des conditions climatiques et dominée par des pertes importantes, liées à l'évapotranspiration.



Chapitre II : Contexte Géologique et Hydrogéologique

Introduction :

Ce chapitre présente le contexte géologique et hydrogéologique de la zone d'étude. Il permet d'identifier les principales formations géologiques, l'analyse de ces dernières aides à comprendre le stockage et la circulation des eaux souterraines. Elle met également en évidence les caractéristiques des aquifères présents dans la région. Cette étude constitue une base essentielle pour l'interprétation des résultats. Elle facilite enfin la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du milieu étudié.

II.1 CONTEXE GEOLOGIQUE :

Les Monts de Tlemcen constituent un massif montagneux, localisé dans le Nord-Ouest algérien. Sa composition géologique est principalement caractérisée par des formations datant du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Les formations calcaires et dolomitiques d'âge Kimméridgien et Tithonien représentent plus de 80% de la composition des niveaux sommitaux des plateaux. Ces formations sont ensuite masquées par une couverture sédimentaire tertiaire d'épaisseur notable, comprenant, au Sud des dépôts fluviaux éocènes ainsi que des marnes miocènes, tandis que des sédiments continentaux du Plio-Quaternaire prédominent dans la partie nord.

II.1.1 LITHO-STRATIGRAPHIE DES MONTS DE TLEMCEN :

La caractérisation des formations présentées ci-après s'appuie principalement sur les travaux d'Auclair et Biehler (1967) de Clair et Concaret (1973), de Benest (1978,1982,1985, 1987,1999), de Collignon et Bensaoula (1994, 2006).

A. LE SECONDAIRE : Cette ère géologique constitue la structure principale des Monts de Tlemcen. Ses différentes unités sont distinguées, de la base vers le sommet, comme suit :

➤ Le Trias :

Il est caractérisé par la présence d'argiles rouge-violacées, lesquelles englobent des couches de gypse fibreux. Ces formations sont particulièrement bien exposées à Ain Tellout et au Djebel Larbi. Elles sont par ailleurs associées à des basaltes, à des tufs, calcaires ou dolomies. Au Djebel El Arbi, seules les argiles à gypse sont présentes en affleurement (Auclair D. et Biehler J., 1967 in Abloui.H ,2013).

➤ **Le Lias et le Dogger :**

Les sols carbonatés du Lias et du Dogger affleurent dans l'Ouest de Tlemcen, au Monts de Ghar Roubane et au Djebel Tenouchfi, à la faveur de deux horsts. Le Lias inférieur et moyen correspondent à des calcaires massifs de plus de 200m d'épaisseur. Ces calcaires massifs et karstifiés sont connus par les filons de Blende et de galène exploités jadis au pied sud-ouest du Koudiat Er Ressass. Les variations latérales de faciès ont été également observées dans le Dogger inférieur de la région du Djebel Tenouchfi et au Sud-Ouest de ce massif, en direction de Sidi Aissa (Benest et al., 1978 in Bensaoula.F, 2006).

➤ **Les argiles de Saïda :**

C'est une formation qui peut atteindre 300 à 500 m d'épaisseur, représentée par des dépôts argileux et marneux à passées gréseuses. Elle est attribuée au Callovo-Oxfordien, et apparaissent dans la région de Sabra et plus près du Barrage de Beni Bahdel (Bensaoula.F., 2006).

➤ **Les Grès de Boumediène:**

Ils sont d'âge Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur. Ce sont des grès blancs parfois bruns ferrugineux à la surface, durs avec des intercalations de bancs marneux multicolores. C'est une série épaisse comportant à son sommet des passages de bancs de calcaires bleus appelés calcaires de Zarifet (Benest, 1999 in Ablaoui H., 2013).

Les grès de Boumediène sont particulièrement développés dans la forêt de Zarifet, qui peut atteindre une épaisseur de 500m, et au Sud-Ouest de Terni, au niveau d'El Ourit, de la forêt d'Hafir et vers l'Est, dans la région d'Oum El Alou (Benest, 1999 in Ablaoui H., 2013).

➤ **Les calcaires de Zarifet :**

Ils sont d'âge Kimméridgien supérieur. Ils ont été définis par F. Doumergue (1910) sous le nom de calcaires bleus à géodes. M. Benest (1972) les désigne sous le nom « calcaires de Zarifet », car ils sont particulièrement bien exposés au col de Zarifet, au Sud de Tlemcen.

Il s'agit de bancs calcaires séparés par de minces intercalations de calcaires marneux écaillés, parfois quelque peu fossilifère, marquant presque partout la base très nette du Kimméridgien et reposent directement la consistance du grès de Boumediène, formant les falaises autour de Tlemcen.

➤ Les dolomies de Tlemcen :

Les dolomies de Tlemcen appartiennent au Kimméridgien terminal, elles marquent les Monts de Tlemcen d'un style morphologique en falaises et donnent un relief ruiniforme.

Il s'agit de dolomies cristallines grises, avec de nombreuses cavités remplies de calcite avec une épaisseur de 300 m dans la région de Tlemcen. Elles se trouvent autour d'Ain Fezza, de la forêt de Zarifet, du Nord de Tlemcen, des Djebels Teffatisset, d'Ain El Houtz et au plateau de Terni (Benest, 1985 in Ablaoui H.,2013).

➤ Les Calcaires de Stah :

Ce sont des calcaires micritiques en bancs épais, épargnés de la dolomitisation à dépôt gris clair. Ces énormes calcaires massifs ont peu ou pas de marne, selon les secteurs (Bensaoula. F.,2006).

➤ Les marno- Calcaires de Raourai :

Ce sont des marnes grises d'âge Tithonique inférieur, blanchâtres en surface, où s'intercalent de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs. La formation est délimitée par le calcaire de Stah à sa base et par la première couche de calcaire de Lato ou dolomie de Terni à son sommet. Leur épaisseur varie de 90m à 150m. Cette formation affleure particulièrement sur le plateau de Terni, dans le Djebel Lato et à l'Est d'Ain Fezza (Benest, 1985 in Ablaoui H.,2013).

➤ Les Calcaires de Lato :

C'est des calcaires massifs qui se présentent en bancs épais, terminés par des laminâtes sombres calcaire-argileuses qui peuvent contenir quelques rubanements de silex. Leur épaisseur est de 50 m au Djebel Lato (Benest 1985, in Ablaoui H., 2013).

➤ Les dolomies de Terni :

Doumergue (1910) les classe dans la partie supérieure du Kimméridgien, tandis que Benest M. (1982) les place dans la partie inférieure de Tithonique. Correspondent à la corniche au-dessus des calcaires du Lato, leur épaisseur est d'environ 50m dans la zone de Sebdou et de 100m au plateau de Terni. Elles correspondent à des dolomies parfois vacuolaires, parfois massives avec de nombreuses stratifications obliques qui permettent de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen (Benest,1982 in Ablaoui H., 2013).

➤ Les marno-calcaires de Hariga :

Visibles au Djebel Hariga, épaisseur de 165 m, appartenant à la période de Tithonien moyen, c'est une alternance de calcaires et de marnes, plus ou moins tendres, composée de micro cristaux à patine gris-clair (Benest, 1985 in Ablaoui H., 2013).

➤ Les Marno-Calcaires D'Ouled Mimoune :

Cette formation est constituée principalement de grès et d'argiles du Tithonique supérieur au Berriasien inférieur (grès de Merchiche), suivie d'une alternance de calcaires et de marnes. La limite inférieure de cette formation correspond à la présence des grès de Merchiche sur la marge sud du plateau de Terni (Benest, 1985 in Ablaoui H., 2013).

B. LE CRÉTACÉ :

Représente par la chaîne du Crétacé inférieur. A distinguer de bas en haut :

➤ Les argiles de Lamoricière :

Il s'agit d'une formation argilo-gréseuse de l'ère Berriasien-Valanginien, elle est nettement calcaire au sommet qui affleurement au niveau de Hassi Zerga.

➤ Les grès de Berthelot :

Se compose d'une alternance de grès (à stratification obliques) et d'argiles surmontée d'une succession où dominent les bancs carbonatés de cette formation. Son épaisseur est de 150m. d'âge Hauterivien.

➤ Les calcaires de Zigyne :

Cette formation d'âge Barrémien- Aptien, représente la transition entre le Crétacé et l'Eocène.

C. LE TERTIAIRE :

Représenté par des dépôts essentiellement marins. On distingue les formations suivantes de bas en haut :

a) L'ÉOCÈNE :

Ensemble gréseux avec passage de bancs en poudingues. Il affleure sur une très faible surface, il est constitué de grès siliceux jaunes rougeâtres, assez friables, à ciment argileux, alternant avec des marnes argileuses verdâtres d'une puissance de 100 m à 150 m attribuées à l'Eocène supérieur (Benest, 1985 in Ablaoui H., 2013).

b) LE MIOCÈNE :

Inférieur :

Partent de la formation rocheuse poudingue, avec des éléments calcaires dolomitiques en ciment calcaire-gréseux très dur avec des blocs hétérogènes et polygéniques bien roulés jusqu'à 20 m d'épaisseur. Ce faciès, très résistant et fissuré, montre un grano-classement normal avec des intercalations marneuses à la base. La partie supérieure est composée d'argiles marneuses olivâtre, entrecoupées de couches décimétriques de grès ferrugineux, formant un ensemble de plus de 100 m d'épaisseur (Collignon.B et Bensaoula F., 1994).

Moyen (Serravallien):

Souvent en discordance au Miocène inférieur, déformé et partiellement érodé. Il est composé d'une série de marnes grises ou bleues épaisses qui deviennent ocres lorsqu'elles sont altérées. Au sein de cette série, pouvant atteindre 300 m d'épaisseur dans la vallée de l'Oued Isser, s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grès jaunes, plus fréquents au sommet (Hayane S.M, 1983 in Ablaoui H., 2013).

Supérieur (Tortonien) :

Il est représenté par des grès durs dorés ou citronnés, parfois avec de passées de marnes plus minces, rarement consolidées, jusqu'à 20 à 30 m d'épaisseur. Ces grès ont été datés à l'Helvétien par Doumergue (1910) mais l'analyse micropaléontologique leur donne un âge Tortonien supérieur (Hayane S.M., 1983 in Ablaoui H., 2013).

c) Le Pliocène :

Marqué par des conglomérats de base, à éléments bien roulés de l'Oxfordien et du Kimméridgien, peu développé en surface.

D. LE QUATERNAIRE:

C'est une série complexe de dépôts discontinus, composés d'éléments hétérogènes et hétérométriques, où il n'est représenté que par des sédiments continentaux, dont la date exacte est difficile à établir. On trouve les faciès suivants :

→ Travertin villafranchien, solidement consolidés, en bordure des Monts de Tlemcen et des calcaires lacustres.

→ Un complexe de sédiments plio-villafranchiens dont les limites sont constituées de massifs secondaires et dont l'épaisseur est très variable.

→ Marnes avec peu ou pas de galets.

→ Les alluvions anciennes, des marnes alluviales olivâtres aux galets, en passant par les limons et les graviers (Benest M.1985 in Bensaoula F., 1994).

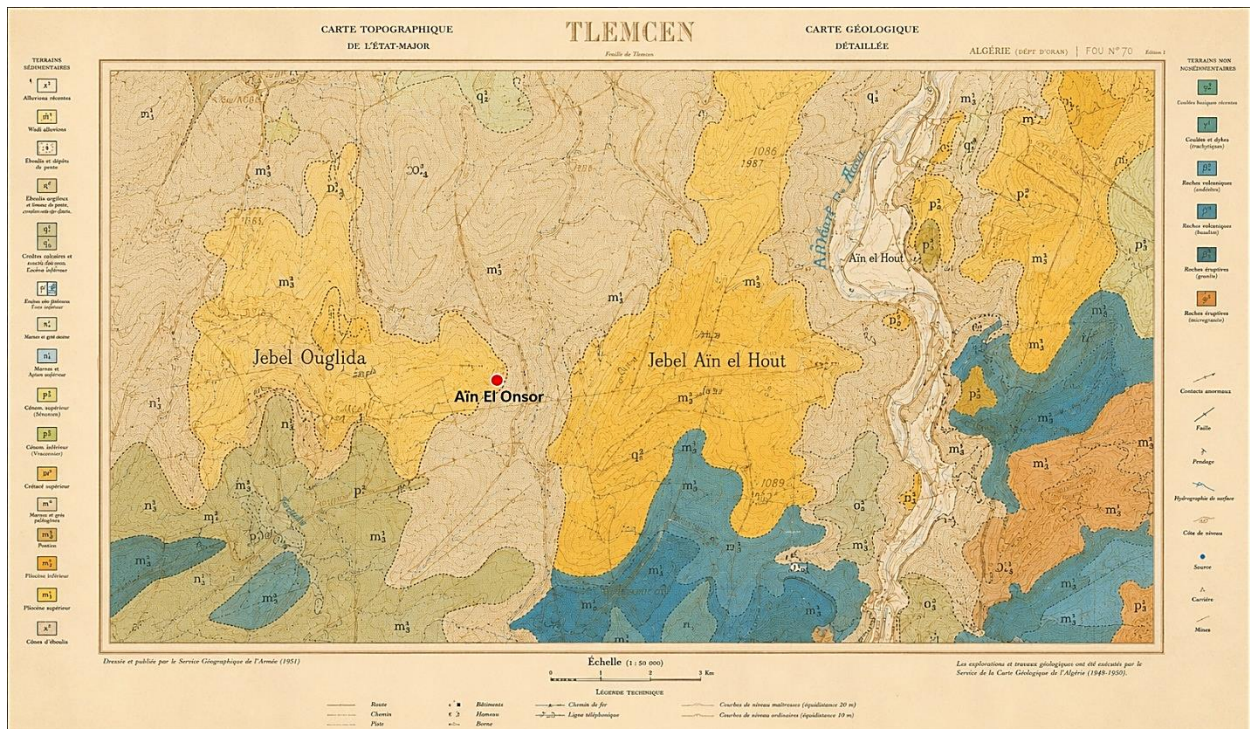


Fig.01 : Carte géologique de la zone d'étude indiquant l'emplacement de la source d'Aïn El Onsor (Tlemcen).

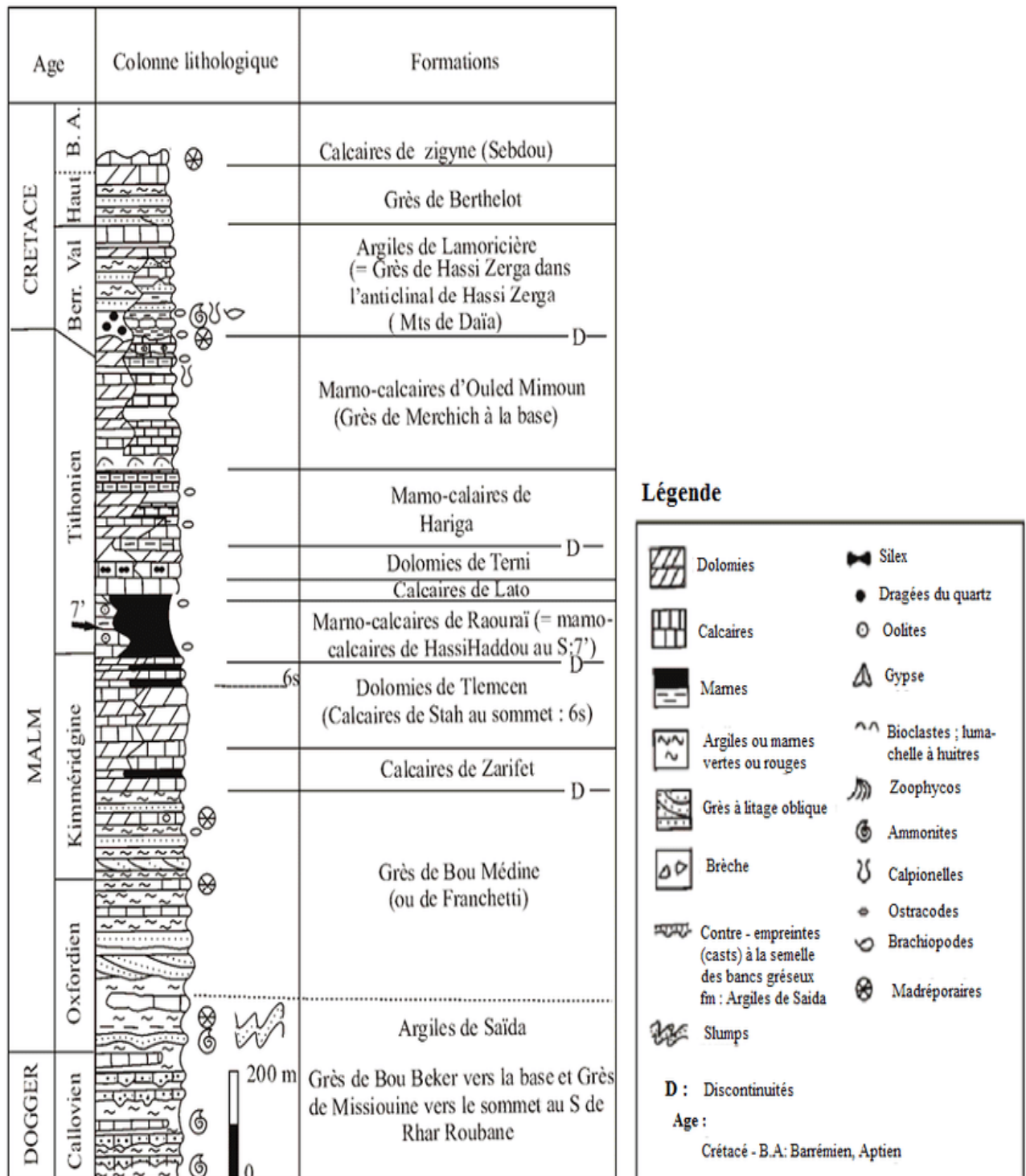


Fig.02 : Colonne litho-stratigraphique des Monts de Tlemcen
 (D'après BENEST et al, 1999 in BENZINA.M, 2012).

II.1.2 ANALYSE STRUCTURALE :

L'orientation générale des fractures majeures (dites telliennes) se manifeste selon un axe WSW-ENE. Cette configuration indique une tectonique essentiellement distensive et cassante, bien que des déformations souples, attestées par la présence de synclinaux et d'anticlinaux, y soient également observées.

Les failles identifiées sont sub-verticales et résultent de processus de déformation affectant le socle. Ces structures délimitent des horsts et des grabens, dont l'orientation varie de N50°E à N70°E (Auclair & Biehler, 1962, in Keddah.K et Médjahdi.N, 2018).

A. PRINCIPALES PHASES TECTONIQUES :

Il apparaît que la tectogenèse tertiaire et quaternaire a exercé une influence prépondérante sur l'évolution morpho-structurale de l'avant-pays tlemcenien (Benest, 1982, 1985). Cinq étapes tectoniques distinctes sont généralement identifiées dans ce contexte :

1) Une phase distensive Eo-crétacée :

Durant le Jurassique supérieur et l'Eo-Crétacé, la subsidence a été contrôlée par le jeu ou le rejeu des grands accidents SO-NE et subméridiens, hérités de l'orogénèse hercynienne (Benest, 1981). P Guardia (1975) a également signalé dans les Monts de Traras, l'existence de mouvements syn-sédimentaires qu'il a rapportée à une tectogenèse pré-atlasique (Bensaoula F, 2006).

2) Une phase atlasique :

Cette phase correspondrait sensiblement aux mouvements mis en évidence par Guardia dans les Monts des Traras et qui se seraient produits à partir du Sénonien. L'analyse dans les Monts de Tlemcen et de Daïa, permet d'imaginer :

- 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 Sebdou.
- Des mouvements distensifs 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, responsable de la mise en place des principales structures.
- Une importante phase de compression N-S à NO-SE avec un paroxysme Miocène :

Par comparaison avec la région des Traras, cette phase aurait débuté avec ou avant la mise en place des nappes et serait anté-messinienne, (G. Lucas 1942, P. Guardia 1975), selon Benest (1974), cette phase serait l'origine des grandes structures coulissantes et chevauchantes (Bensaoula F, 2006).

3) Une phase à dominante distensive :

Cette phase est en continuité avec la précédente, elle a contribué à la surrection de la plupart des reliefs actuels. Elle a également entraîné la régression pliocène, notamment dans la zone de Terni, antérieurement atteinte par la transgression du Miocène supérieur (Doumergue, 1912) ou du Mio-Pliocène. La répétition des failles préexistantes intensifie le découpage en Horst et en Grabens (Bensaoula F, 2006).

4) Une phase récente :

Cette phase se traduit par des mouvements syn-sédimentaires provoquant le jeu des décrochements dextres, associés à des déformations (G. Thomas 1985). Ces déformations n'ont pas l'ampleur des phases précédentes (Bensaoula F, 2006).

5) Déformations actuelles :

Elles se sont traduites par des mouvements soit compressifs, soit distensifs. Ces déformations n'ont pas l'ampleur de celles des phases précédentes (ELMI.S, 1970 in Ablaoui H., 2013).

Les Monts de Tlemcen sont constitués de plusieurs unités structurales (ELMI.S, 1970) :

➤ Zone synclinale de Terni :

Limitée par deux accidents de direction moyenne N 70° E, le plateau de Terni se présente comme un synclinal effondré, dont le flanc sud est plus redressé que le flanc nord. Cette dépression, formée dans la série jurassique, s'enfonce légèrement vers l'Est. Dans cette zone, la plupart des contacts entre les formations se font par des failles (Elmi.S, 1970, in Ablaoui H., 2013).

➤ Zone effondrée de Tlemcen :

Elle fait partie du même ensemble d'effondrements que la plaine de Maghnia, séparée par le Djebel Tefatisset. Elle est confinée au Sud et au Nord par des failles, passant par Bréa et Chetouane reliant les panneaux Djebels Tefatisset et Ain El Houtz (Elmi.S, 1970, in Ablaoui H., 2013).

➤ Zone supérieure des Djebels Tefatisset et Ain El Houtz :

Elle est limitée au Sud par une faille et au Nord par une série de failles en relais de même direction (Ablaoui H., 2013).

➤ **Zone d'Er-Ramlya :**

C'est un dôme affecté par une tectonique cassante et découpé en de nombreux panneaux soulignés par des accidents le plus souvent rectilignes (Ablaoui H., 2013)

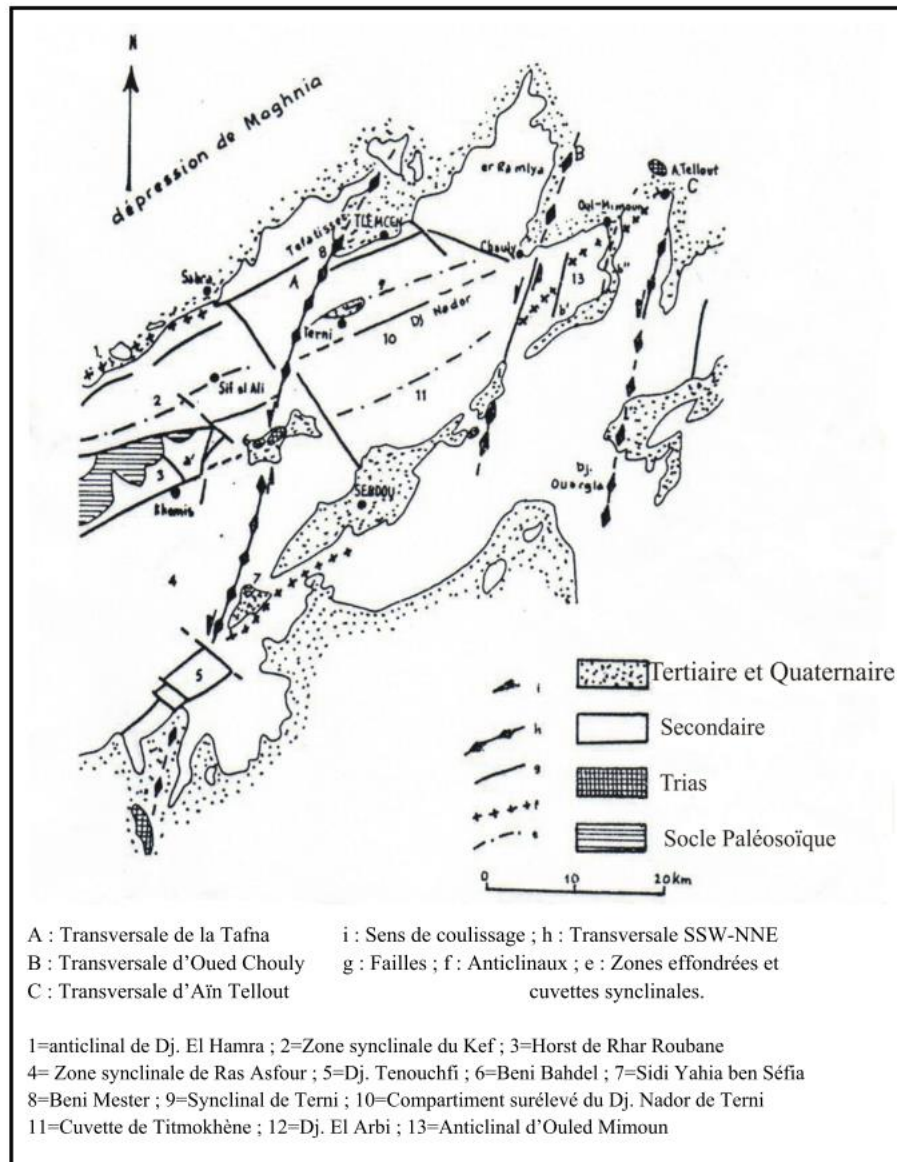


Fig.03 : Schéma structural simplifié des Monts de Tlemcen (ELMI.S, 1970).

B. Contexte géologique de la zone étudiée :

Le secteur d'étude se situe dans la partie nord- ouest algérienne (Fig. II.1.2) et occupe les piémonts nord des Monts de Tlemcen. Les formations carbonatées du Jurassique, constituant essentiellement les Monts de Tlemcen, s'ensuivent sous les dépôts du Mio-Plio-Quaternaire qui deviennent de plus en plus épais lorsqu'on se déplace vers le Nord.

II.2 HYDROGEOLOGIE :

La dynamique hydrique est intrinsèquement liée à la nature des formations géologiques.

II.2.1 Propriétés hydrogéologiques des formations:

Ce sont les formations perméables représentées par les séries calcaires et calcairo-dolomitiques du Jurassique :

A. Les formations du Jurassique supérieur:

Selon les études de Hayane (1981), Collignon (1986) et Bensaoula (1992 et 2006), les formations calcaires et dolomitiques sont en grande partie fissurées et karstiques, ce qui confère aux formations une très bonne perméabilité et constitue ainsi les principaux réservoirs d'eaux souterraines de la région. Au niveau des grès, la perméabilité dépend de la nature géologique des formations intercalées, de leurs épaisseurs et du degré de la fissuration.

B. Les formations du Crétacé:

→ Les niveaux calcaires sont parfois fissurés.

→ Les marnes constituent un ensemble imperméable.

C. Les formations du Mio-Plio-Quaternaire :

Ce sont des formations alluvionnaires et gréseuses, dont la perméabilité dépend du degré de cimentation ainsi que de leur teneur en éléments fins.

a. Les formations calcaires :

Présentent un potentiel aquifère substantiel lorsqu'elles sont caractérisées par un degré de fissuration et de karstification. La capacité de ces aquifères à produire de l'eau est par ailleurs influencée par la nature lithologique des formations qui leur sont inter-stratifiées (Keddah K et Médjahdi N, 2018).

b. Les dolomies de Tlemcen :

Constituent une composante géologique majeure du massif tlemcenien, reposant sur les calcaires de Zarifet. Ces lithologies présentent des diaclases significatives et un niveau de karstification prononcé.

c. Les dolomies de Terni :

Se distinguent par une nature plus micritique et la présence de nombreuses intercalations stromatolithiques, affichant une karstification moins développée comparativement aux dolomies de Tlemcen. Néanmoins, il a été établi que leurs propriétés hydrogéologiques sont globalement similaires à celles des dolomies de Tlemcen (Bensaoula F, 2006).

d. Les grès de Boumediène :

Présentent généralement une porosité réduite et une perméabilité d'interstice intrinsèquement faible. Cependant, deux conditions spécifiques peuvent modifier cette caractéristique :

-Premièrement, la présence de bancs calcaires au sein de la partie supérieure de la formation. Ces bancs agissent comme des drains, facilitant ainsi la constitution locale d'un aquifère d'intérêt significatif au sein même des grès.

-Deuxièmement, si ces grès sont affectés par une fissuration, une perméabilité accrue peut en résulter. Il convient de noter que les lits de marne, inter-stratifiés au sein des niveaux gréseux, sont généralement interprétés comme une barrière hydrogéologique efficace, délimitant de ce fait l'aquifère associé aux dolomies jurassiques.

e. Les marno-calcaires de Raouraï, d'Hariga et de Lamoricière :

Ces formations marno-calcaires, identifiées à Raouraï, Hariga et Lamoricière, présentent une perméabilité intrinsèque relativement faible. Cette caractéristique se manifeste par une imperméabilité quasi-générale dans la direction verticale, bien que les bancs calcaires inter-stratifiés puissent conférer une certaine perméabilité selon le plan horizontal.

f. Les grès de Merchiche :

Ils s'étendent sur des surfaces considérables en bordure du fossé de Sebdou et de la Tafna. Leur perméabilité, de nature mixte, ne permet cependant pas la constitution d'un aquifère majeur, en raison de leur extension spatiale limitée et de leur épaisseur réduite.

g. Les conglomérats du Miocène inférieur :

Les conglomérats du Miocène inférieur ne se caractérisent pas par la présence de réserves significatives. Cette absence est principalement imputable à la surface restreinte de leurs affleurements et ce malgré une fissuration prononcée.

h. Les grès tortoniens :

Les grès tortoniens affleurent dans la région du Grand Tlemcen, où leur épaisseur s'avère considérable à l'approche des zones de relief. La perméabilité de cette formation est variable localement ; elle est influencée par la nature des formations intercalées, par le degré de fissuration et par l'épaisseur intrinsèque du banc gréseux.

II.2.2 Conditions d'émergence de la source d'El Onsor :

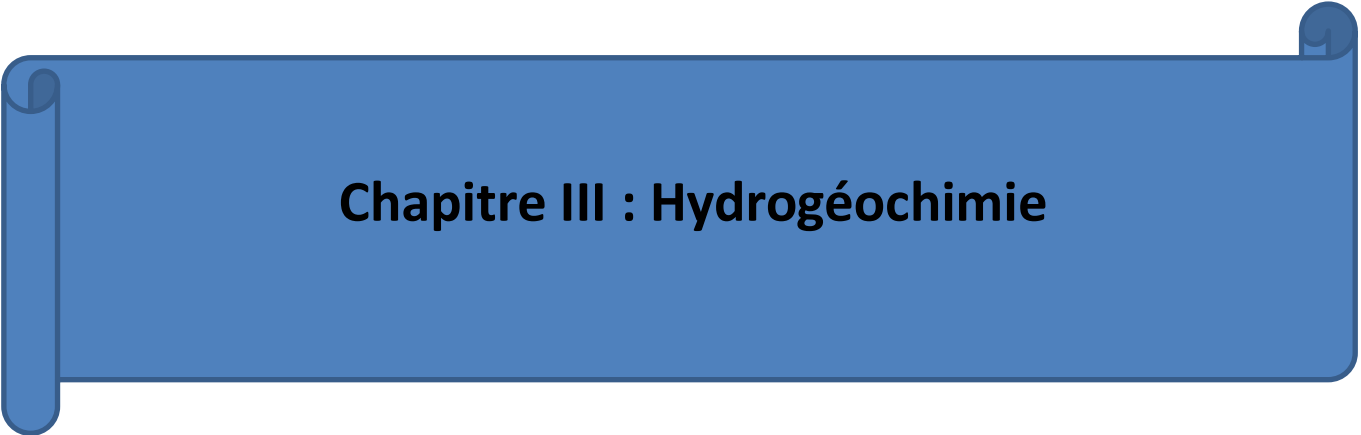
La source est captée depuis longtemps à 5 km environ à l'Ouest d'Ain El Houtz et à 800 m au Nord de l'agglomération d'Oudjlida. Elle naît au niveau de l'intersection de deux failles de direction NNW - SSE et ENE - WSN au contact des conglomérats de base du Miocène inférieur avec les marnes de même âge (Hayane.S.M, 1983).

II.3 CONCLUSION :

La litho-stratigraphie des Monts de Tlemcen révèle une succession variée de formations. L'analyse stratigraphique a permis d'en établir la diversité, ces unités étant principalement datées du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur.

Par ailleurs, l'examen structural de la région met en évidence l'existence de deux systèmes de décrochements, issus de cinq phases tectoniques. Leur dynamique est régie par l'activité et le rejet de structures d'intensives orientées du SW-NE au WSW-ENE, parfois associées à des composantes compressives, tel que décrit par Benest (1982). L'influence tectonique est prépondérante dans l'organisation géologique du secteur étudié. La densité des failles et des diaclases a contribué de manière significative au développement de la karstification et à l'émergence de la source.

Les formations calcaires et calcaire-dolomitiques du Jurassique supérieur et du Crétacé constituent les aquifères majeurs présentant un intérêt hydrogéologique dans la zone d'étude. Les formations du Plio-Quaternaire y sont également associées comme entités aquifères.



Chapitre III : Hydrogéochimie

III.1 Introduction :

L'hydrochimie est fondamentale pour la compréhension du comportement des eaux naturelles, car elle détermine leur composition et les mécanismes régissant leur évolution temporelle. La signature chimique de ces eaux est le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs, incluant les processus d'infiltration, les interactions avec les formations géologiques et les apports d'origine anthropiques. La qualité des ressources hydriques représente actuellement une problématique d'envergure planétaire, exacerbée par la pression anthropique croissante.

Dans ce contexte, l'analyse hydrogéochimique se révèle indispensable pour caractériser la qualité et l'origine des d'eau de la source d'El Onsor. Les données physico-chimiques ont porté sur 85 échantillons, datées de 2017 à 2024.

III.2 Balance ionique :

La balance ionique est un moyen de vérification essentiel en hydrochimie, permettant d'apprécier les analyses chimiques de l'eau et d'attester la justesse des résultats obtenus, en utilisant la formule suivante :

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

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.

Le tableau n°1 en annexes présente les résultats de la balance ionique. Elle varie entre bonne et acceptable.

III.3 Etude des paramètres physico-chimiques :

➤ Les paramètres physiques :

- * Le potentiel d'hydrogène.
- * La conductivité.

➤ 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^-

III.3.1. Les paramètres physiques :

Potentiel d'Hydrogène pH :

Le potentiel hydrogène (pH) constitue un paramètre fondamental permettant de caractériser le degré d'acidité ou de basicité d'une solution aqueuse, par la mesure de l'activité des ions hydrogène (H^+).

Il représente un indicateur déterminant de la qualité de l'eau, dont la valeur exerce une influence significative sur divers processus chimiques et biologiques, tout en conditionnant son aptitude à la consommation ou aux traitements appropriés. La détermination de cette valeur s'effectue couramment au moyen de pH-mètres électroniques ou, dans certains contextes, par l'utilisation de papiers indicateurs.

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

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

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

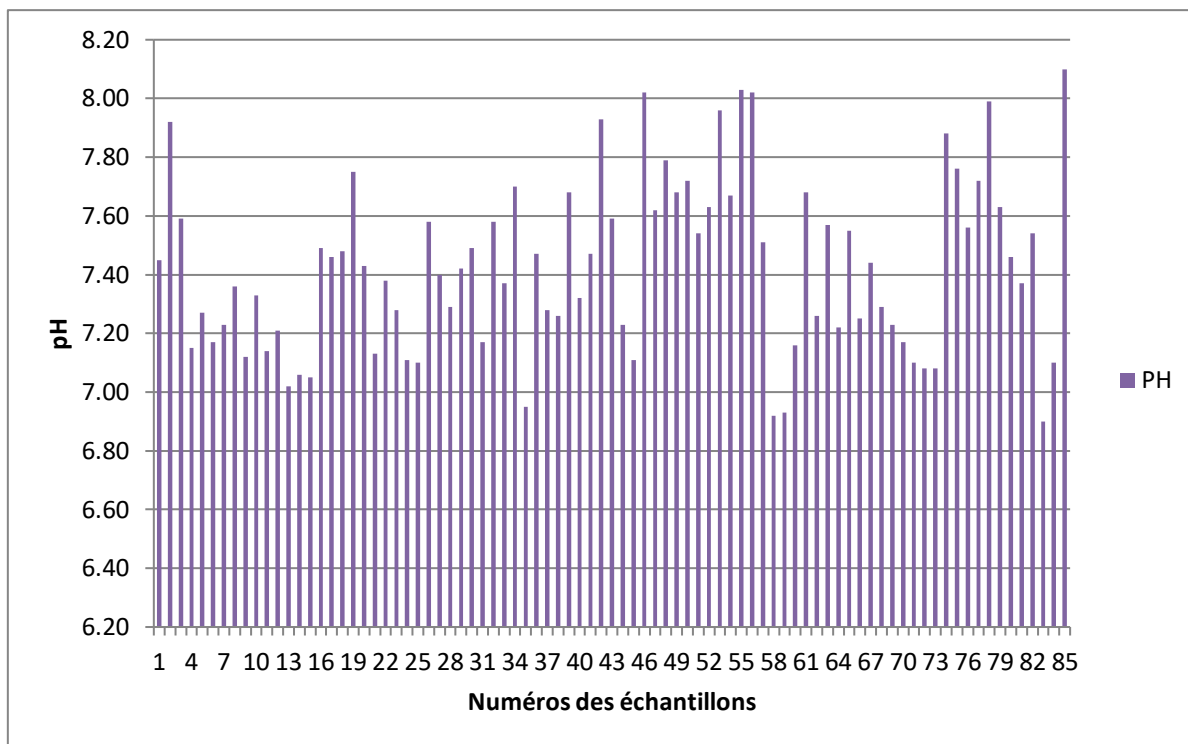


Fig.01 : Variation temporelle du pH.

D'après la figure 1, les valeurs du pH de la source étudiée (El Onsor) présentent des fluctuations temporelles s'étalant sur 85 points de mesure. Les valeurs varient entre 6,90 (échantillon N°83. Daté du 18/03/2024) et 8,10 (échantillon N°85 daté du 02/06/2024). ces eaux sont conformes à la norme algérienne (≥ 6.5 et ≤ 9).

La majorité des relevés du pH se situent au-dessus de 7, ce qui indique que les eaux de cette source sont globalement alcalines (basiques).

❖ Conductivité électrique :

La conductivité électrique mesure la capacité d'une eau à conduire le courant, fonction directe de sa concentration en ions dissous. Elle sert d'indicateur de minéralisation totale et s'exprime généralement en micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou en siemens par mètre (S/m).

Tab.01 : Relation entre la conductivité et la minéralisation (Rodier.J.2009)

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation (mg/L)
Conductivité <100	Très faible
100<Conductivité<200	Faible
200< Conductivité<333	Moyenne
333< Conductivité<666	Moyenne à accentuée
666< Conductivité<1000	Importante
Conductivité>1000	Elevée

Le tableau n°2 en annexes résume les valeurs de la conductivité et la classification des minéralisations dans notre secteur d'étude. Elles sont élevées à importante

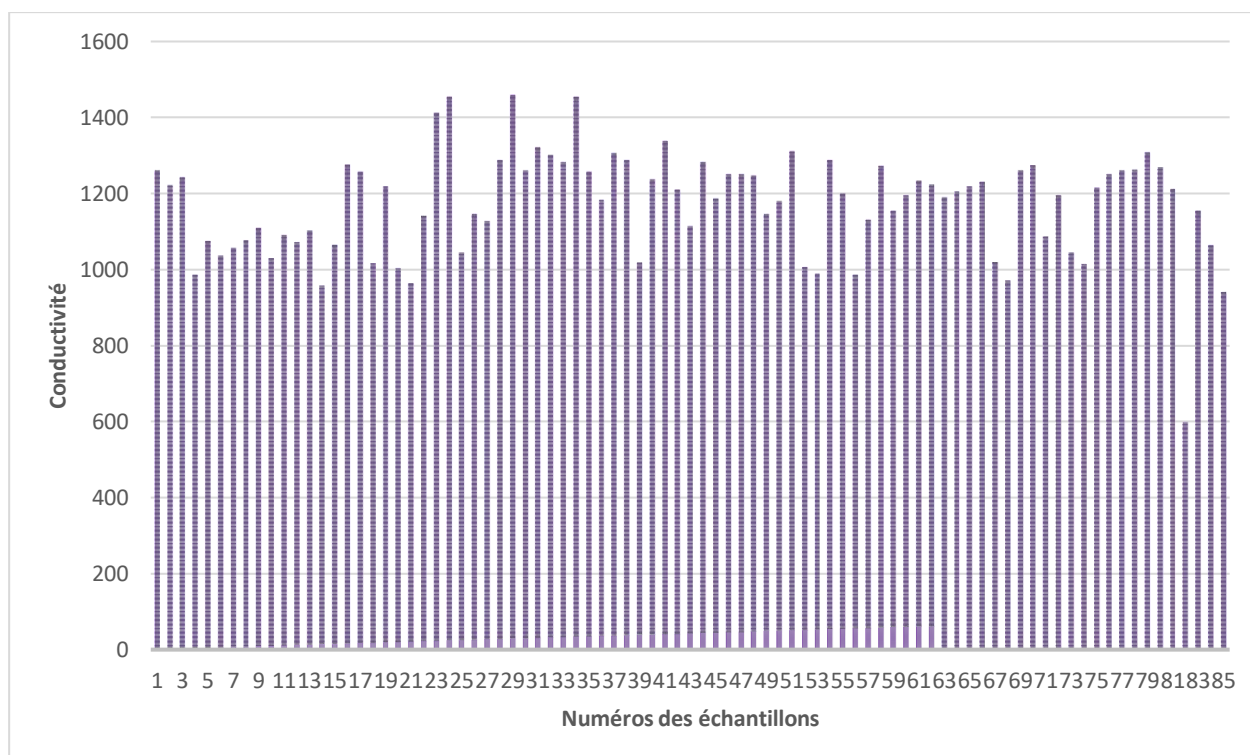


Fig.02 : Variation temporelle des conductivités électriques.

Les valeurs des conductivités des eaux étudiées, oscillent entre 598 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au N°82 (daté du 02/12/2023) et 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$ N°24/29 en dates (02/05/2018) (04/11/2018). Ces valeurs sont inférieures à la norme (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

❖ 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).

Tab.02 : Détermination de la minéralisation à partir de la conductivité (Rodier .J.2009)

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation (mg/L)
Conductivité <50	$1.365079 \times \text{conductivités}$
$50 < \text{Conductivité} < 166$	$0.947658 \times \text{conductivités}$
$166 < \text{Conductivité} < 333$	$0.769574 \times \text{conductivités}$
$333 < \text{Conductivité} < 833$	$0.715920 \times \text{conductivités}$
$833 < \text{Conductivité} < 1000$	$0.758544 \times \text{conductivités}$
Conductivité >1000	$0.850432 \times \text{conductivités}$

Le tableau n°3 en annexe présente la détermination de la minéralisation des eaux.

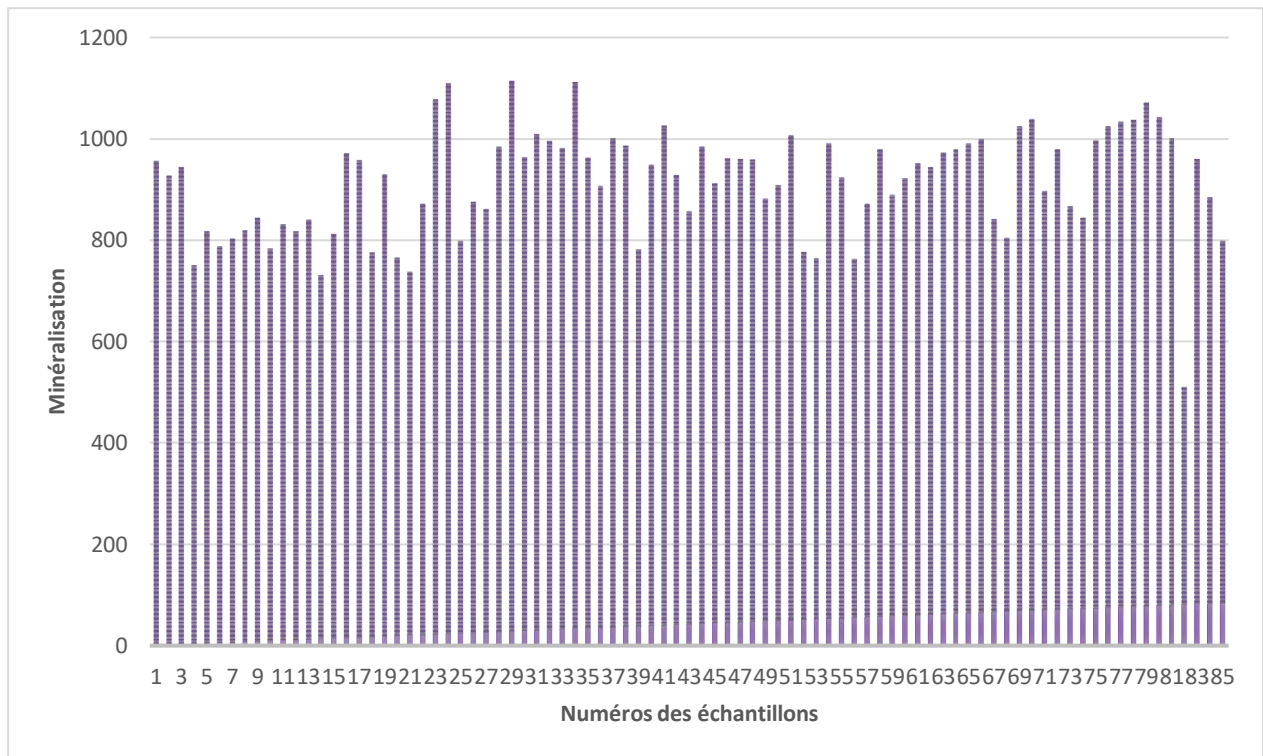


Fig.03 : Variations des minéralisations.

La figure 3 montre la variation des teneurs des minéralisations, nous remarquons que la valeur maximale est observée au N° 24 et 29 datés du (02/05/2018) et (04/11/2018), elle est de 1084,71mg/l et la valeur minimale est enregistrée au N°82 daté du (02/12/2023), elle est de 428,12mg/l.

III.3.2 Les paramètres chimiques :

❖ Les cations :

- **L'ion calcium (Ca^{2+})** : provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées, notamment la calcite (CaCO_3) et la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Il constitue un élément majeur de la dureté de l'eau, avec le magnésium, et influence directement la qualité hydrochimique des eaux.

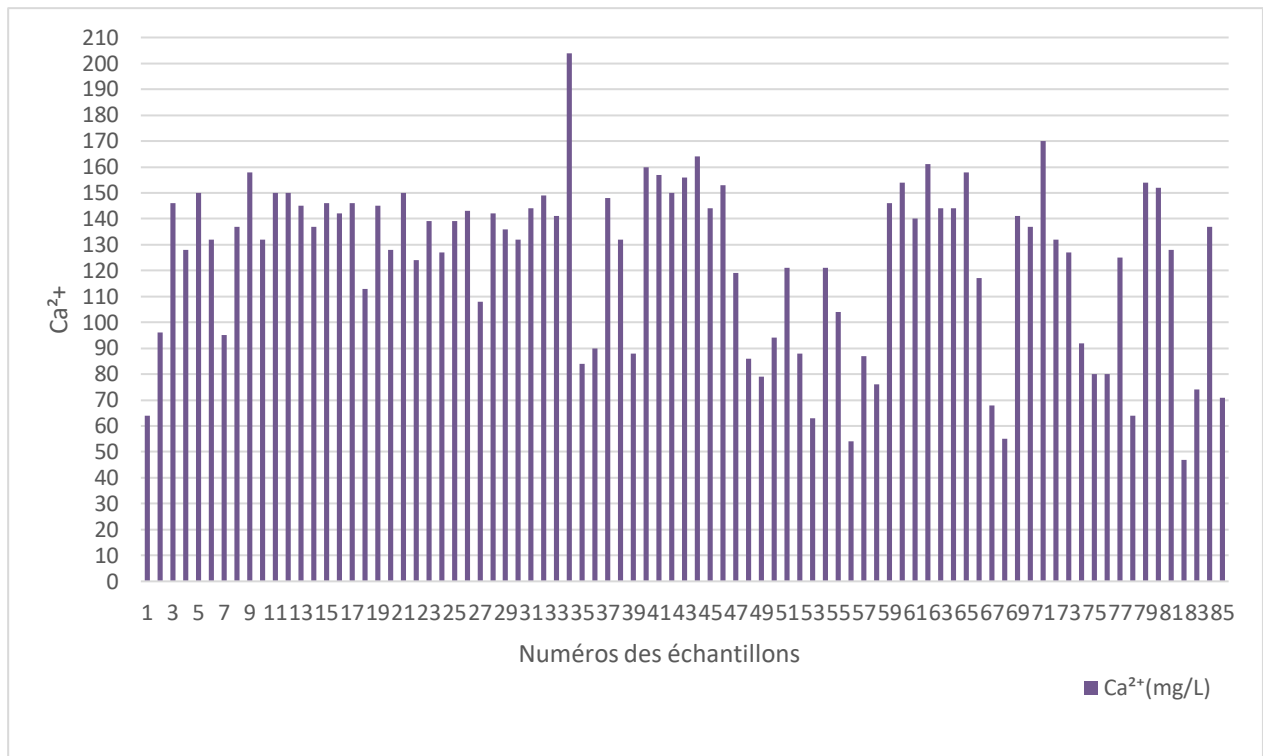


Fig.04 : Variation temporelle du calcium.

Les valeurs de Ca^{2+} varient entre 47mg/L (échantillon N°82 daté du 02/12/2023) et 204mg/L (échantillon N°34 en date du 01/04/2019). En les comparant à la norme algérienne de potabilité fixée à 200 mg/L, on constate que tous les échantillons restent conformes. Toutefois, la teneur qui dépasse la limite admissible (204mg/L) indique une non-conformité à cette limite.

- **L'ion Magnésium (Mg^{+2}) :** est un ion présent dans les roches riches en magnésium comme la dolomie. Le magnésium est un élément de dureté.

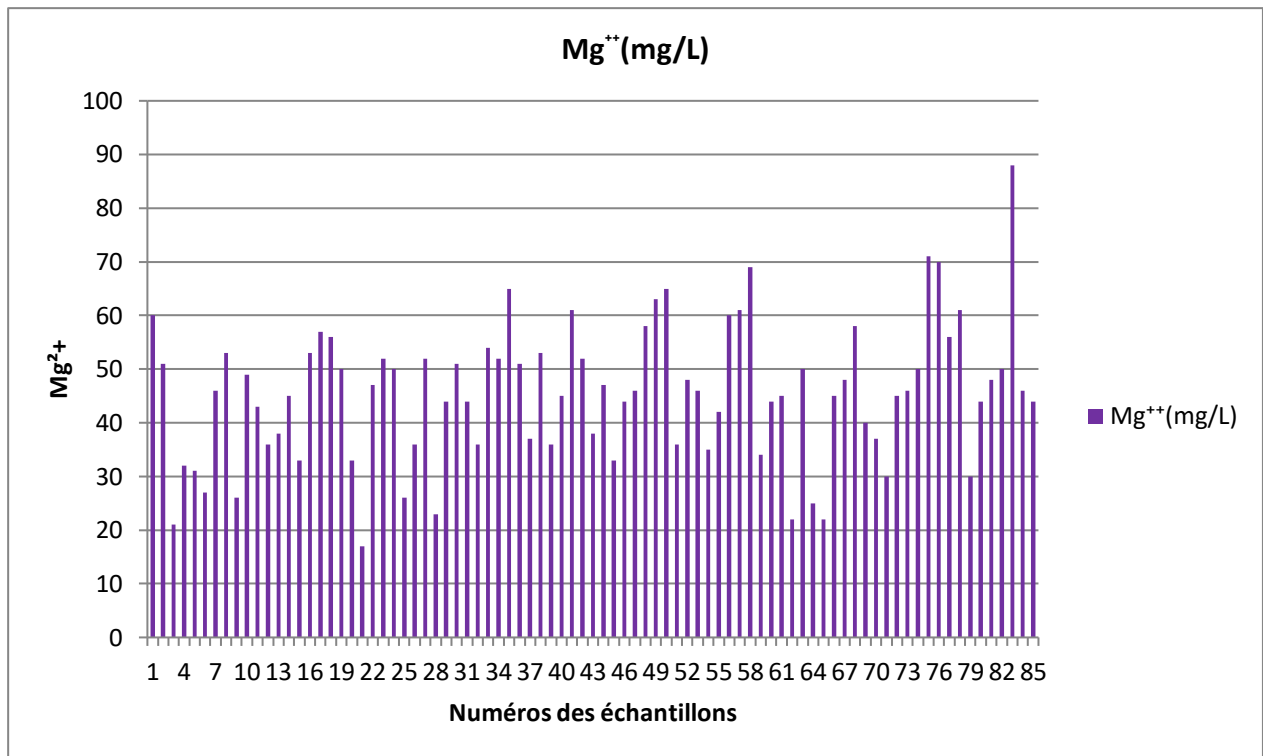


Fig.05 : Variation temporelle du Magnésium.

Les teneurs en Mg^{2+} varient entre 17mg/L (échantillon N°21 du 03/03/2018) et 88mg/L (échantillon N°83 du 18/03/2024). En les comparant à la norme algérienne fixée à 150 mg/L, on constate que toutes les valeurs mesurées sont inférieures à la limite admissible et donc conformes aux normes en vigueur.

- L'ion sodium Na^+** : est un élément chimique largement présent dans le milieu naturel. Il provient principalement de l'altération des minéraux silicatés et de la dissolution des évaporites, mais aussi des activités anthropiques telles que l'utilisation d'engrais et le rejet des eaux usées domestiques contenant des détergents. En raison de ces différentes sources, le sodium est considéré comme le métal alcalin le plus abondant dans la nature et constitue un élément important dans la composition chimique des eaux.

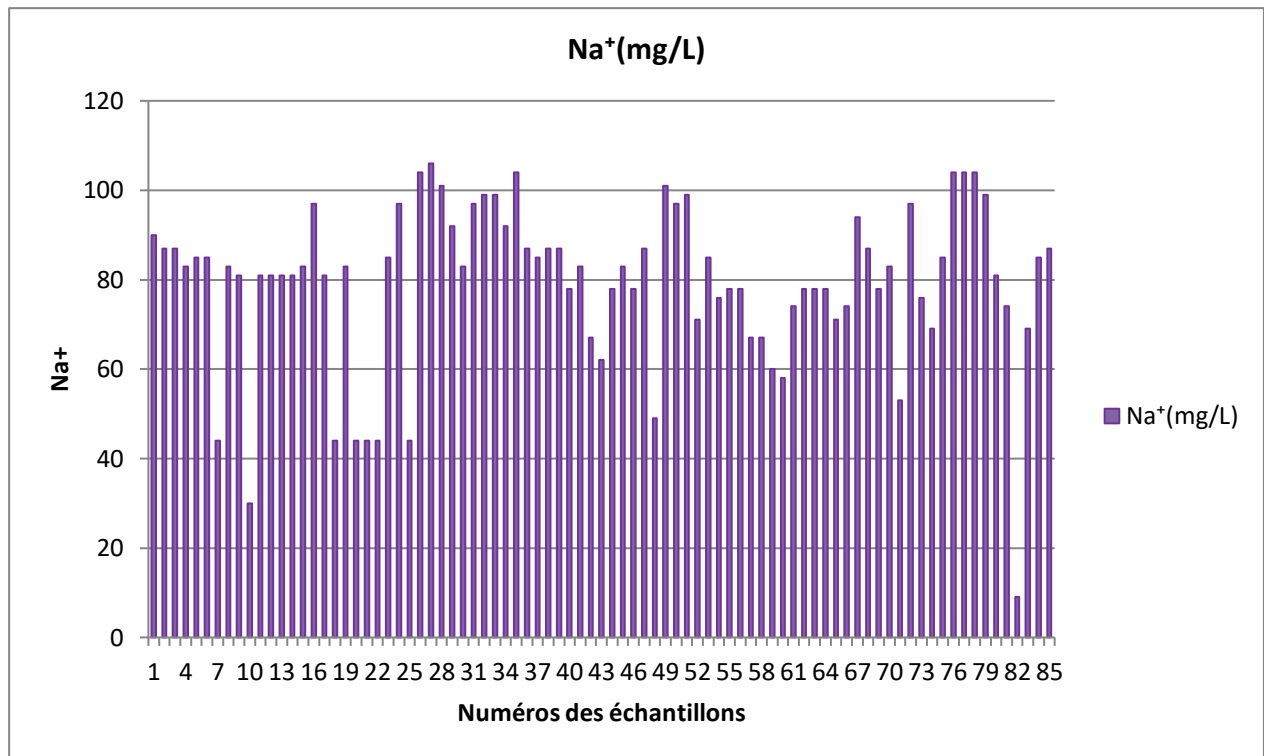


Fig.06 : Variation temporelle du sodium.

Les concentrations des eaux étudiées varient entre 9mg/L(échantillon N°82du 02/12/2023) et 106mg/L(échantillon N°27 du 01/09/2018) . Selon la norme algérienne fixée à 200 mg/L, on constate que toutes les valeurs mesurées sont inférieures à la limite admissible et donc elles sont conformes à la norme en vigueur.

- L'ion Potassium K⁺** : est un cation généralement présent à de faibles concentrations dans les eaux souterraines. Son origine est à la fois naturelle et anthropique. D'une part, il provient de la dissolution des minéraux argileux qui en contiennent, où il est libéré lors des phénomènes de l'altération ou des échanges ioniques. D'autre part, il est lié aux activités humaines, notamment à l'utilisation des engrais agricoles, dont l'excès peut être lessivé et infiltré vers les nappes souterraines, ainsi qu'aux rejets domestiques, riches en détergents. La nature géologique du milieu, combinée aux pratiques humaines, constitue un facteur déterminant de la présence du potassium dans l'eau.

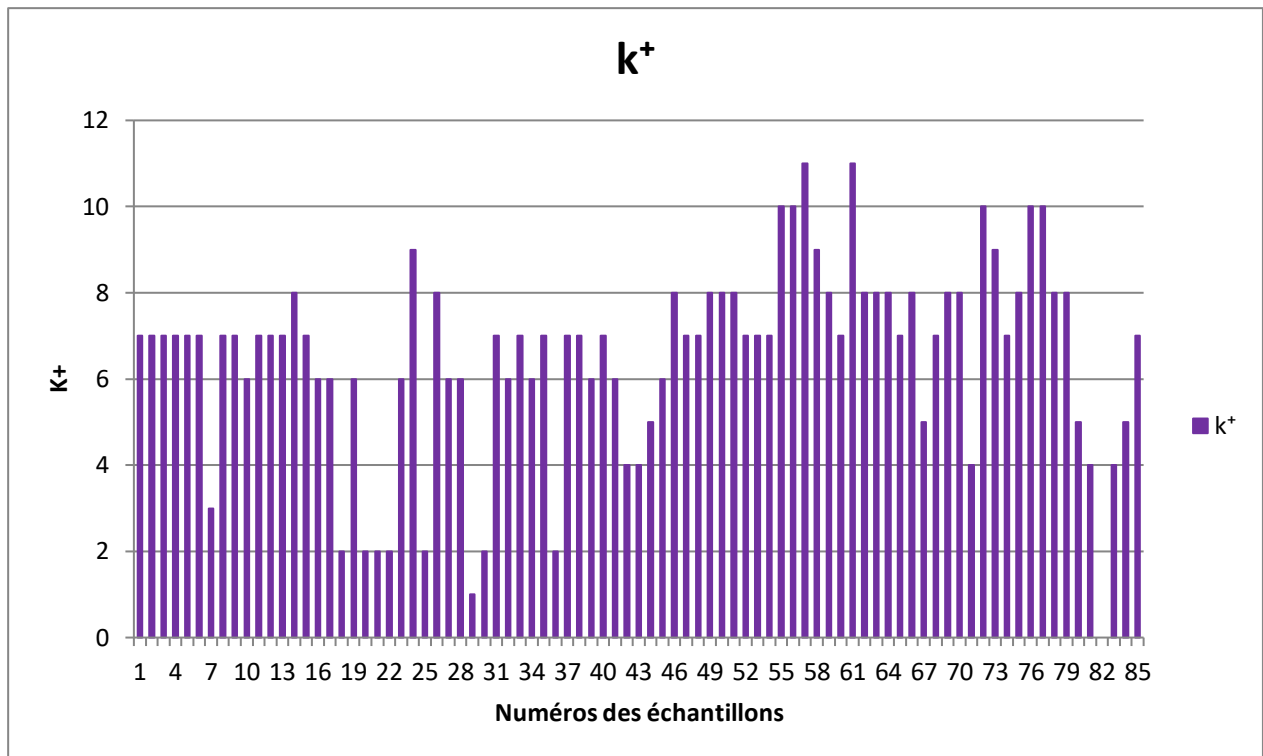


Fig.07 : Variation temporelle du Potassium.

Selon les normes algériennes fixées à 12 mg/L, les concentrations en ions potassium (K^+) enregistrées varient entre 0 et 11 mg/L, ce qui indique qu'elles restent globalement inférieures à la limite admissible.

❖ Les anions :

- **L'ion chlorure (Cl^-)** : Le chlorure (Cl^-) est un anion soluble, chimiquement stable et peu réactif, considéré comme un indicateur fiable de la salinité et un traceur conservatif dans les eaux. Sa présence dans les eaux souterraines provient principalement de la dissolution des dépôts salins, mais aussi des activités humaines telles que les rejets d'eaux usées et les pratiques agricoles. Par ailleurs, sa teneur dépend largement de la nature géologique des terrains traversés, qui influence directement sa concentration (Rodier J., 2009).

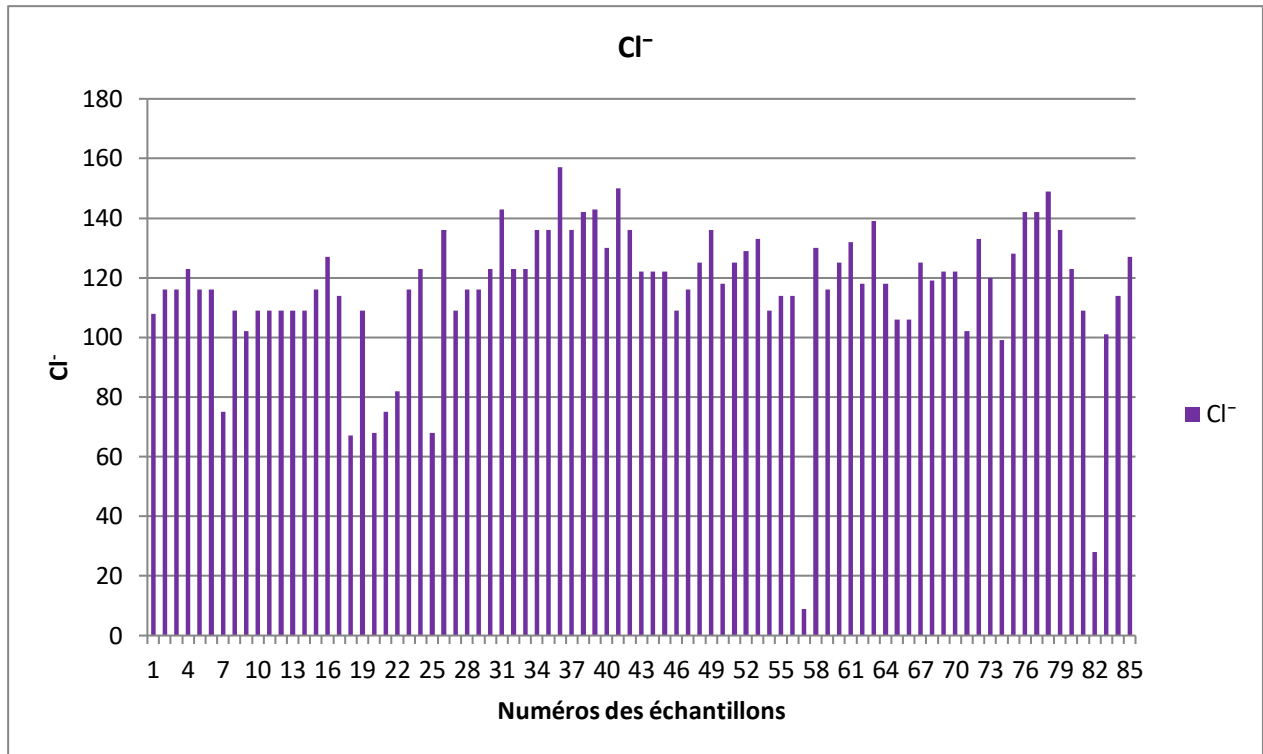


Fig.08 : Variation temporelle des chlorures.

Les normes algériennes indiquent une concentration maximale admissible de 500mg/L. Pour les eaux analysées, les concentrations varient entre 9 mg/L (échantillon N°57 du 12/09/2021) et 157mg/L (échantillon N° 36 du 16/06/2019), Toutes les teneurs sont au- dessous de la norme préconisée.

- L'ion sulfate (SO_4^{2-})** : Les sulfates présents dans les eaux proviennent à la fois de processus naturels et d'activités humaines. Ils sont principalement issus de la dissolution de minéraux sulfurés et sulfatés, notamment le gypse, et leur teneur est influencée par les éléments alcalins et alcalino-terreux de la minéralisation des eaux. Par ailleurs, des sources anthropiques contribuent également à leur présence, telles que les rejets domestiques et l'utilisation d'engrais. Ainsi, la concentration en ions sulfate varie selon la nature géologique des terrains traversés et l'impact des activités humaines (Rodier J., 2009).

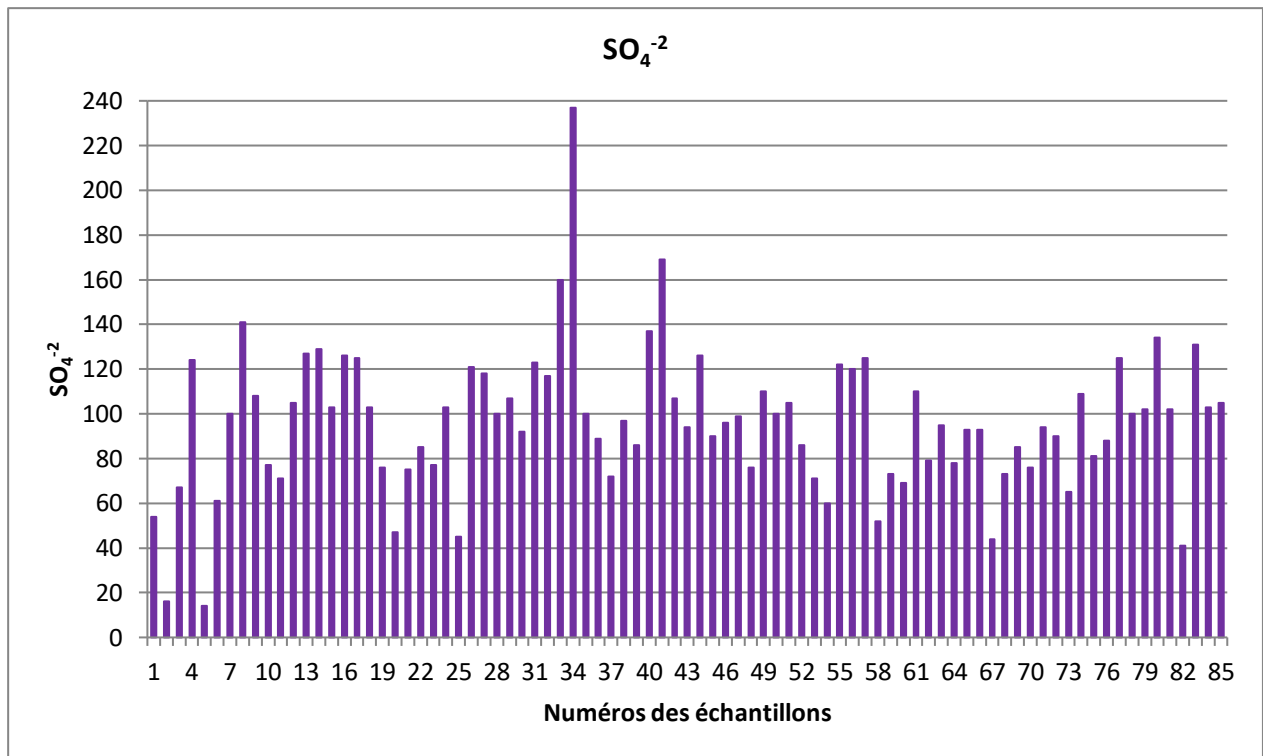


Fig.09 : Variation temporelle des Sulfates.

Les normes algériennes indiquent une concentration maximale admissible de 400 mg/L. Les teneurs en sulfate des points d'eau varient entre 14 mg/L (échantillon N°5 daté du 17/10/2017) à 237 mg/L (échantillon N°34 du 01/04/2019). Toutes les teneurs sont inférieures à la norme recommandée.

- L'ion nitrates (NO_3^-) :** Les nitrates observés dans les eaux souterraines sont principalement imputables aux pratiques agricoles, via l'apport d'engrais azotés. Une contribution additionnelle significative provient des rejets des eaux usées non traitées. Les nitrates servent par ailleurs de traceurs de la contamination d'origine anthropique, signalant l'incidence d'activités humaines, telles que l'application excédentaire d'engrais et les décharges domestiques.

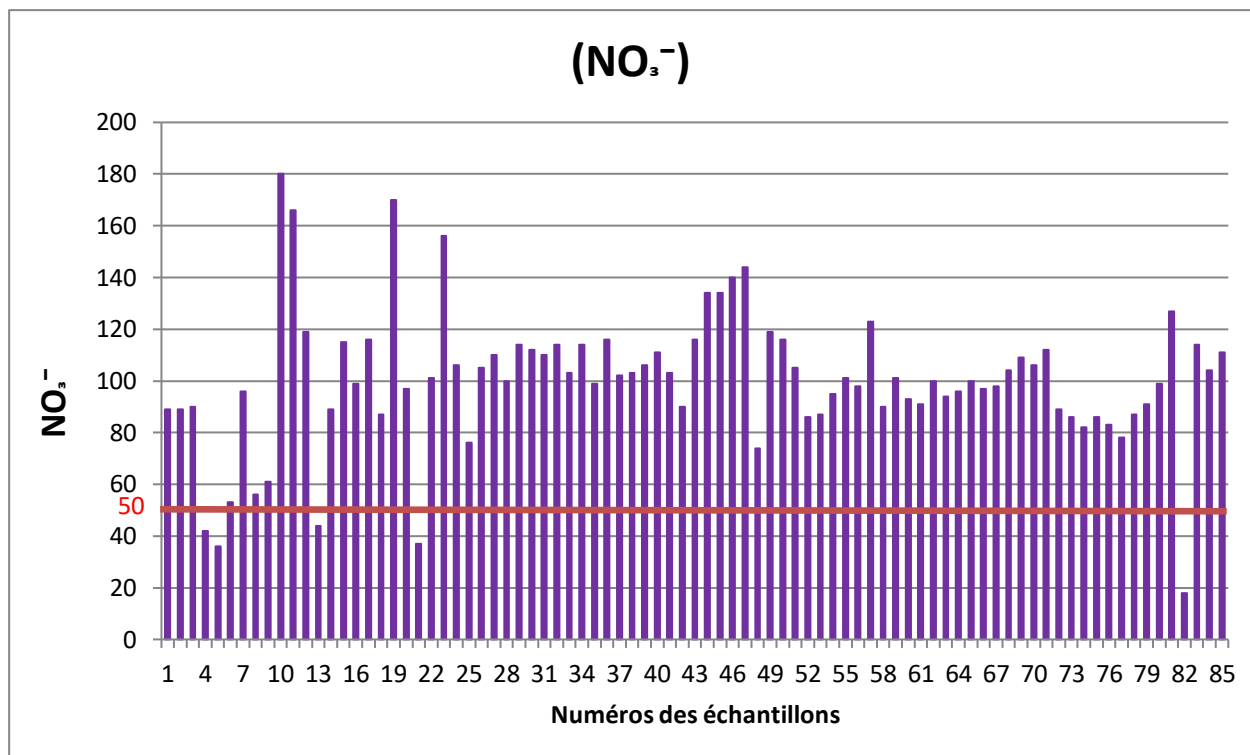


Fig.10 : Variation temporelle des nitrates.

En conformité avec la norme algérienne en vigueur, la concentration maximale admissible de nitrates dans les eaux destinées à la consommation humaine est établie à 50 mg/L. Les relevés de concentrations en nitrates effectués ont montré une variabilité significative, s'étendant de 18 à 180 mg/L. Il a été observé que la plupart de ces valeurs excèdent le seuil normatif, ce qui suggère une contamination substantielle dans une part significative des échantillons. Néanmoins, quelques prélèvements ont révélé des concentrations inférieures à la limite recommandée. Ces cas spécifiques incluent des mesures de 42 mg/L (échantillon N° 04 en date du 08/10/2017), 36 mg/L (échantillon N°05 du 17/10/2017), 44 mg/L (échantillon N°13 du 02/12/2017), 37 mg/L (échantillon N°21 du 03/03/2018) et 18 mg/L (échantillon N°81 du 02/12/2023).

- **L'ion Bicarbonate (HCO_3^-) :** La composition ionique du bicarbonate dépend étroitement de la nature lithologique des formations géologiques rencontrées. Elle est spécifiquement déterminée par les interactions avec les roches carbonatées, telles que le calcaire et la dolomie, un phénomène particulièrement prédominant dans les environnements karstiques, à l'image de la région de Tlemcen. En effet, lorsque les eaux souterraines, chargées en acide carbonique, entrent en contact avec ces matériaux rocheux, notamment le calcaire, principalement constitué de carbonate de calcium

(CaCO_3), et la dolomie, un carbonate double de calcium et de magnésium ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), des processus de dissolution se produisent, influençant directement la concentration en ions bicarbonate.

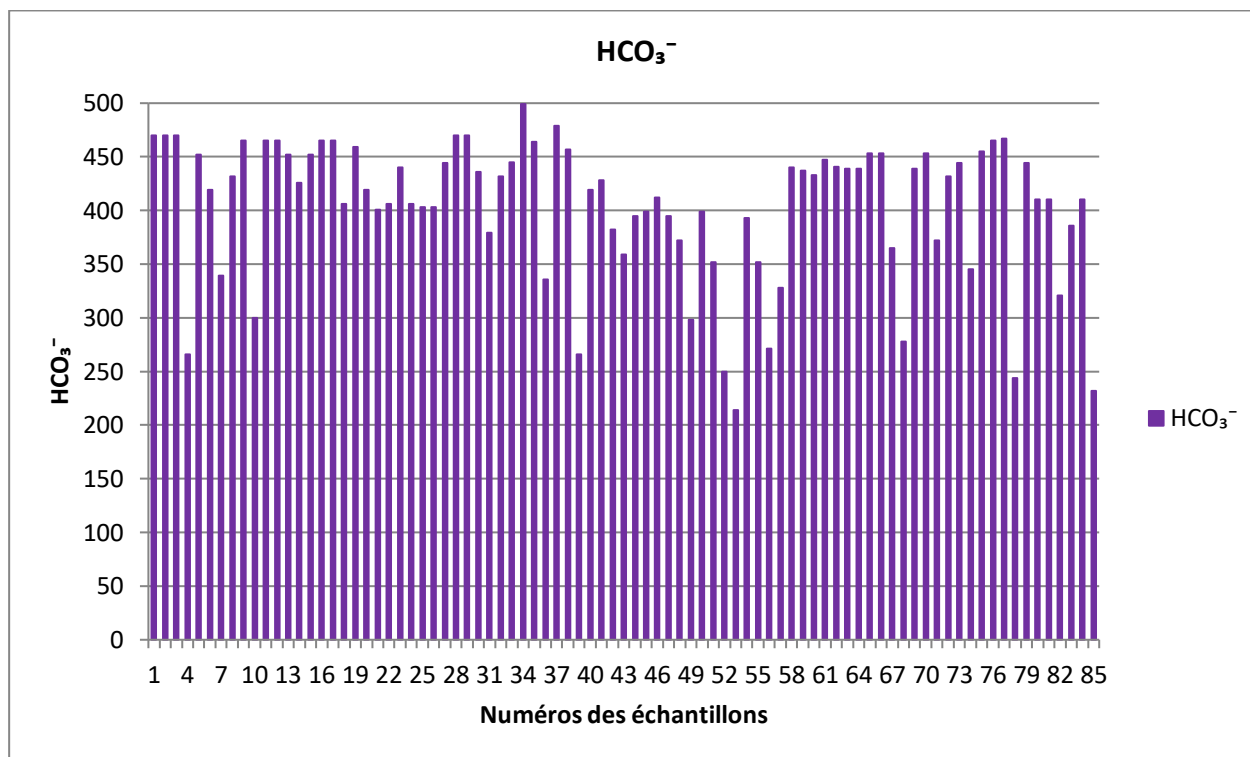


Fig.11 : Variation temporelle des Bicarbonates.

Les normes algériennes ne fixent aucune valeur pour ce paramètre, puisque quel que soit le teneur en bicarbonates dans les eaux de consommation, la potabilité n'est pas affectée. Les valeurs de bicarbonates des eaux analysées varient de 214mg/L (échantillon N°53 daté du 04/04/2021) à 499mg/L (échantillon N° 34 du 06/02/2018).

III.4 Potabilité de l'eau étudiée (Classification selon les normes Algériennes) :

III.4.1 Classification des eaux selon les paramètres physico-chimiques:

Le tableau N°03 représente la classification des eaux de la source d'El Onsor selon les normes algériennes, les paramètres analysés, à savoir le pH, la conductivité électrique, le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{2-}), montrent que toutes les valeurs sont conformes aux normes algériennes. Concernant le calcium (Ca^{2+}), toutes les valeurs respectent les normes à l'exception de l'échantillon N°34. Pour les nitrates (NO_3^-), excepté les échantillons N°4, N°5, N°13, N°21, N°81, tout le reste est au-dessus de la norme (50mg/L).

Tab.03 : Classification des eaux de la source d'El Onsor , selon les normes algériennes.

Paramètres	Unité	Niveau Guide	Concentration Maximale admissible	Résultats des analyses physico-chimiques	
				Conformes aux normes	Non conformes aux normes
Ph	--	6.5	9	tous les échantillons	/
Conductivité	µS/cm	-	2800	Tous les échantillons	/
Ca⁺²	mg/L	-	200	Tous les échantillons	N°34
Mg⁺²	mg/L	-	150	Tous les échantillons	/
Na⁺	mg/L	-	200	Tous les échantillons	/
K⁺	mg/L	-	12	Tous les échantillons	/
Cl⁻	mg/L	-	500	Tous les échantillons	/
SO₄⁻²	mg/L	-	400	Tous les échantillons	/
NO₃⁻	mg/L	-	50	N°4-5-13-21-81	Le reste des échantillons

III.5 Classifications des eaux :

Afin de caractériser les faciès chimiques et d'établir une typologie des eaux de cette région, l'analyse a été menée à l'aide des représentations graphiques suivantes :

- Le diagramme de H. SCHOELLER et E. BERKALOFF.
- Le diagramme logarithmique de STABLER.
- Le diagramme triangulaire de PIPER.

III.5.1 Le diagramme de H. SCHOELLER et E. BERKALOFF :

Le diagramme de Schoeller - Berkaloﬀ permet de reconnaître simplement le faciès d'une eau souterraine, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques. Les valeurs utilisées sont exprimées en mg/L au milieu du diagramme et latéralement en meq/L.

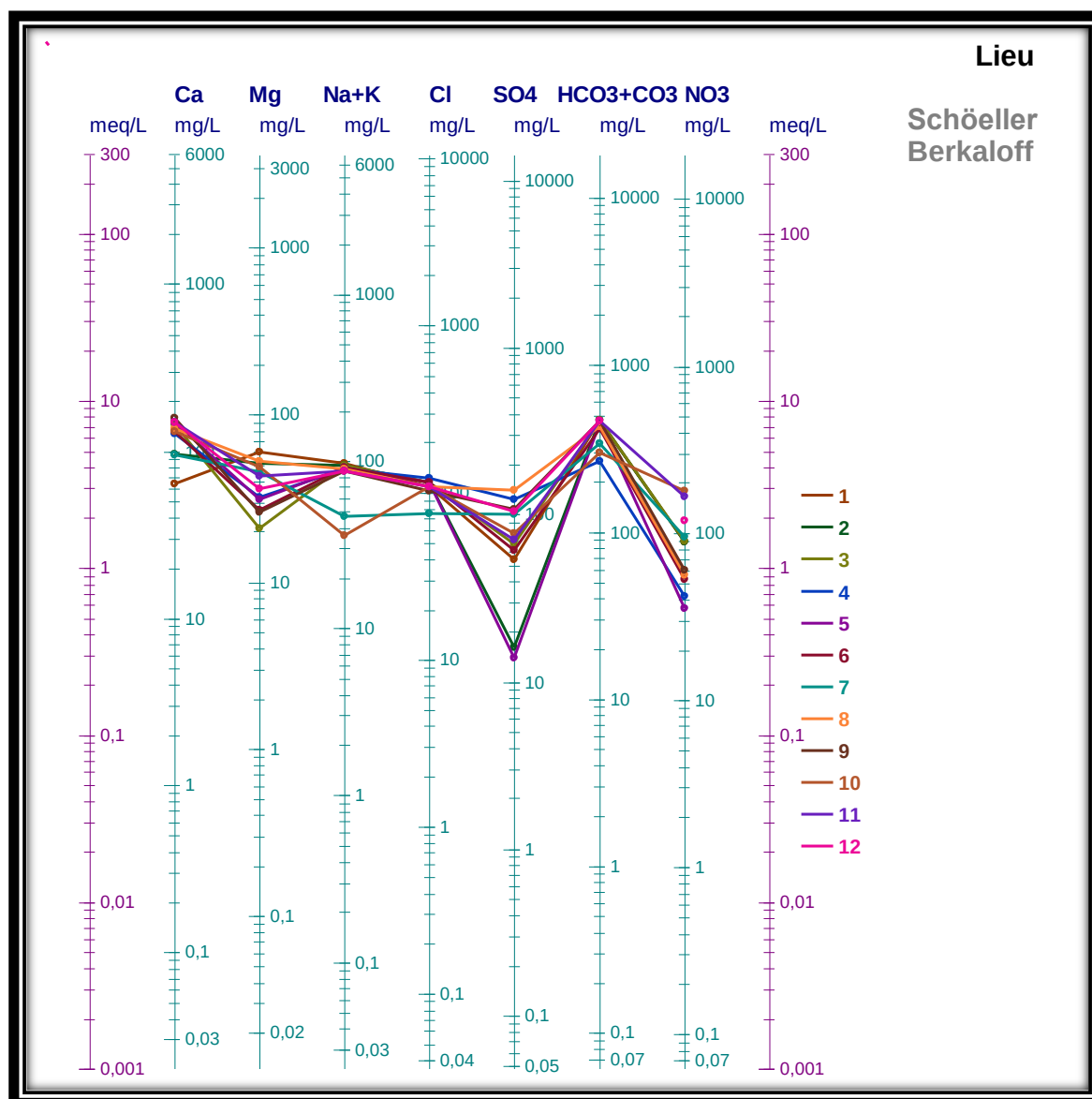


Fig.12. A : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff.

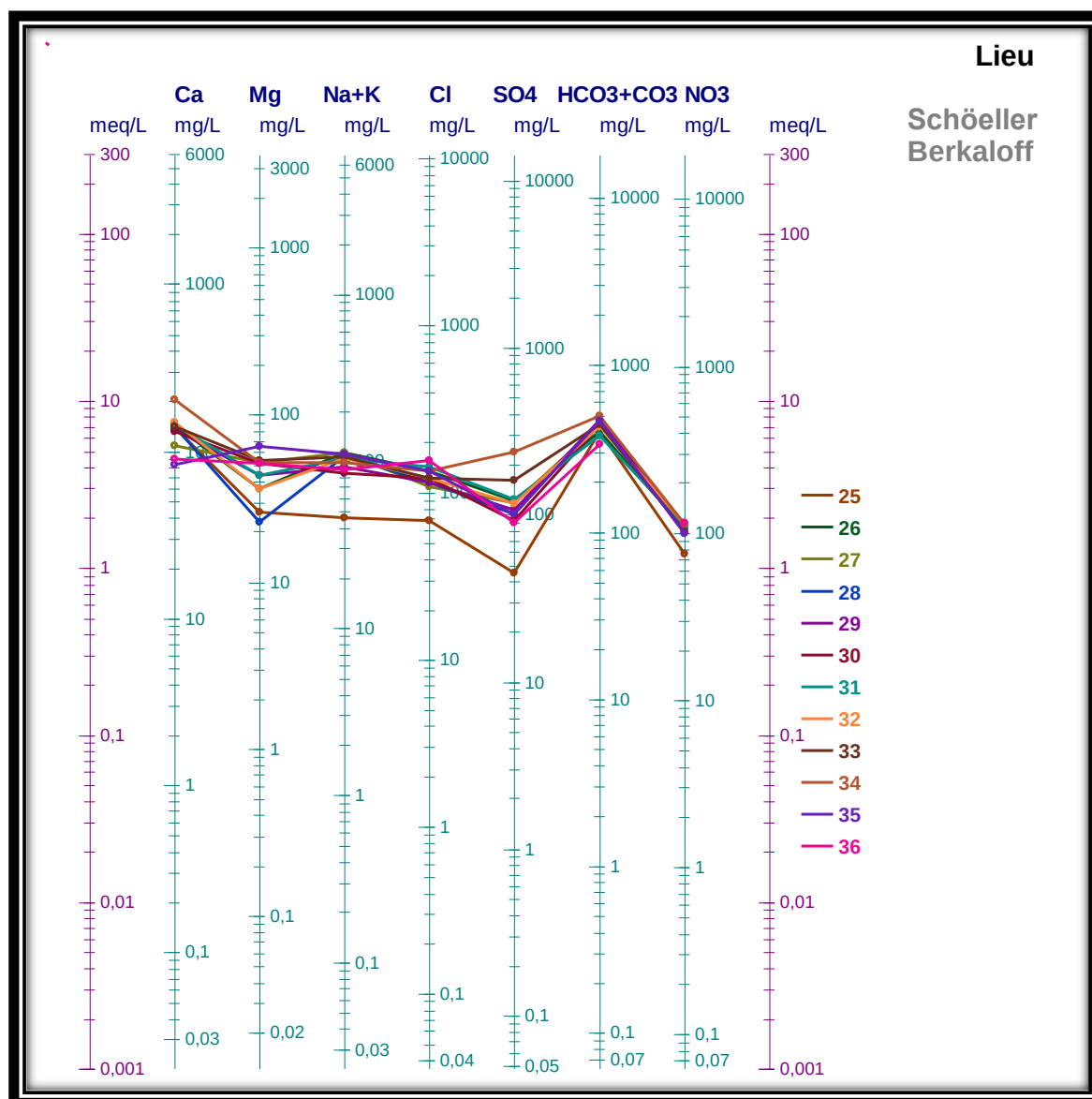


Fig.12.C : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff.

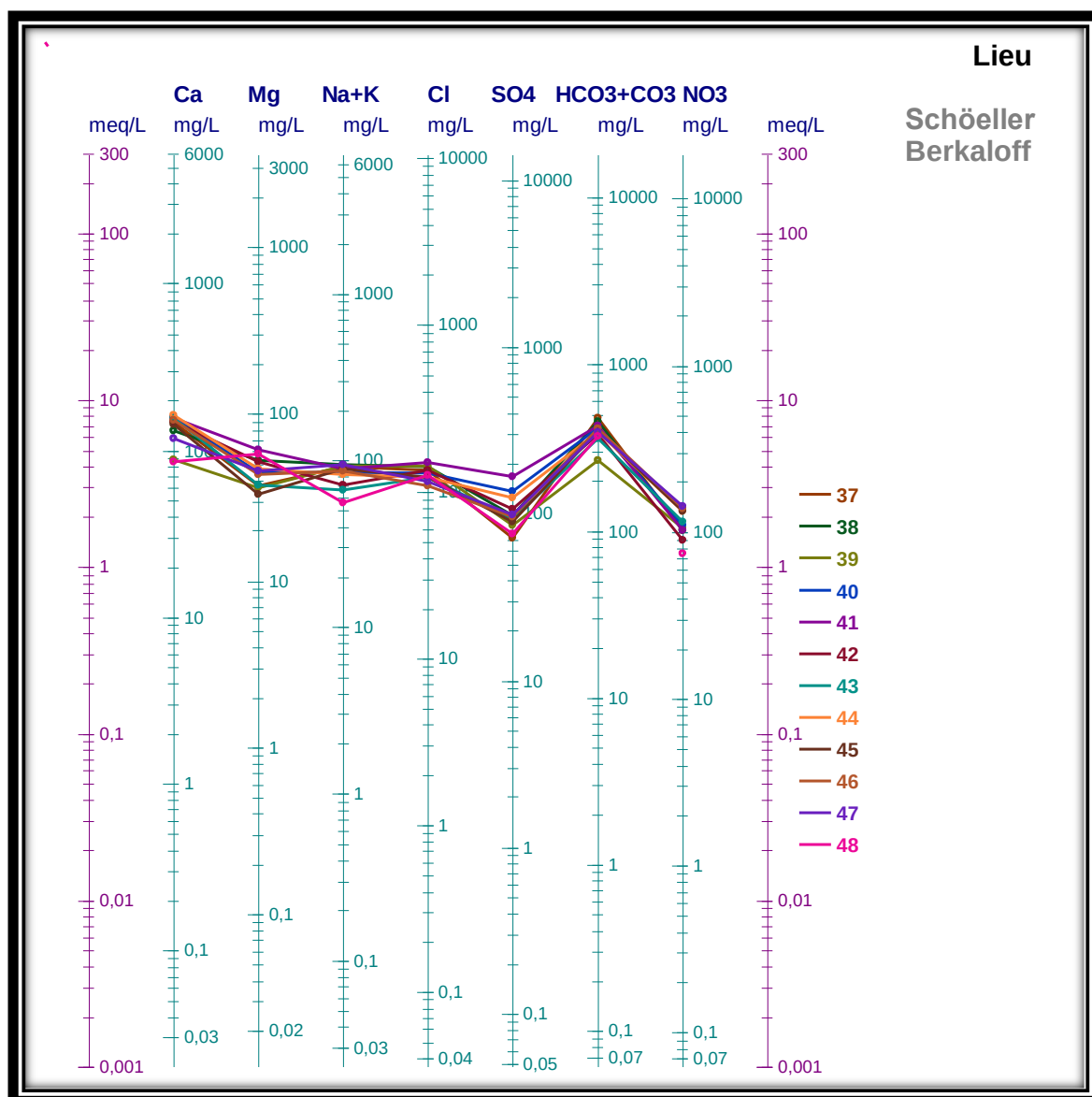


Fig.12.D : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff.

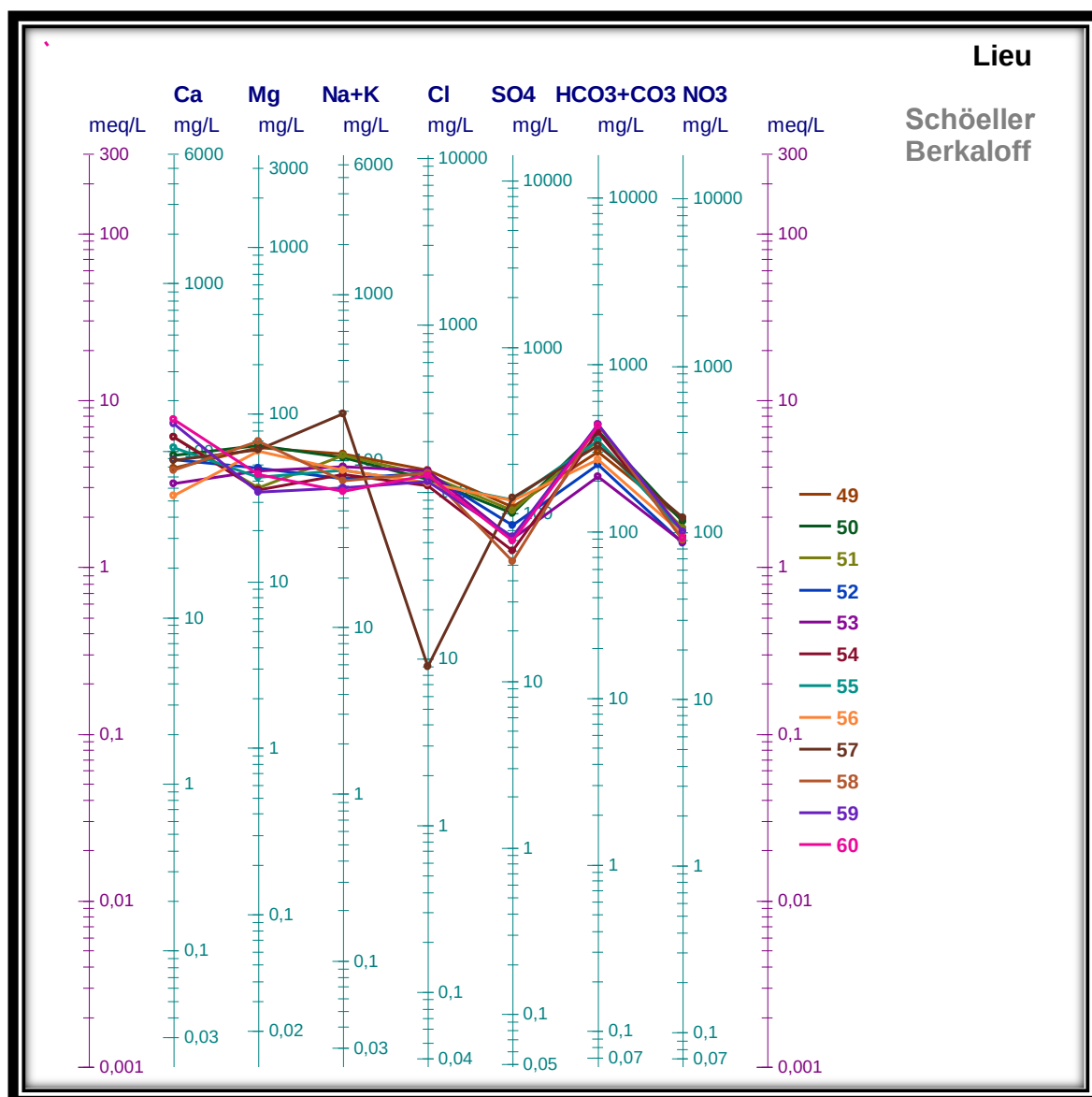


Fig.12.E : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff.

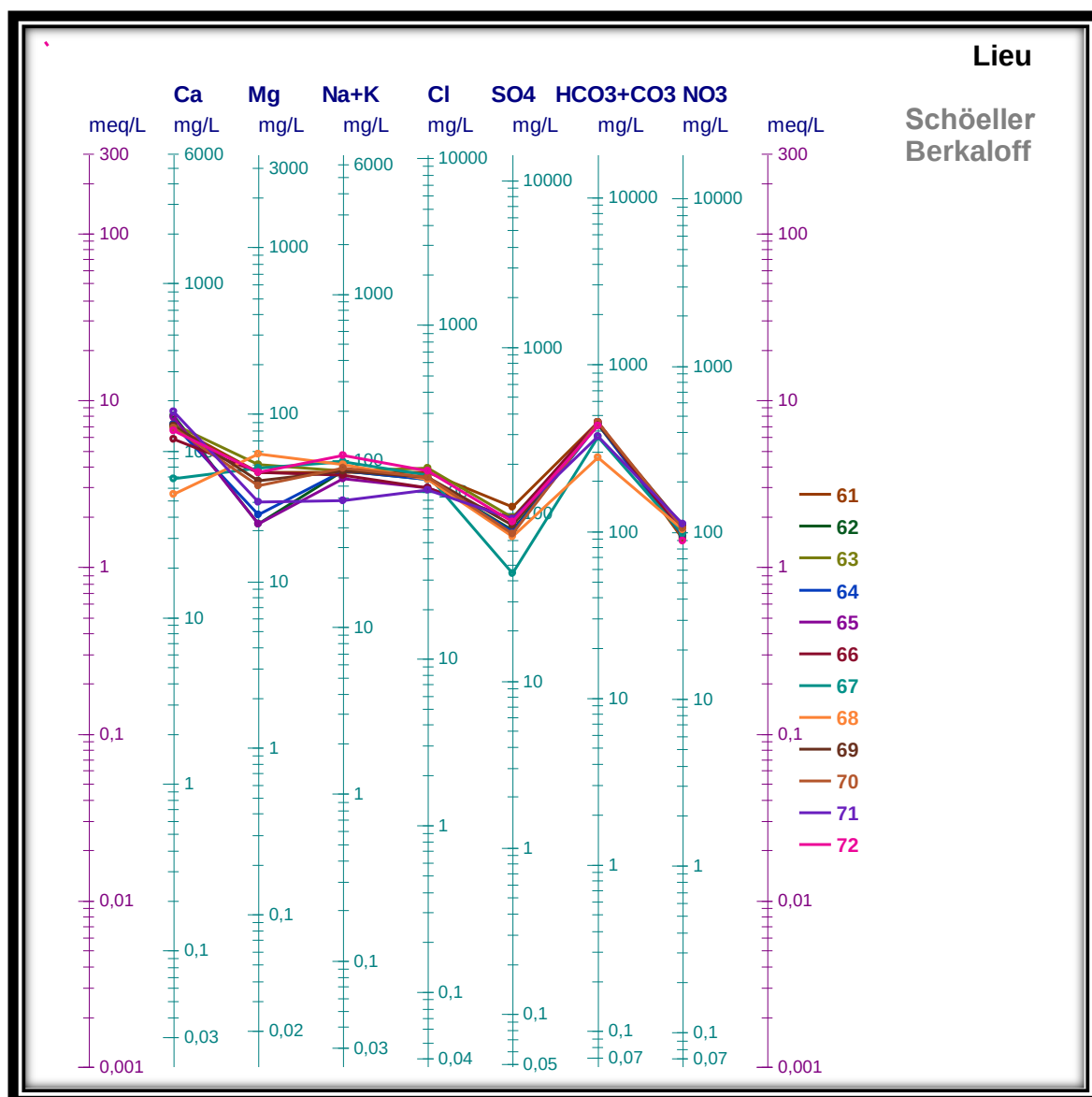


Fig.12.F : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff.

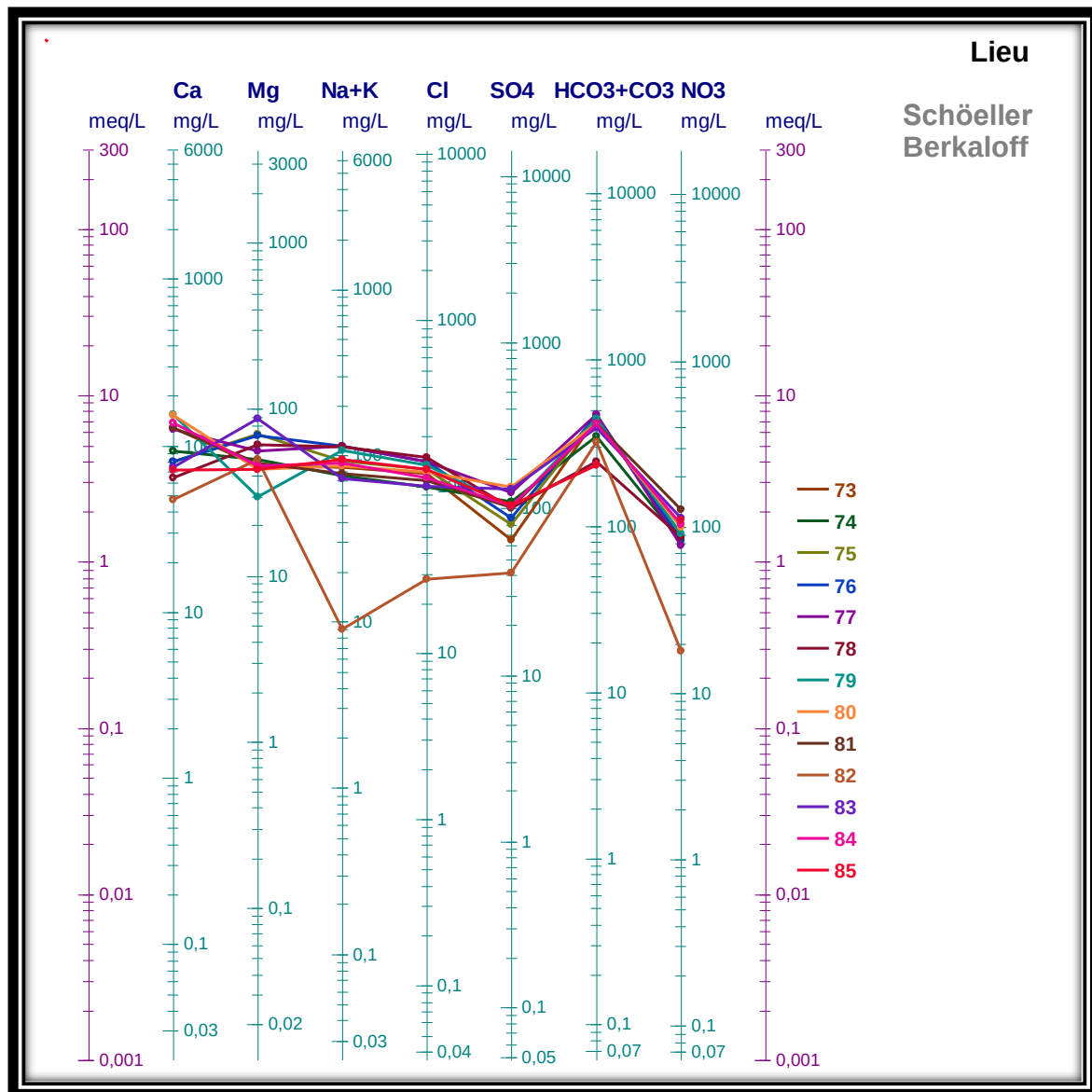


Figure.12.G : Classification des eaux, selon Schoeller –Berkaloff.

A partir des **figures A....Gains** que du tableau n°4 en annexe , il ressort que le diagramme de Schoeller-Berkaloff met en évidence une prédominance du faciès bicarbonaté calcique dans la majorité des échantillons étudiés . Quelques échantillons présentent un faciès bicarbonaté magnésien, tandis qu'un faible nombre est caractérisé par un faciès bicarbonaté sodique. Cette distribution traduit l'influence prépondérante des formations carbonatées sur la composition chimique des eaux ainsi qu'une légère variabilité hydrochimique entre les échantillons.

III.5.2 Diagramme logarithmique de Stabler :

Se caractérise par deux segments, un pour les cations et l'autre par les anions. Les concentrations sont en meq/L.

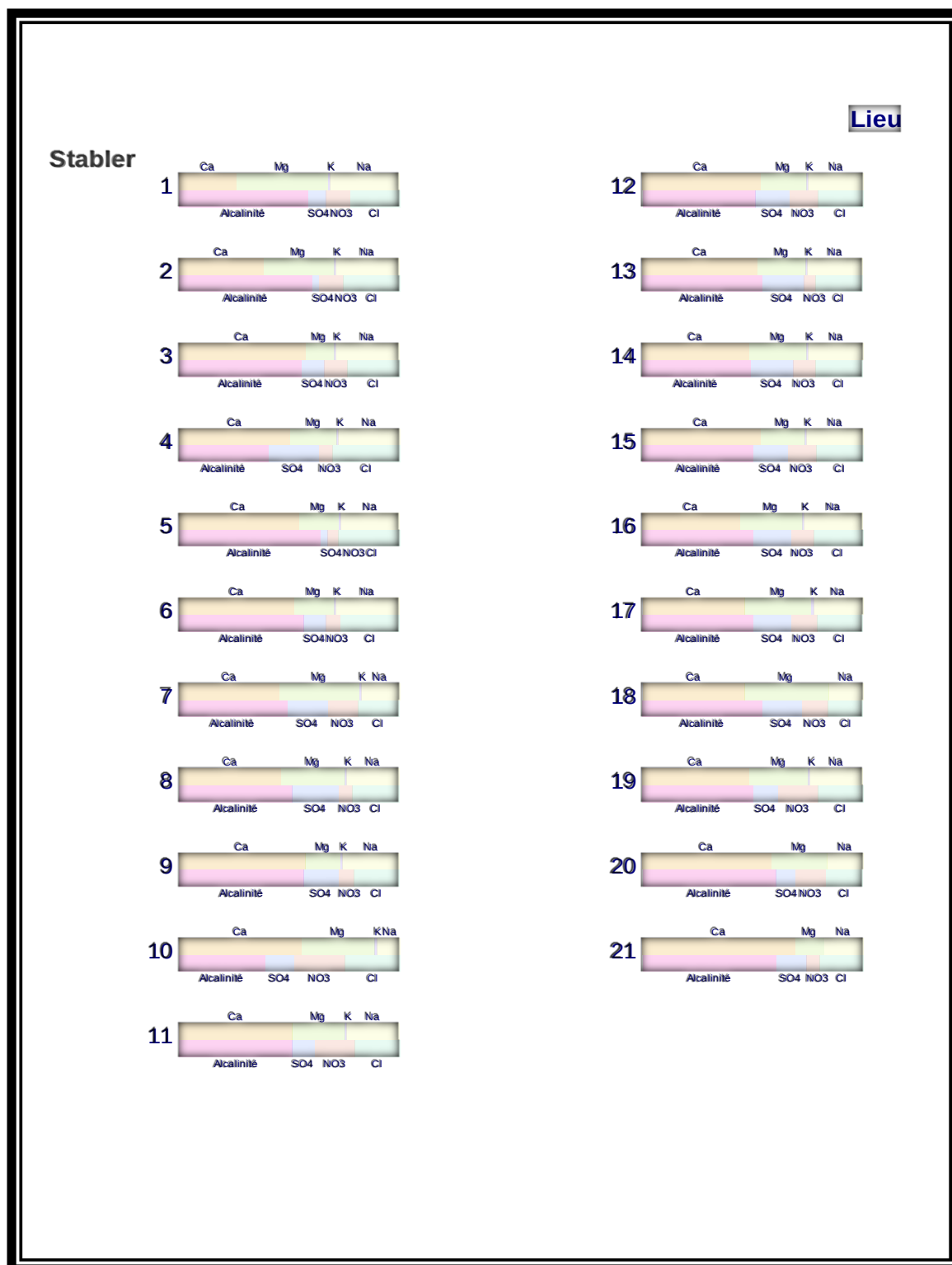


Fig.13.A : Diagramme de Stabler.

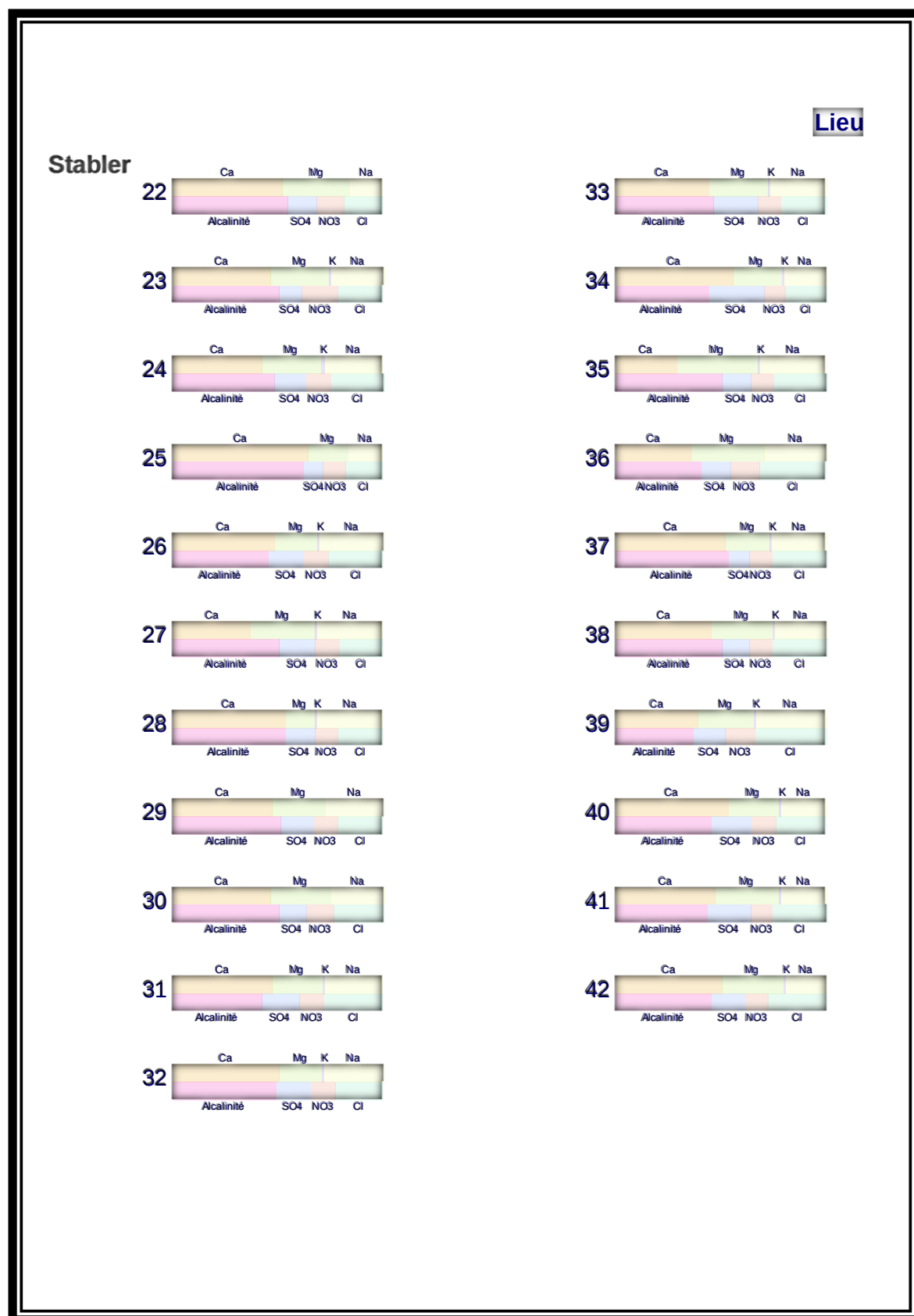


Fig.13.B : Diagramme de Stabler.

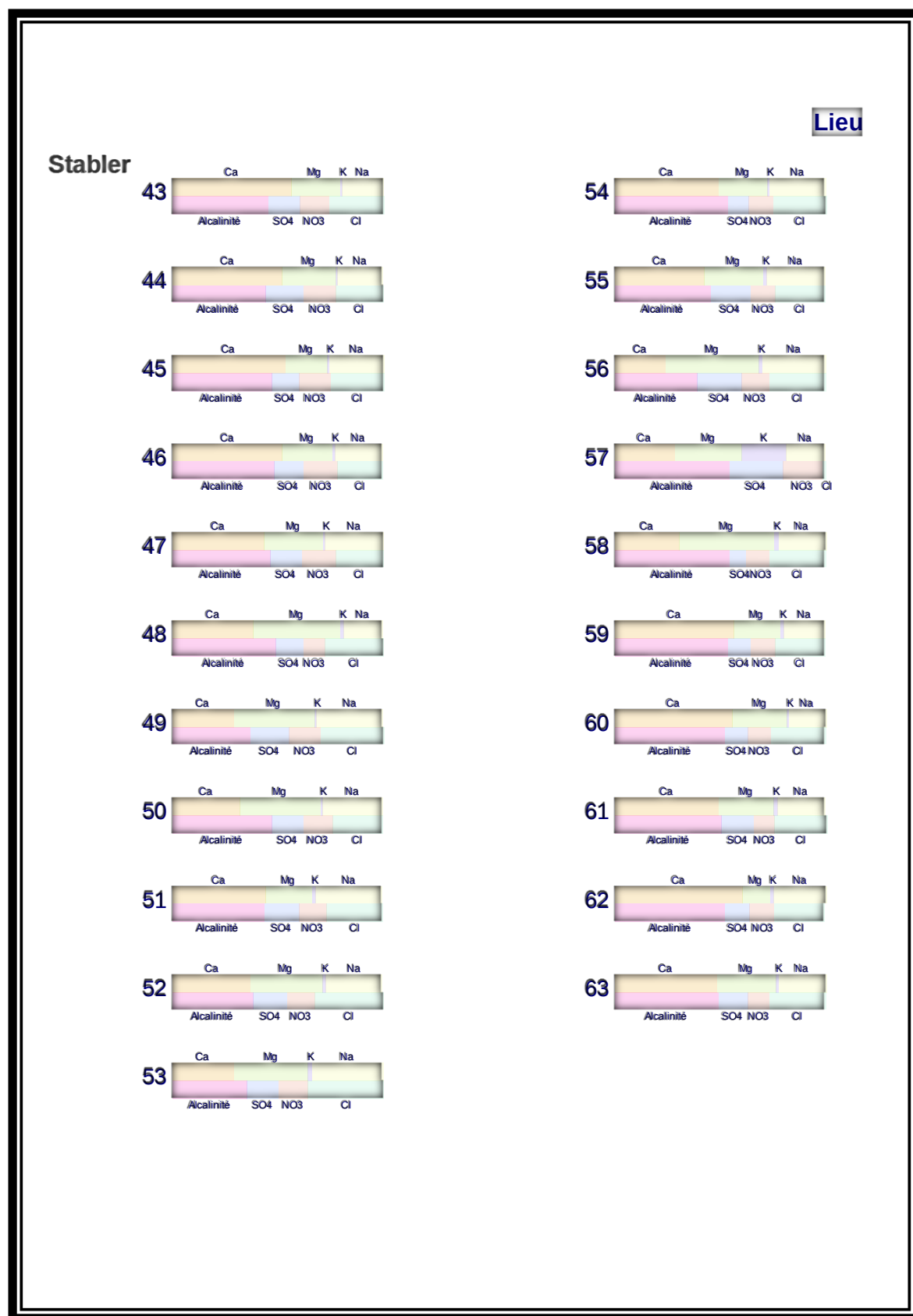


Fig.13.C : Diagramme de Stabler.

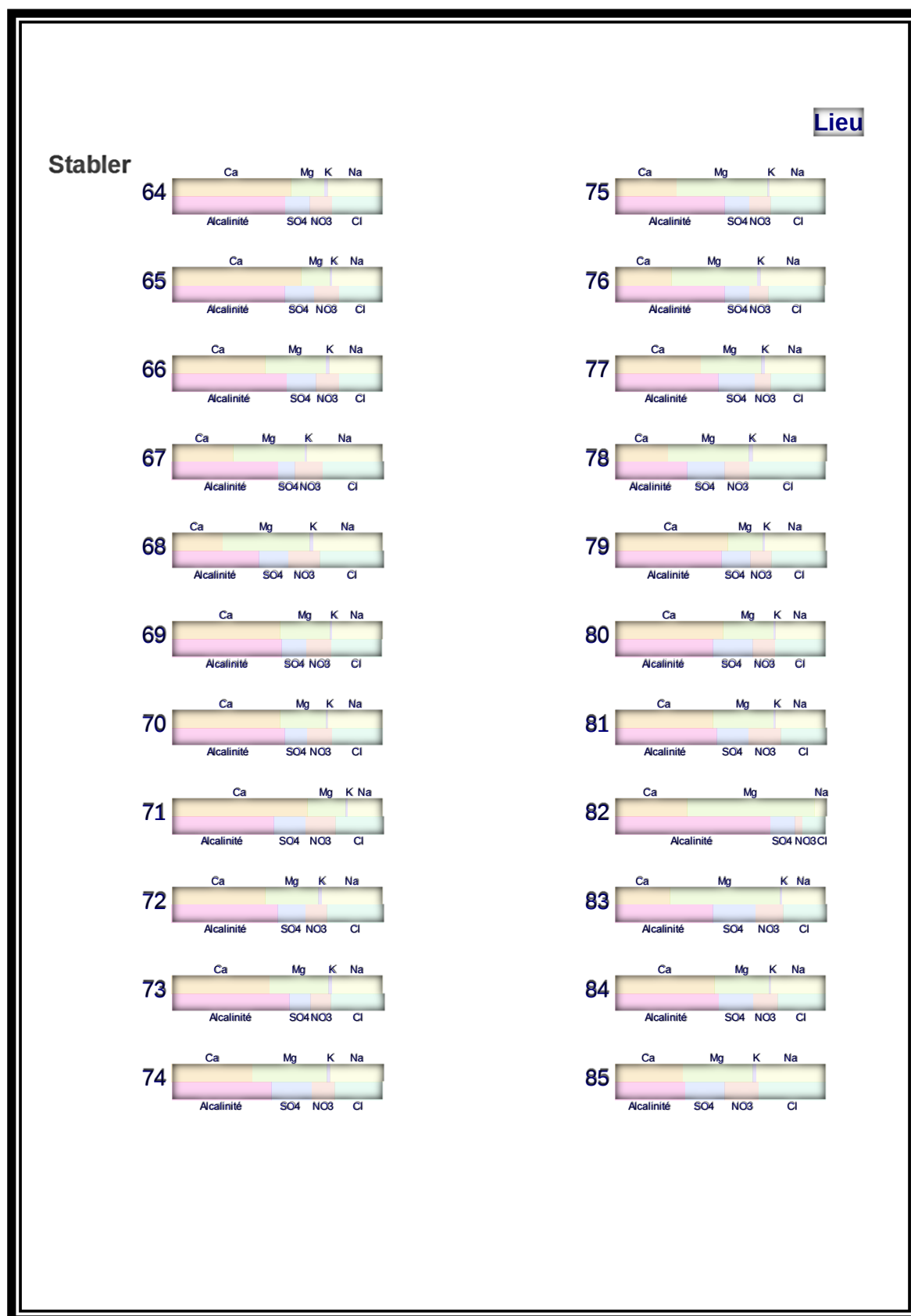


Fig.13.D : Diagramme de Stabler.

Les figures A,B,C,D montrent qu'il y a 3 faciès : (tableau n°5 en annexes)

- Faciès bicarbonaté calcique (le plus dominant) :représenté par les numéros des échantillons(2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,28,29,30,31,32,33,34,36,37,38,40,41,42,43,44,45,46,47,51,52,54,55,59,60,61,62,63,64,65,66,69,70,71,72,73,74,79,80,81,84).
- Faciès bicarbonaté magnésien :(1,35,48,50,56,58,68,75,76,82,83).
- Faciès bicarbonaté sodique : (27,39,49,53,57,67,78,85).

L'analyse des diagrammes de Stabler révèle que la majorité des échantillons présentent un faciès bicarbonaté calcique, caractérisé par une prédominance de l'ion Calcium sur le Magnésium dans la barre supérieure des cations.

Cependant, on observe une transition nette vers un faciès bicarbonaté magnésien pour une série d'échantillons, où la proportion de Magnésium devient prépondérante. Cette dualité suggère que l'eau traverse des formations géologiques mixtes, composées initialement de calcaires, puis s'enrichissant en magnésium au contact de roches dolomitiques. La stabilité de la partie inférieure des diagrammes confirme que l'alcalinité (bicarbonates) reste l'anion dominant pour l'ensemble des points analysés.

III.5.3Le diagramme triangulaire de PIPER.

Le diagramme de Piper constitue un graphique couramment employé en hydrochimie. Sa fonction principale est de visualiser et de confronter les caractéristiques de la composition chimique des eaux. Il est agencé autour de deux triangles distincts, l'un dévolu aux cations positionné à gauche, l'autre aux anions situés à droite. Plus précisément, le triangle des cations illustre la distribution proportionnelle des ions positifs majeurs, notamment le (Ca^{2+} , le Mg^{2+}), et la somme ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$). Simultanément, le triangle des anions rend compte de la répartition des principaux ions négatifs, comprenant ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , et Cl^-). Au sein de chacun de ces triangles, un point singulier est représentatif de la proportion relative de chaque espèce ionique dissoute dans l'échantillon d'eau. En outre, la section centrale du diagramme, sous la forme d'un losange, sert à l'identification du faciès chimique prédominant de l'eau analysée.

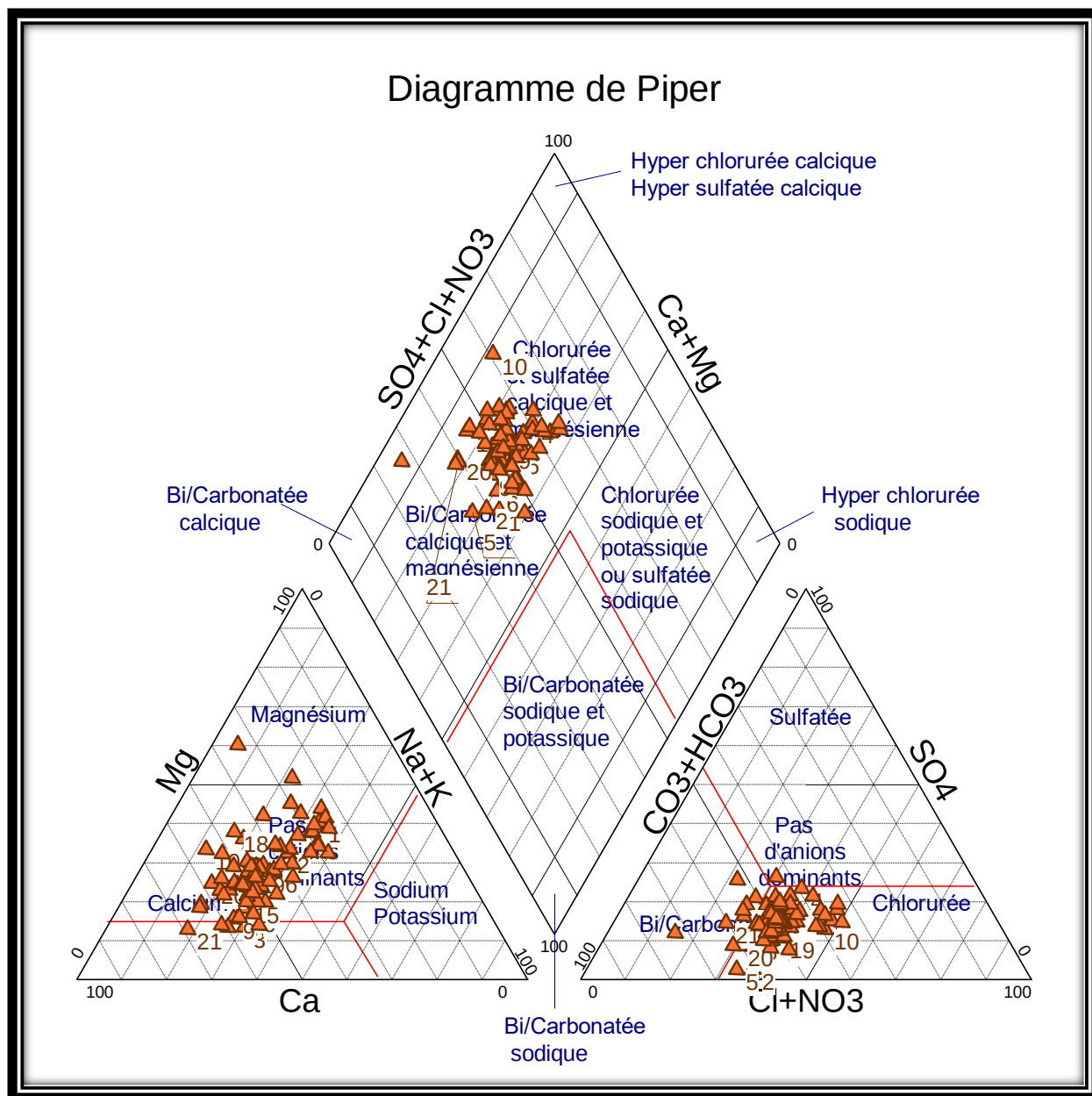


Fig.14. A : Diagramme de Piper.

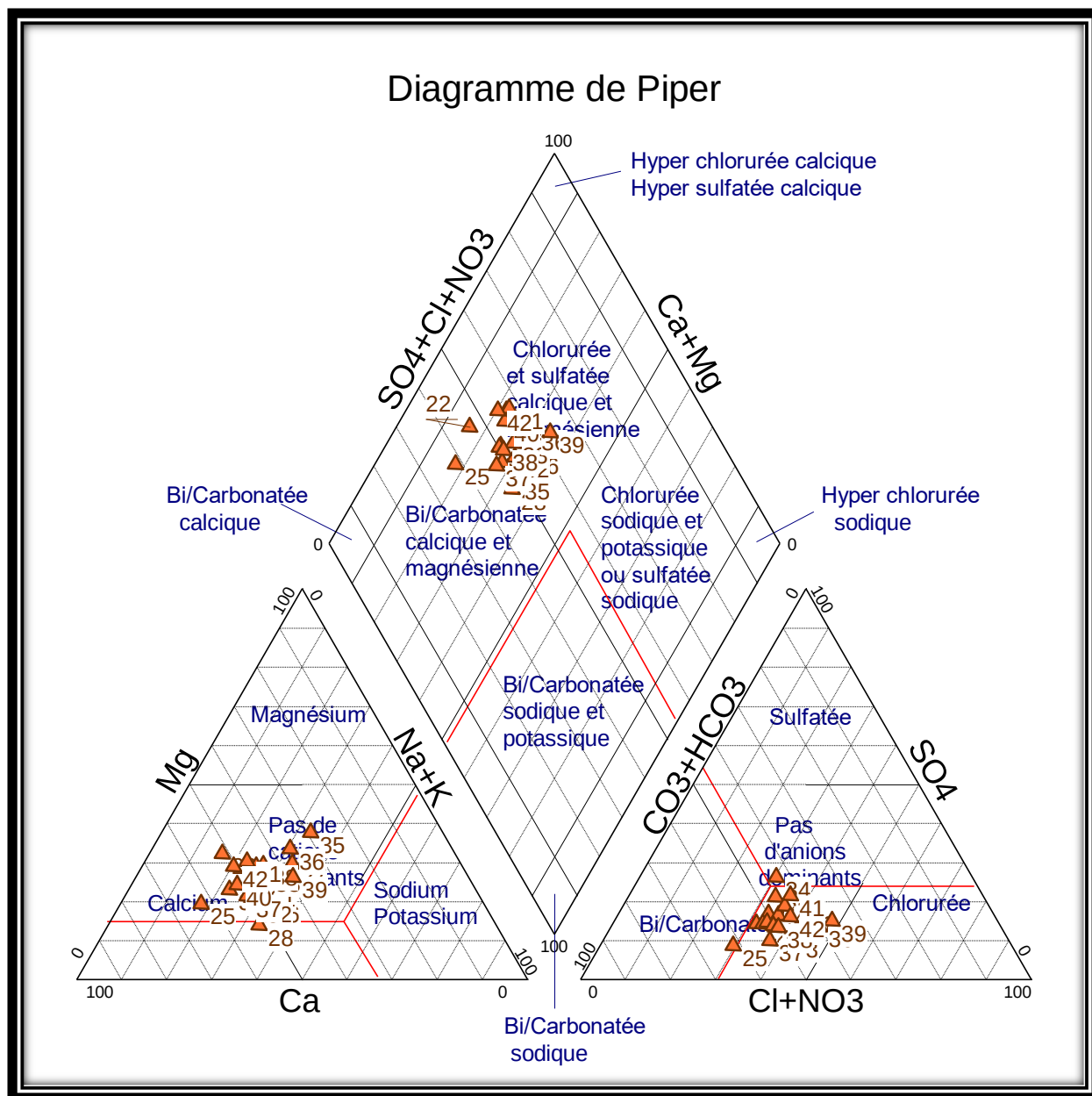


Fig.14.B : Diagramme de Piper.

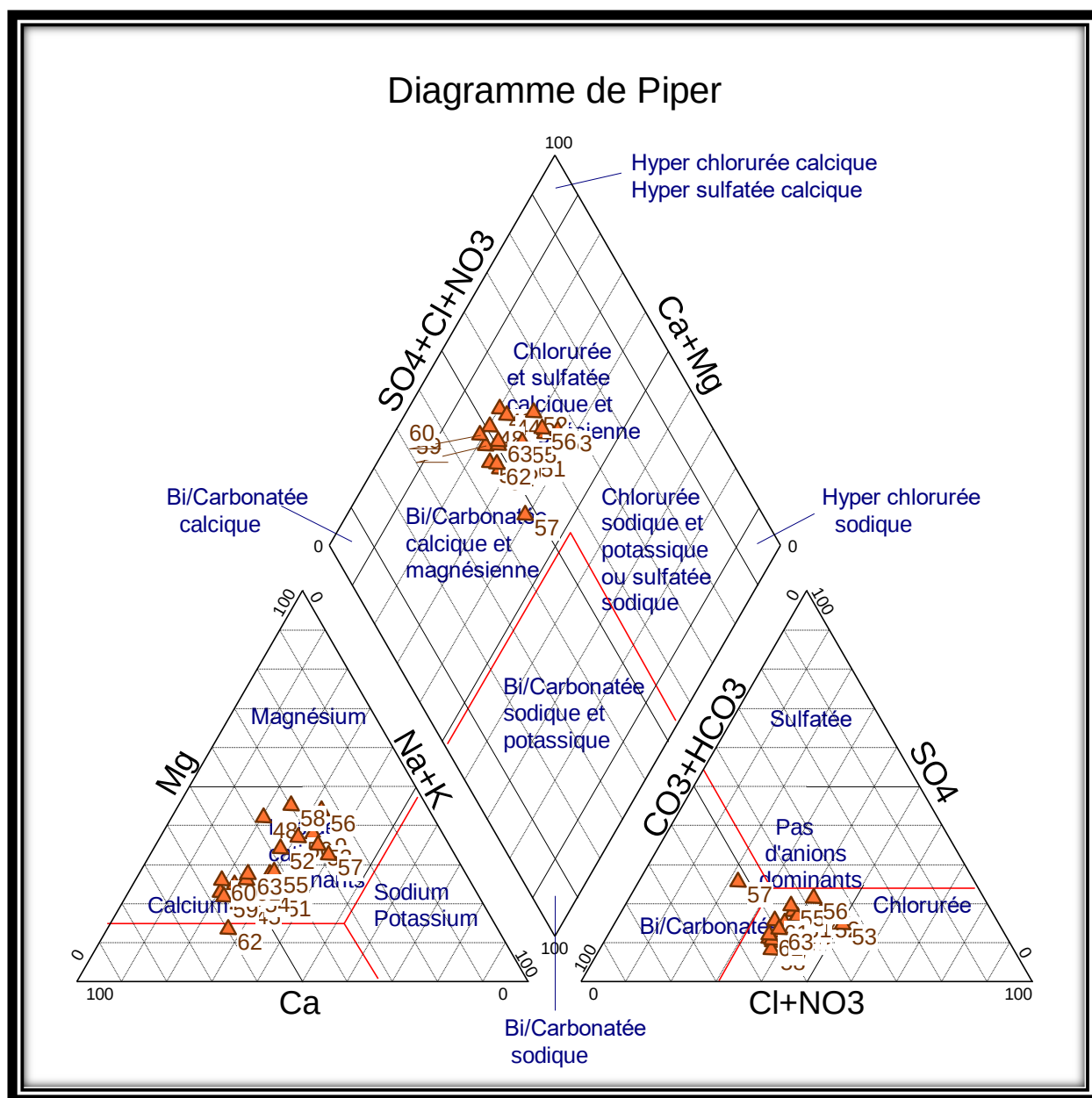


Fig.14.C : Diagramme de Piper.

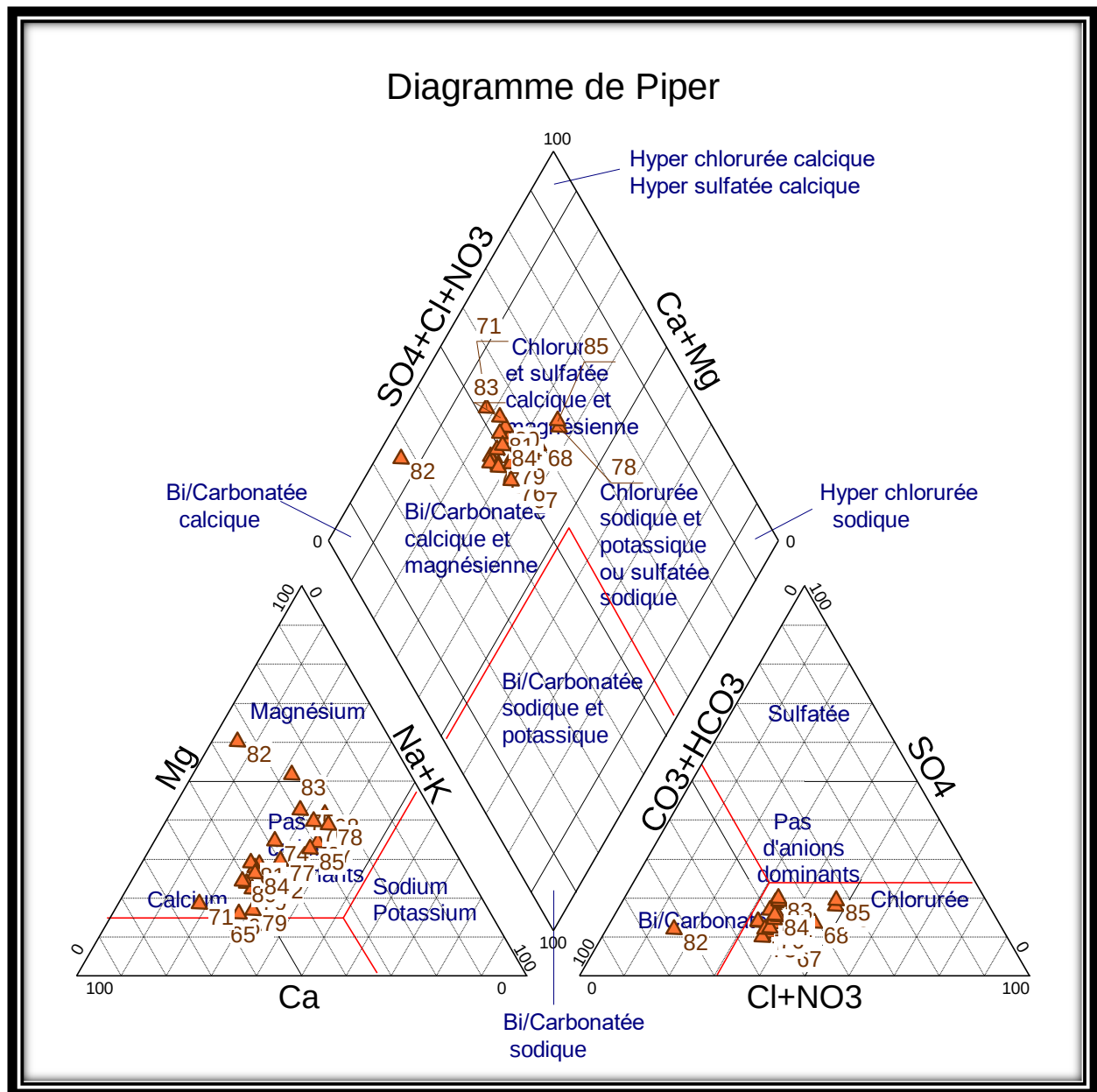


Fig.14.D : Diagramme de Piper.

L'analyse des figures A,B,C ,D issues du diagramme de Piper révèle que les échantillons d'eau analysés (Source El Onsor) se caractérisent majoritairement par deux familles de faciès :

-Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne :représentée par les échantillons : (4,7,10,16,17,23,24,26,27,31,32,33,34,36,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,55,56,61,63,67,68,71,74,77,78,79,80,81,83,84,85).

-Bicarbonatée calcique et magnésienne : représentée par les échantillons:(1,2,3,5,6,8,9,11,12,13,14,15,18,19,20,21,22,25,28,29,30,35,37,54,57,58,59,60,62,64,65,66,69,70,72,73,75,76,82).

III.2 Aptitude des eaux destinées à l'irrigation :

L'évaluation de la qualité des eaux destinées à l'agriculture est une étape cruciale, car l'usage d'une eau inappropriée peut entraîner une dégradation irréversible des sols, notamment par le phénomène de salinisation. Ce risque est particulièrement accentué dans les zones à climat aride. Selon Rodier J. (1996), la conductivité électrique demeure l'indicateur prépondérant pour estimer la charge saline globale des eaux d'irrigation.

Afin de déterminer l'impact de l'eau sur le complexe absorbant du sol et sur les cultures, plusieurs indices physico-chimiques et méthodes graphiques sont couramment utilisés, à savoir :

- * Le pourcentage en sodium (% Na⁺) : Il permet d'évaluer le danger de l'alcalinisation.
- * L'indice de Kelly's Ratio (Kr) : Utilisé pour caractériser l'excès de sodium par rapport au calcium et au magnésium.
- * Le diagramme de RIVERSIDE : Pour classer l'eau selon le risque de salinité et de sodicité.
- * Le diagramme de WILCOX : Qui définit les classes de qualité d'eau en fonction de la conductivité et du pourcentage en sodium.

Le tableau n°6 en annexes présente la Classification des eaux d'irrigation, D'après servant 1975 (U.S.SALINITY LAB)

III.2.1 Le pourcentage en Sodium (% Na⁺)

Outre la salinité, l'alcalinisation des sols représente une contrainte majeure. Ce processus résulte des échanges cationiques entre les ions sodium (Na⁺) de l'eau et les ions calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺) fixés sur les argiles du sol. Un taux élevé de sodium peut altérer la structure physique du sol, réduisant ainsi sa perméabilité.

Le pourcentage en Na⁺ est donné par la formule suivante :

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

Tab.04 : Classification des eaux, selon le pourcentage en Na⁺.

Classe	Eau très bonne	Eau bonne	Eau admissible	Eau médiocre	Eau mauvaise
% Na ⁺	<20	20-40	40-60	60-80	>80

Le tableau n°7 en annexes présente le pourcentage en sodium des points d'eau étudiés.

L'analyse du pourcentage en sodium (Na%) révèle que l'ensemble des échantillons des eaux de la source El Onsor sont très bonnes pour l'irrigation. La faible proportion en sodium par rapport aux autres cations majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺) indique que ces eaux ne présentent aucun risque d'alcalinisation ou de dégradation de la structure physique des sols pour l'irrigation.

III.2.2 Indice de Kelly's Ratio (Kr) :

Cet indice est 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.

L'application de cette formule nous a permis de dire que les eaux de la source d'El Onsor sont bonnes pour l'irrigation (voir tableau n°8 en annexes).

III.2.3 Diagramme de Riverside :

Lorsque la concentration des ions Na⁺ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca²⁺ (échange de base) dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé (Rodier J., 1996). Le SAR est défini par la relation suivante :

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

S.A.R. < 10 : eau excellente, à faible danger d'alcalinisation des sols.

10 < S.A.R. < 18 : eau de bonne qualité, danger d'alcalinisation assez appréciable.

$18 < \text{S.A.R.} < 26$: eau convenable, danger d'alcalinisation important.

$\text{S.A.R.} > 26$: eau de qualité médiocre, danger de forte alcalinisation

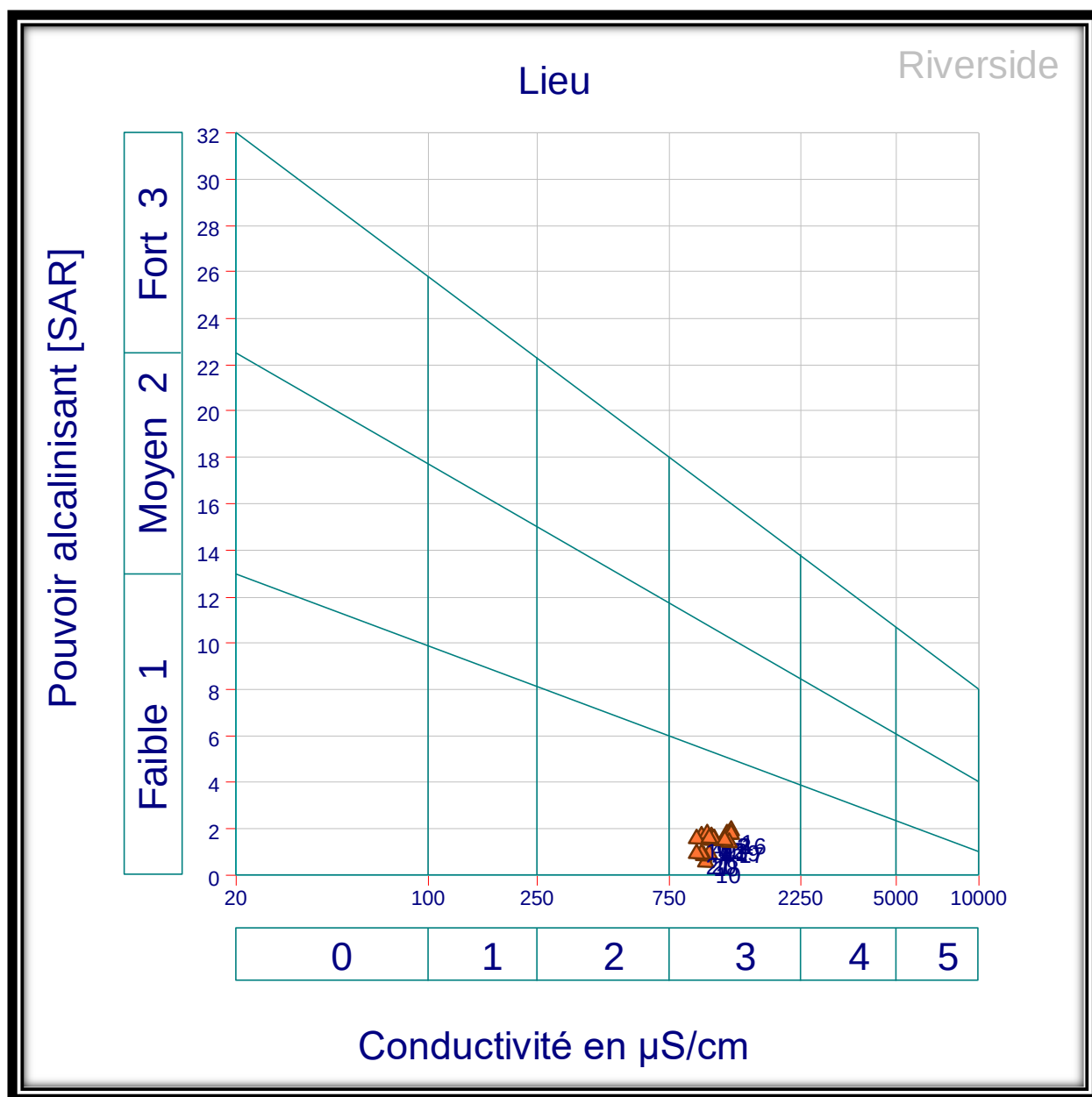


Fig.15.A : Diagramme de RIVERSIDE.

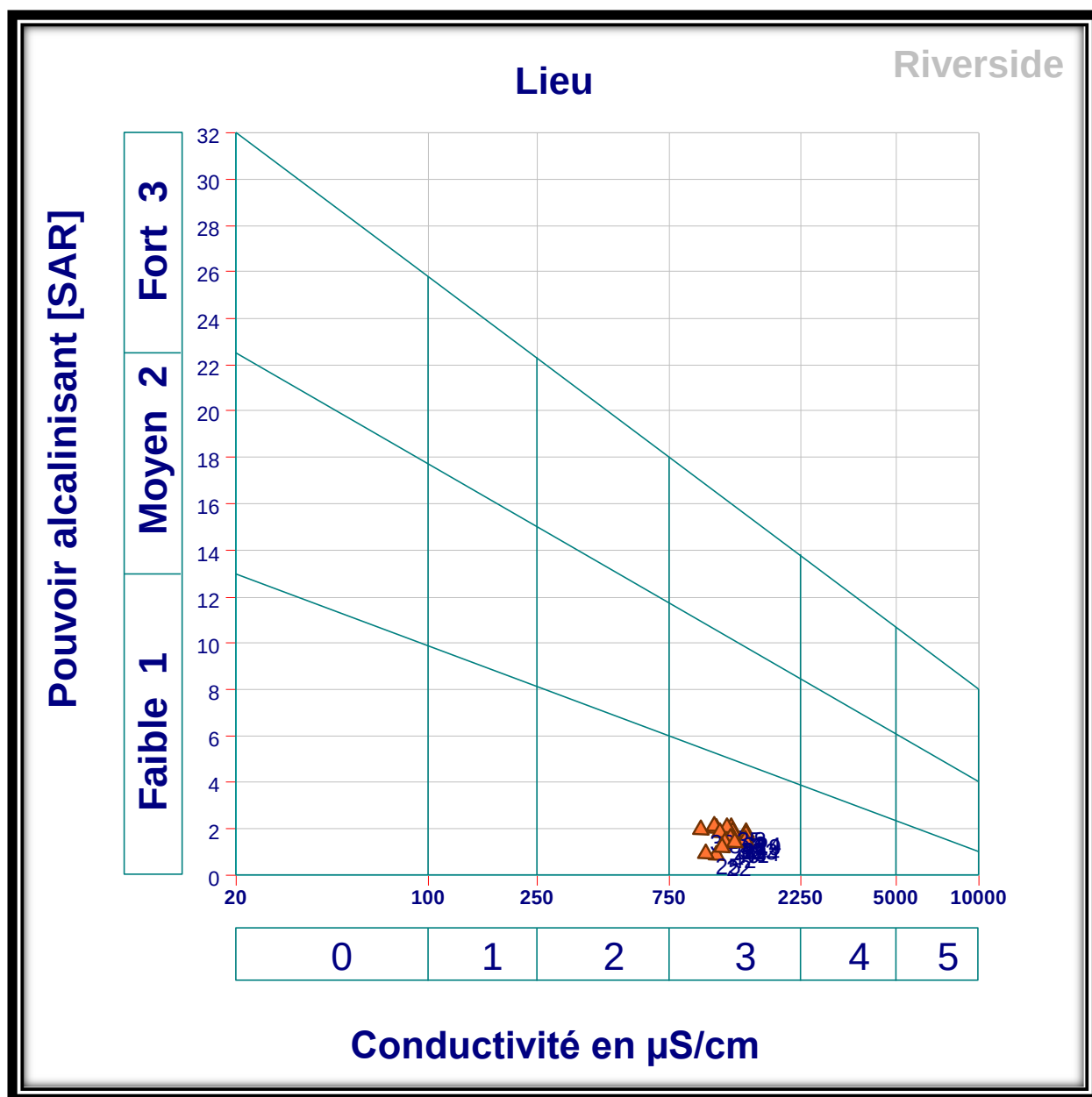


Fig.15.B : Diagramme de RIVERSIDE.

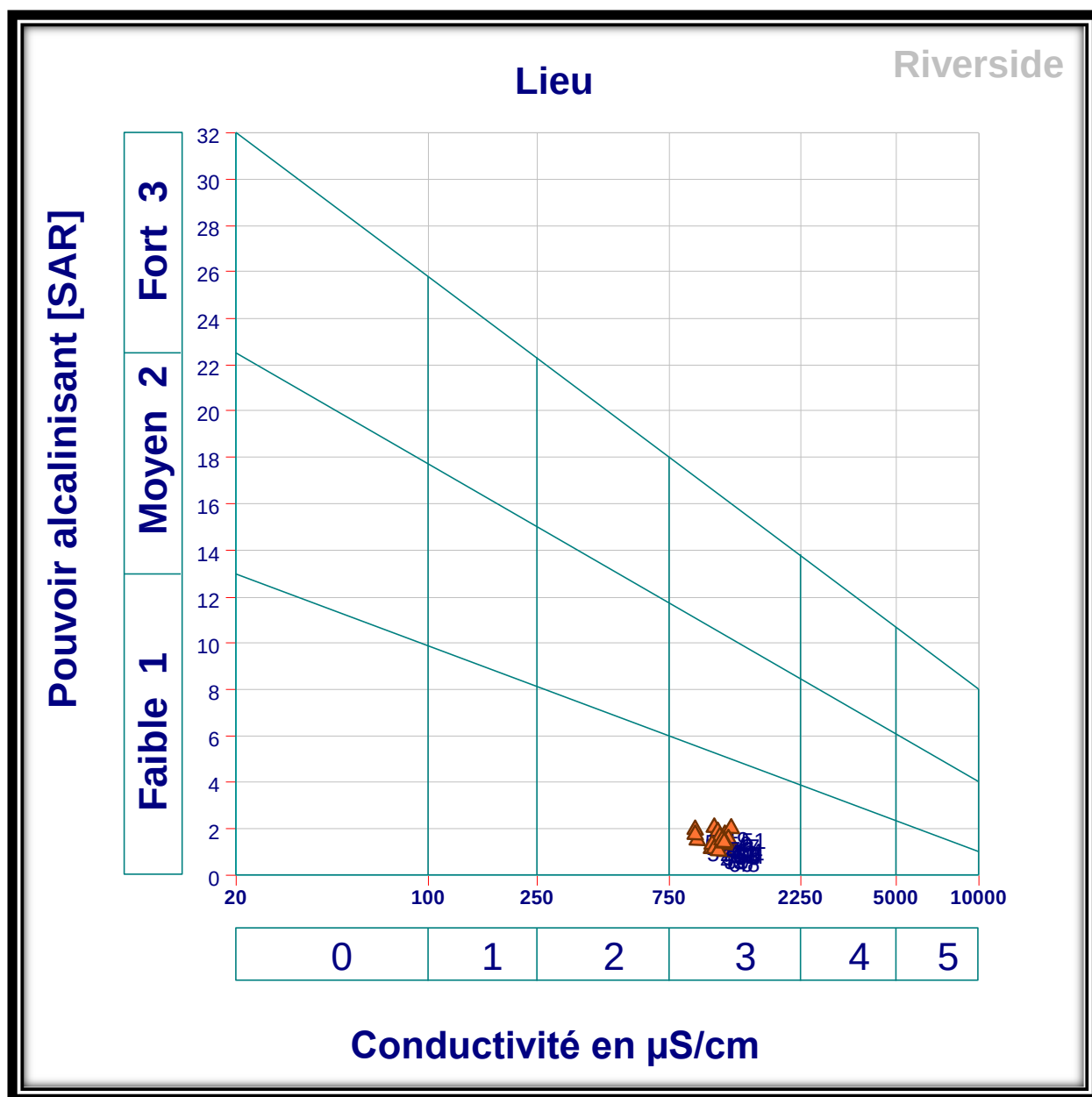


Fig.15.C: Diagramme de RIVERSIDE .

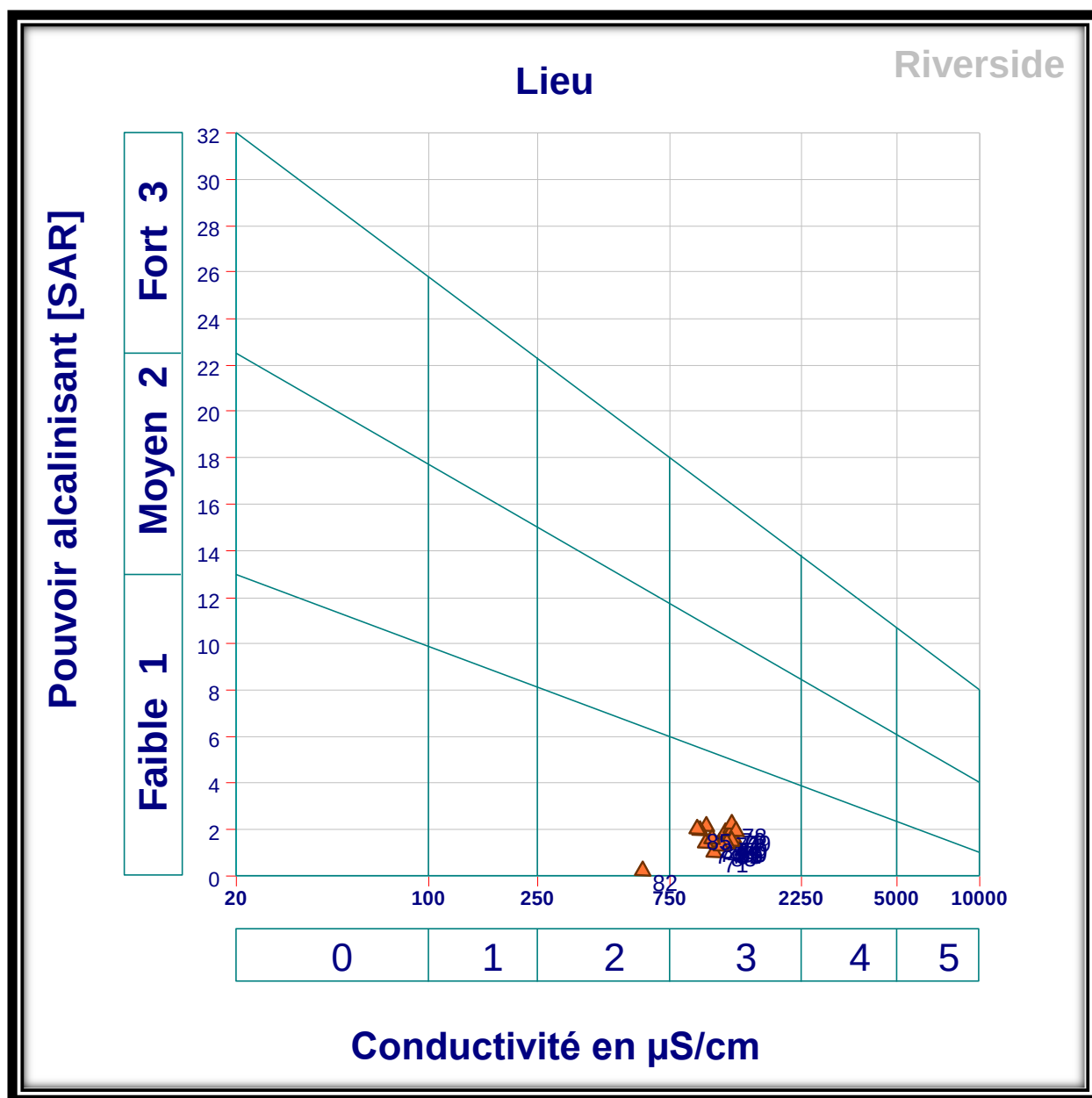


Fig.15.D: Diagramme de RIVERSIDE.

À l'instar des diagrammes précédents (A, B, C, D) la distribution des échantillons se concentre majoritairement dans la classe **C3-S1 (qualité admissible)** : En générale, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sel, sur des sols bien drainés. Principaux problème dus aux plantes trop sensibles au sodium et aux sols à faible perméabilité. (Tab N°06 EN annexe)

Le point 82 fait exception, en se positionnant dans la classe **C2-S1**, indiquant une eau de **bonne qualité** pour l'irrigation : 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). (TabN°06 enannexes).

III.2.4 Diagramme de WILCOX :

WILCOX classe les eaux à partir de leur proportion en sodium, en fonction de la conductivité électrique, définissant 5 classes d'eau (excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise).

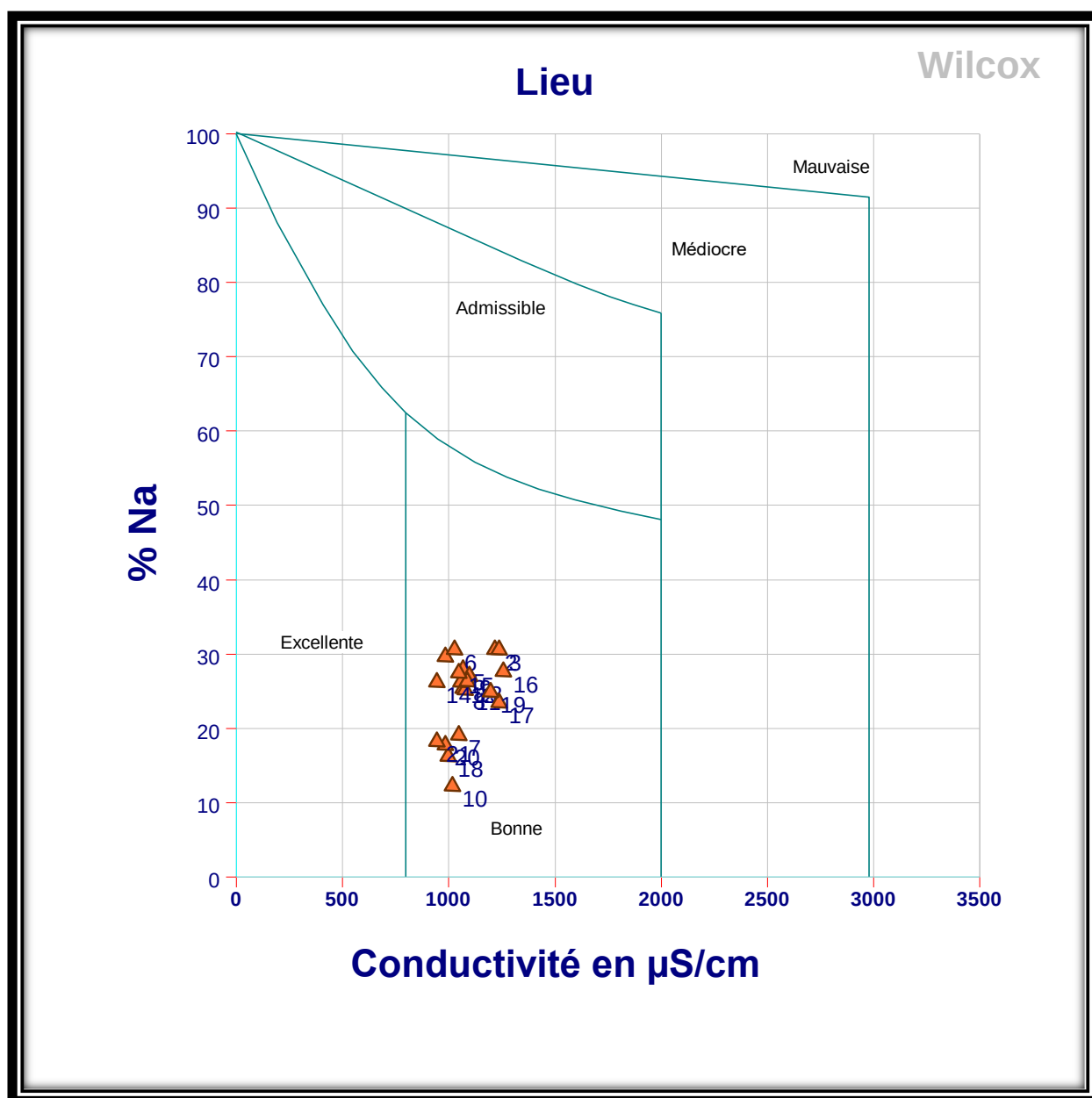


Fig.16.A : Diagramme de WILCOX.

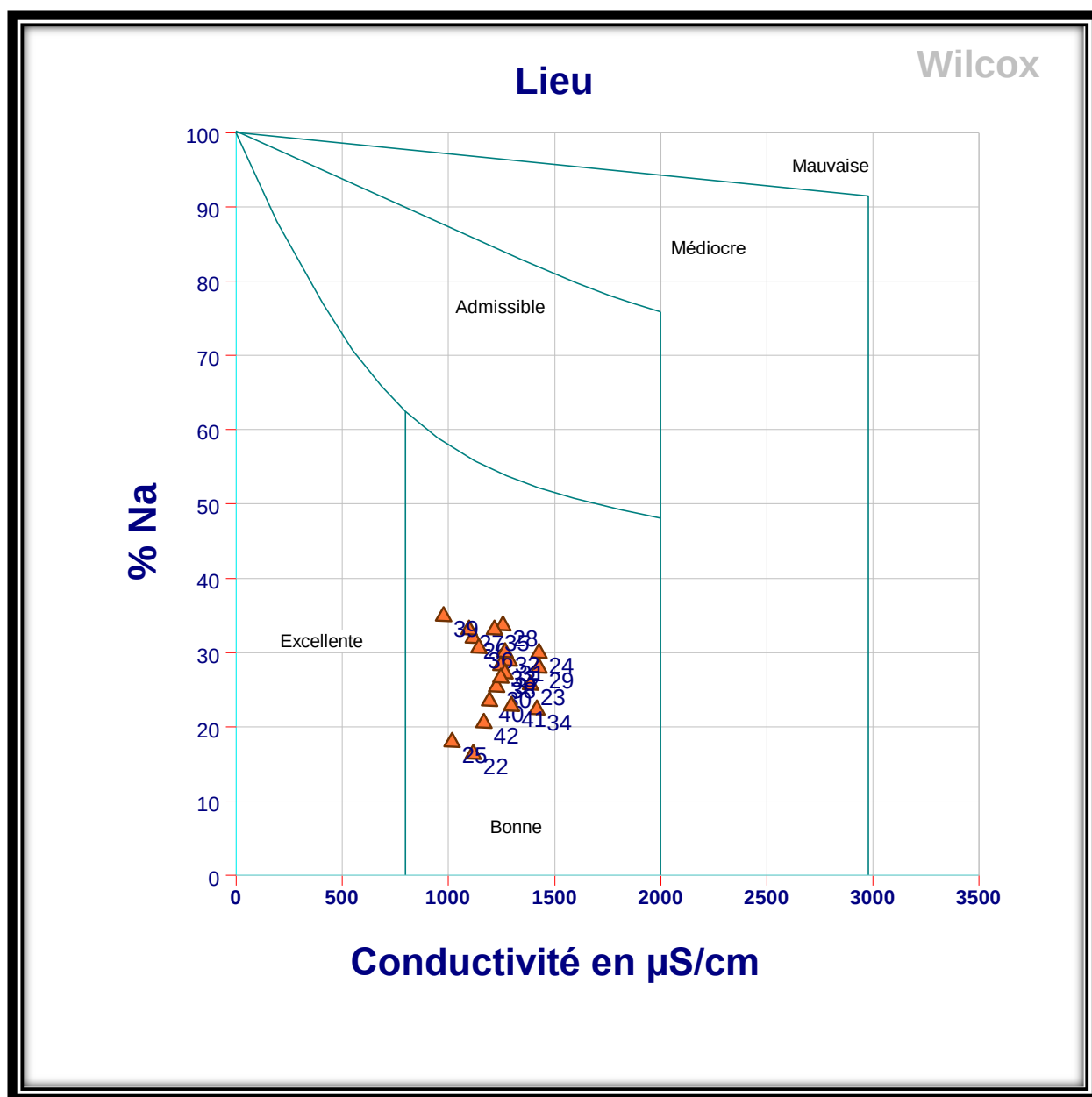


Fig.16.B: Diagramme de WILCOX.

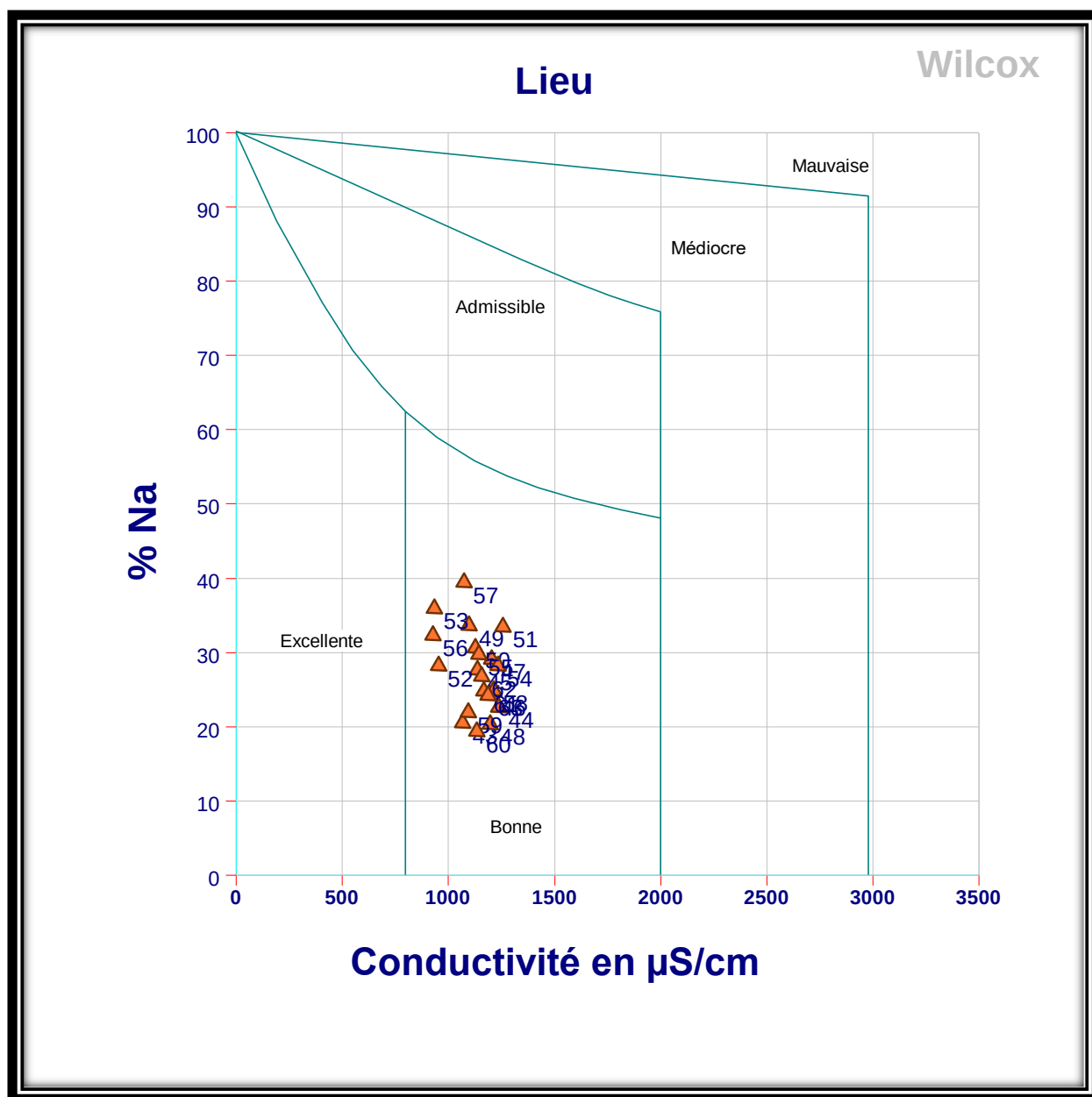


Fig.16.C: Diagramme de WILCOX.

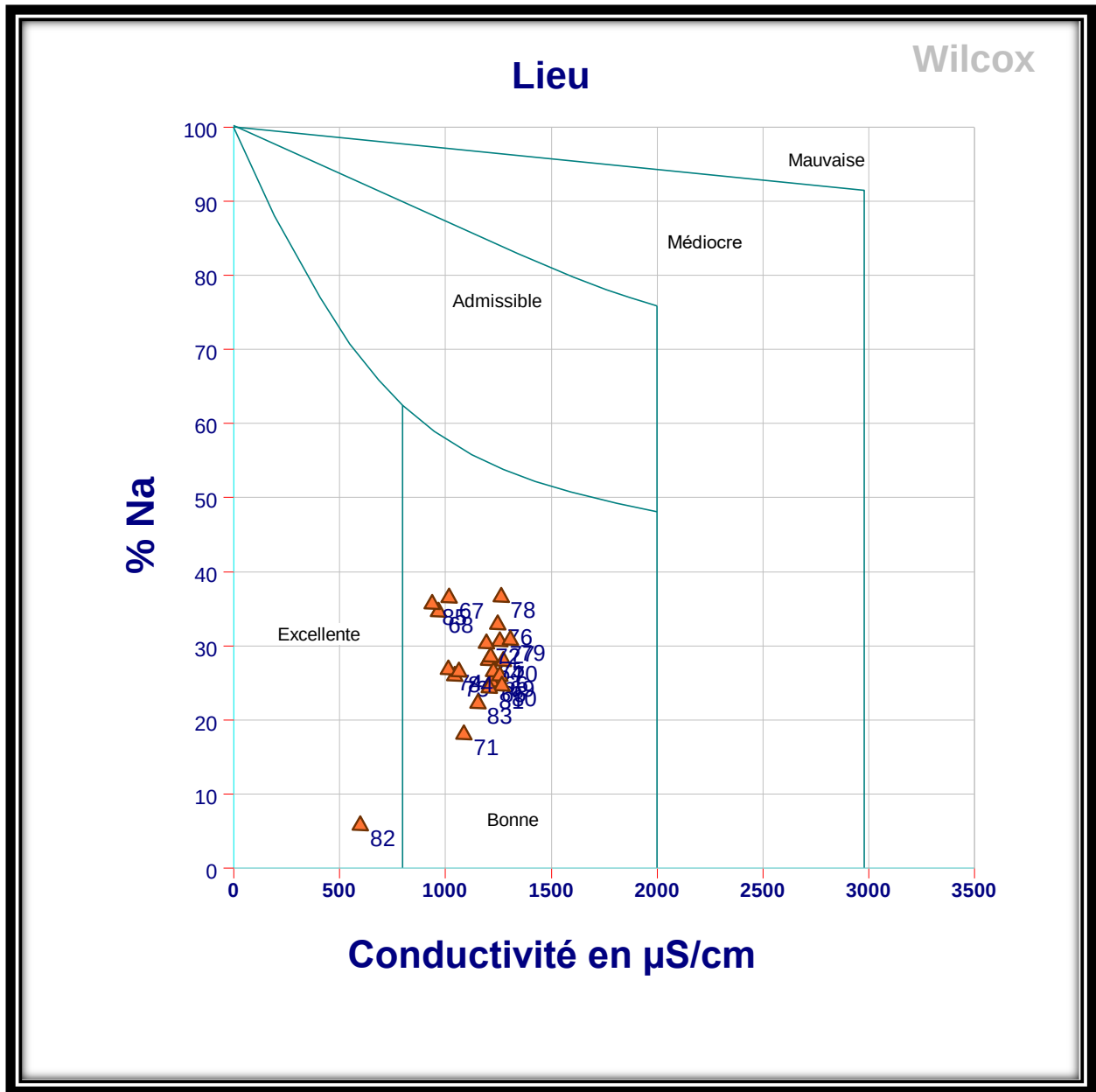


Fig.16.D: Diagramme de WILCOX.

La projection des numéros des échantillons sur les diagrammes de Wilcox (Fig A , B, C,D) montre que la majorité des eaux appartient à la classe « **Bonne** » pour l'irrigation. Seul l'échantillon 82 se distingue dans la classe « **Excellente** ». Ces résultats confirment une bonne aptitude globale des eaux à l'irrigation, sans risque majeur d'alcalinisation des sols.

III.3 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 classifie 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 hydro chimiques 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 hydro- chimiques à l'aide du logiciel XLSTAT.

L'analyse descriptive des éléments chimiques des eaux d'El Onsor a révélé que la majorité des coefficients de variation sont inférieurs à 50 % (tableau 5), ce qui indique une stabilité prononcée de la concentration de ces éléments dans la zone d'étude, à l'exception du potassium. Cette hétérogénéité pourrait être attribuée aux facteurs anthropiques influençant la composition chimique des eaux. En revanche, les bicarbonates 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.

Tab.05 : Coefficient de variation.

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	CV %
Ca ⁺²	47,000	204,000	123,929	26,245373
Mg ⁺²	17,000	88,000	45,459	28,4226307
Na ⁺	9,000	106,000	79,306	22,9465963
K ⁺	0,000	125,000	7,847	166,278781
Cl ⁻	9,000	157,000	116,235	20,0882566
SO ₄ ⁻²	14,000	237,000	96,012	33,5730468
HCO ₃ ⁻	214,000	499,000	404,294	16,1595892
NO ₃ ⁻	18,000	180,000	100,000	26,9929444

a) L'analyse de corrélation :

La matrice de corrélation du tableau n°06 révèle des relations faiblement à moyennement significatives, cela est due à la variation de temps de séjour des eaux dans l'aquifère karstique. Ces eaux sont connues lors de leur 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 (Ca²⁺/HCO₃⁻) est due à la dissolution des formations carbonatées, tandis que la corrélation entre le Na⁺/Cl⁻ est due aux facteurs anthropiques. La corrélation moyennement inverse entre le Ca⁺² et le Mg⁺² est due à un échange de base.

Tab.06 : Matrice des corrélations.

Variables	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Ca ⁺²	1							
Mg ⁺²	-0,561	1						
Na ⁺	0,021	0,125	1					
K ⁺	-0,129	0,146	0,016	1				
Cl ⁻	0,112	0,118	0,659	-0,416	1			
SO ₄ ⁻²	0,309	0,229	0,305	0,115	0,204	1		
HCO ₃ ⁻	0,575	-0,123	0,197	-0,111	0,055	0,039	1	
NO ₃ ⁻	0,171	0,173	0,155	0,097	0,152	0,166	0,032	1

b) Analyse en composante principale (ACP):

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les ions majeurs dissous dans les eaux d'El Onsor met en évidence plusieurs processus hydrogéochimiques contrôlant la variabilité chimique du milieu. Les résultats des analyses portées sur les 85 échantillons d'eau dans la zone d'étude ont révélé huit variables, les cinq premiers facteurs représentant **87,056%** de la variance totale, offrant une compréhension relativement complète des processus de minéralisation dans le système aquifère (tableau n°07).

L'axe F1, expliquant 26,7% de la variance totale (Tableau 7), est fortement et positivement corrélé à Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , HCO_3^- et dans une moindre mesure, à SO_4^{2-} et NO_3^- (Tableau 8). Il peut ainsi être interprété comme un axe de minéralisation globale, traduisant un gradient de salinité croissante des eaux, depuis des faciès faiblement minéralisés jusqu'à des eaux chlorurées sodiques à tendance calco-bicarbonatée. Les fortes contributions conjointes de Na^+ et Cl^- suggèrent l'importance des processus de dissolution des minéraux halogénés et/ou de l'empreinte d'anciennes circulations dans des formations évaporitiques, tandis que l'association de Ca^{2+} et HCO_3^- renvoie à la dissolution des roches carbonatées. La présence non négligeable de NO_3^- sur F1 suggère enfin que les eaux les plus minéralisées peuvent également être modestement affectées par des apports anthropiques diffus.

L'axe F2, qui représente 22,9% de la variance (Tableau 7), oppose fortement le magnésium (Tableau 8) (corrélation positive marquée) au couple Ca^{2+} - HCO_3^- (corrélations négatives), tout en intégrant positivement Na^+ et Cl^- . Cet axe exprime un contraste entre des eaux à dominance calco-bicarbonatée, typique de la dissolution de formations carbonatées relativement peu évoluées, et des eaux plus magnésiennes et chlorurées, témoignant d'interactions plus poussées avec des terrains dolomitiques ou marneux, voire avec des horizons plus riches en sels dissous. F2 apparaît ainsi comme un axe de différenciation des faciès, traduisant à la fois l'influence de la lithologie encaissante et le degré d'évolution géochimique lié au temps de séjour dans l'aquifère.

L'axe F3, qui augmente la variance expliquée à 16,7 % (Tableau 7), est dominé par des corrélations positives avec K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^- (Tableau 8). Ce triptyque potassique-sulfaté-nitraté est classiquement associé à une influence anthropique, en particulier à l'usage d'engrais et à la lixiviation des sols cultivés, ainsi qu'aux rejets domestiques. Les eaux se projetant nettement dans le sens positif de F3 peuvent donc être interprétées comme des eaux affectées par des

apports récents d'origine superficielle, se superposant à la signature hydro-géo-chimique décrite par F1 et F2.

Les axes F4 et F5, bien que cumulativement non négligeables, n'apportent que des nuances secondaires, en isolant notamment des points fortement nitrates ou au contraire très bicarbonatés, correspondant à des situations locales particulières (zones de recharge préférentielle, captages plus vulnérables, effets d'occupation du sol).

Dans l'ensemble, l'ACP met en évidence que la composition chimique des eaux d'El Onsor résulte d'un contrôle combiné par :

- La minéralisation globale liée aux interactions eau-roche,
- La nature lithologique des formations traversées, conditionnant le passage de faciès calco-bicarbonatés vers des eaux plus magnésiennes et chlorurées,
- L'influence anthropique, matérialisée par l'enrichissement en K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^- dans certains points d'eau. Cette organisation factorielle confirme que les contrastes observés entre les échantillons traduisent à la fois des conditions hydrogéologiques différenciées (temps de séjour, cheminements) et des degrés variables de pression anthropique sur la ressource.

Tab.07 : Valeurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Valeur propre	2,138	1,829	1,334	0,870	0,793	0,741	0,235	0,059
Variabilité (%)	26,728	22,860	16,672	10,879	9,918	9,259	2,941	0,743
% cumulé	26,728	49,587	66,259	77,138	87,056	96,316	99,257	100,000

Tab.08:Corrélations entre les variables et les facteurs

Paramètres	F1	F2	F3	F4	F5
Ca ⁺²	0,631	-0,664	0,291	0,047	-0,159
Mg ⁺²	-0,111	0,806	0,123	0,006	0,263
Na ⁺	0,682	0,458	-0,093	-0,274	0,184
K ⁺	-0,315	0,193	0,753	-0,271	0,146
Cl ⁻	0,719	0,380	-0,469	0,043	-0,067
SO ₄ ⁻²	0,495	0,292	0,476	-0,267	-0,513
HCO ₃ ⁻	0,541	-0,448	0,170	-0,155	0,609
NO ₃ ⁻	0,327	0,249	0,428	0,789	0,071

c) Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) :

L'analyse de classification ascendante hiérarchique (CAH), réalisée à partir des résultats d'analyses chimiques des eaux d'El Onsor, met en évidence une structuration nette des variables en plusieurs groupes cohérents (Tableau n° 09). Le très faible pourcentage de variance intra-classe ($\approx 4,9\%$) pour une variance interclasses de l'ordre de 95% montre que la partition retenue est globalement satisfaisante et que les classes obtenues sont bien différenciées sur le plan chimique (Tableau n° 09).

Les barycentres et objets centraux indiquent d'abord l'existence d'un pôle calcique fortement individualisé, caractérisé par des teneurs élevées en Ca²⁺ et un comportement relativement distinct des autres ions majeurs, ce qui confirme le rôle déterminant de la dissolution des formations carbonatées dans la minéralisation des eaux de la région (Figure 1).

Un second groupe est constitué par Mg²⁺ et K⁺ (Figure 1), qui se retrouvent associés dans une même classe : cette proximité statistique suggère soit une source géochimique commune (dissolution de minéraux ferromagnésiens, dolomies, argiles), soit une contribution conjointe de processus anthropiques (apports d'engrais potassiques dans les sols, remobilisation de Mg et K au sein de la zone non saturée).

Un troisième ensemble regroupe Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et NO₃⁻ (Figure 1), traduisant un faciès plus évolué et une empreinte nettement plus marquée des apports externes : Na⁺ et Cl⁻ témoignent de la salinisation globale et de la possible influence de formations évaporitiques ou de résidus de salinité ancienne, alors que SO₄²⁻ et surtout NO₃⁻ signalent des contributions

d'origine agricole ou domestique, en lien avec l'utilisation d'engrais minéraux et les rejets d'eaux usées.

Enfin, HCO_3^- apparaît comme une variable centrale (Figure 17), isolée dans une classe spécifique, ce qui reflète son rôle pivot dans le contrôle du caractère bicarbonaté des eaux et son lien direct avec les processus de dissolution/carbonatation au sein de l'aquifère.

Globalement, la CAH confirme que l'organisation chimique des eaux d'El Onsor résulte de la superposition de trois tendances principales :

- Une minéralisation de fond dominée par la dissolution des carbonates (pôle Ca-HCO_3^-),
- Un enrichissement en cations alcalins et magnésiens lié à des interactions eau-roche plus avancées (Na^+ , Mg^{2+} , K^+),
- Une composante anthropique clairement portée par le couple $\text{SO}_4^{2-}\text{-NO}_3^-$, qui marque les secteurs les plus impactés par les activités agricoles et l'urbanisation.

Tab.09 : Décomposition de la variance pour la classification optimale.

	Absolu	Pourcentage
Intra-classe	64611,875	4,92%
Inter-classes	1247614,804	95,08%
Total	1312226,679	100,00%

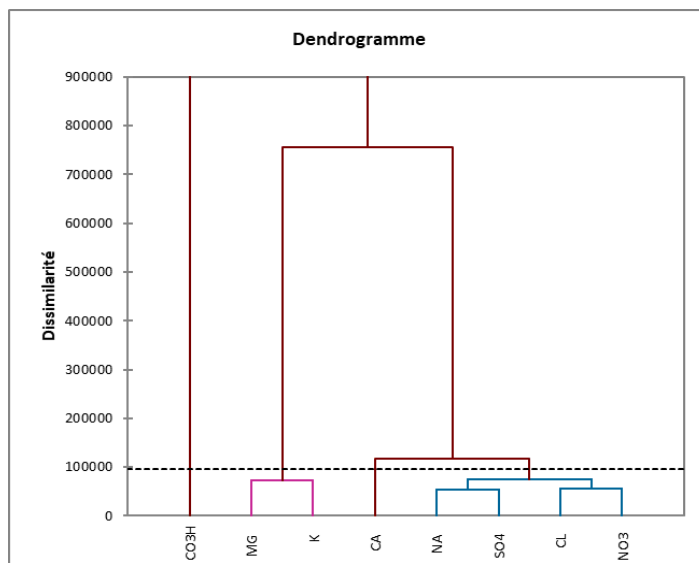


Fig.17 : Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) portées sur les résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs des eaux d'El Onser

Conclusion :

L'analyse hydrogéochimique menée sur les 85 échantillons de la source d'El Onsor, s'étalant sur la période de 2017 à 2024, a permis de dévoiler la qualité des eaux, leur aptitude à l'irrigation et les facteurs qui gouvernent leur minéralisation.

L'évaluation de la potabilité et des paramètres physico-chimiques montre une eau globalement alcaline, avec un pH conforme à la norme algérienne (6,90 à 8,10). Cependant, la conductivité électrique (598 à 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$) s'avère inférieure aussi à la norme algérienne de potabilité (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les concentrations en cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) et en anions (Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-}) respectent généralement les limites de potabilité, les nitrates (NO_3^{-}) révèlent une variabilité majeure (18 à 180 mg/L). La majorité des échantillons dépasse le seuil de 50 mg/L, ce qui met en évidence une contamination anthropique substantielle issue des pratiques agricoles et des rejets d'eaux usées.

Les diagrammes de Schoeller Berkloff et Stabler montrent 3 faciès : bicarbonaté calcique, bicarbonaté magnésien et bicarbonaté sodique, tandis que le diagramme de Piper classe les eaux en deux familles de faciès : Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et Bicarbonatée calcique et magnésienne.

Concernant l'aptitude des eaux destinées à l'irrigation, les différents indices calculés démontrent une bonne qualité globale :

* Le pourcentage en sodium ($\% \text{Na}^+$) révèle que l'ensemble des points d'eau est classé comme « Très bonne » (et « Bonne » pour l'échantillon 78), excluant tout risque d'alcalinisation ou de dégradation de la structure des sols.

* L'indice de Kelly's Ratio (Kr), systématiquement inférieur à 1, confirme que toutes les eaux de la source sont bonnes pour l'agriculture.

La projection sur le diagramme de Riverside concentre la majorité des échantillons dans la classe C3-S1 (qualité admissible), avec l'échantillon 82 en C2 -S1 (qualité bonne).

Sur le diagramme de Wilcox, la quasi-totalité des eaux appartient à la classe « Bonne », le point 82 se distinguant en classe « Excellente ».

L'analyse de l'origine de minéralisation des eaux de la source d'El Onsor appuyée par l'ACP (66,26 % de la variance cumulée sur trois axes) et la CAH (95,08 % de variance interclasses), met en évidence un contrôle combiné de la charge saline. La minéralisation naturelle de fond, stable et homogène, est régie par la dissolution des formations carbonatées de l'aquifère karstique, conférant aux eaux un faciès bicarbonaté calcique. À cette signature hydro-géo-chimique se superpose une hétérogénéité spatio-temporelle anthropique marquée, matérialisée par de fortes anomalies en potassium ($\text{CV} = 166,2 \%$) et en nitrates ($\text{NO}_3^- \text{max} = 180 \text{ mg/L}$), confirmant l'impact direct des infiltrations agricoles et domestiques de surface.

En conclusion, la composition chimique de la source d'El Onsor est le reflet direct de son environnement karstique (faciès bicarbonaté calcique dominant induit par l'interaction eau-roche), sur lequel se superpose une pression anthropique marquée par l'enrichissement en nitrates. Ces résultats soulignent l'importance de surveiller et de protéger cette ressource, face aux impacts de l'agriculture et de l'urbanisation.

CONCLUSION GENERALE.

L'eau subit aujourd'hui des pressions anthropiques et climatiques croissantes, faisant de la gestion et du suivi de sa qualité une priorité stratégique absolue. C'est dans cette optique que s'est inscrit notre travail de fin d'études. Nous l'avons cerné de point de vue géographique, climatologique, géologique, hydrogéologique et hydrogéochimique, afin d'évaluer la qualité des eaux de la source d'El Onsor et de comprendre les mécanismes régissant sa minéralisation, sur une période de sept ans (2017–2024).

Au terme de cette étude, nous avons obtenu les résultats suivants:

❖ **Sur le plan géographique et climatologique :** La source d'El Onsor se trouve entre les localités d'Oujlida et d'Aïn El Houtz qui font partie du groupement urbain de Tlemcen.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 484,9 mm, la moyenne mensuelle des températures est de 18,1 °C. La température moyenne minimale est de 5,7 °C marquée en janvier. Par ailleurs, la moyenne mensuelle des températures maximales est de 34,8°C enregistrée en août.

Le diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen montre une alternance entre deux périodes: humide s'étend du début janvier au début mai, puis de la fin septembre au début d'octobre, et sèche correspondant au reste des mois de l'année.

Les résultats du bilan hydrologique dévoilent une évapotranspiration potentielle estimée à environ 909.85mm/an, dépassant largement l'évapotranspiration réelle, évaluée à 409,55 mm/an. Ce déséquilibre engendre un déficit agricole annuel important, de l'ordre de 500.3 mm. En l'absence d'excédent hydrique significatif, l'écoulement de surface ainsi que l'infiltration restent négligeables.

❖ **Sur le plan géo-structural et hydrogéologique :** Les formations géologiques qui règnent dans la région d'étude sont datées du Jurassique supérieur au Plio-Quaternaire. L'influence tectonique est prépondérante dans l'organisation géologique du secteur étudié. La densité des failles et des diaclases a contribué de manière significative au développement de la karstification et à l'émergence de la source. Les formations calcaires et calcaire-dolomitiques du Jurassique supérieur et du Crétacé constituent les aquifères majeurs présentant un intérêt hydrogéologique dans la zone d'étude. Les formations du Plio-Quaternaire sont également associées comme entités aquifères.

❖ **Sur le plan Hydrogéochimique** : Les analyses physico-chimiques des eaux de la source d'El Onsor (2017 à 2024) menées sur 85 échantillons ont permis de dévoiler les résultats suivants :

*Une eau globalement alcaline, avec un pH conforme à la norme algérienne (6,90 à 8,10). Une conductivité électrique (598 à 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$) inférieure aussi à la norme algérienne de potabilité (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

*Les concentrations en cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et en anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) respectent généralement les limites de potabilité, par contre les nitrates (NO_3^-) révèlent une variabilité majeure (18 à 180 mg/L). La majorité des échantillons dépasse le seuil de 50 mg/L, ce qui met en évidence une contamination anthropique substantielle, issue des pratiques agricoles et des rejets d'eaux usées.

* Les diagrammes de Schoeller Brekaloff et Stabler montrent 3 faciès : bicarbonaté calcique, bicarbonaté magnésien et bicarbonaté sodique, tandis que le diagramme de Piper classe les eaux en deux familles de faciès : Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et Bicarbonatée calcique et magnésienne. Concernant l'aptitude des eaux destinées à l'irrigation, les différents indices calculés démontrent une bonne qualité globale :

* Le pourcentage en sodium (% Na^+) révèle que l'ensemble des points d'eau est classé comme « Très bonne » et « Bonne » pour l'échantillon 78, excluant tout risque d'alcalinisation ou de dégradation de la structure des sols.

* L'indice de Kelly's Ratio (Kr), systématiquement inférieur à 1, confirme que toutes les eaux de la source sont bonnes pour l'irrigation.

*La projection sur le diagramme de Riverside groupe la majorité des échantillons dans la classe C3-S1 (qualité admissible), excepté l'échantillon 82 en C2 -S1 (qualité bonne).

*Sur le diagramme de Wilcox, la quasi-totalité des eaux appartient à la classe « Bonne », le point 82 se distinguant en classe « Excellente ».

Sur le plan de l'origine de la minéralisation : L'application des outils statistiques multivariés, notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), a permis de sectoriser les mécanismes hydro-géo-chimiques. Les résultats démontrent que la chimie des eaux est gouvernée par deux phénomènes majeurs. D'une part, l'interaction naturelle eau-roche (dissolution des carbonates) est intimement liée au temps de séjour de l'eau. D'autre part, une nette pollution exogène et diffuse est mise en

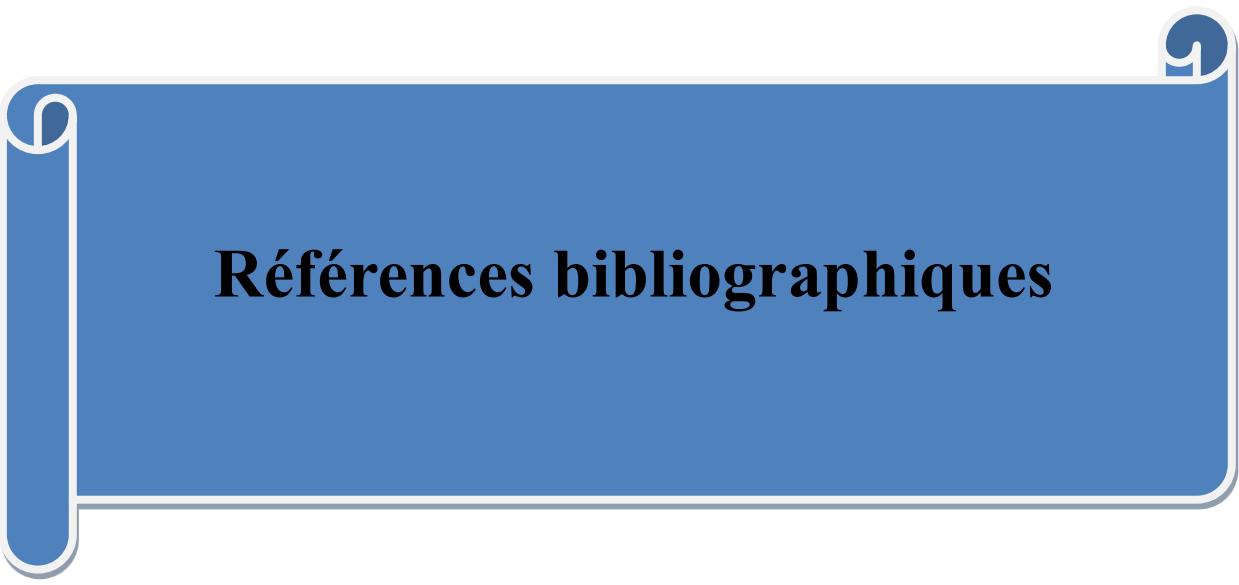
Conclusion générale

évidence. Ce triptyque anthropique (K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^-) est directement lié aux pratiques agricoles ainsi qu'aux rejets domestiques.

Perspectives et Recommandations :

Face à ces constats, et afin de préserver cette ressource hydrique vitale et pérenniser ses usages, nous recommandons les actions suivantes :

- Mettre en place d'urgence des périmètres de protection immédiate et rapprochée autour de la source d'El Onsor pour interdire les rejets directs d'eaux usées.
- Sensibiliser les agriculteurs de la zone d'alimentation à une gestion raisonnée des fertilisants azotés, afin de limiter le lessivage des nitrates vers la nappe.
- Raccorder impérativement les habitations environnantes au réseau d'assainissement (si elles ne sont pas raccordées).



Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- ABDI, H. ; WILLIAMS, L. J. (2010). Principal component analysis. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, vol. 2, p. 433-459.
- ABLAOUI, H. (2013). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des Monts de Tlemcen. Thèse de Doctorat. Université d'Oran, 210 p.
- A.N.R.H. (1996-2025). Données hydro-climatiques de la station de Tlemcen. Rapport interne. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Tlemcen, 45 p.
- AUCLAIR, D. ; BIEHLER, J. (1967). Étude sur les formations du Trias d'Aïn Tallout. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, p. 112-135.
- BAGNOULS, F. ; GAUSSEN, H. (1957). Les climats biologiques et leur classification. Annales de Géographie, vol. 66, n° 355, p. 193-220.
- BENEST, M. (1985). Évolution de la plate-forme de l'avant-pays tellien (Algérie occidentale) du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur. Documents des Laboratoires de Géologie Lyon, n° 95, 365 p.
- BENEST, M. ; OBERT, D. ; DARDEAU, G. (1999). Évolution tectono-sédimentaire de la marge tlemcenienne. Journal of African Earth Sciences, vol. 28, p. 45-62.
- BENSAOULA, F. (2006). Analyse biostratigraphique et structurale des dépôts miocènes de la région de Tlemcen. Thèse de Magister. Université de Tlemcen, 148 p.
- BENZINA, M. (2012). Caractérisation hydrogéologique et vulnérabilité à la pollution des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 185 p.
- CLAIR, A. ; CONCARET, J. (1973). Introduction à la description stratigraphique et structurale de la bordure nord des Monts de Tlemcen. Géologie Méditerranéenne, tome I, p. 45-58.
- COLLIGNON, B. ; BENSAOULA, F. (1994). Étude des formations du Miocène inférieur et moyen dans le bassin de Tlemcen. Journal des Sciences de la Terre, vol. 12, p. 75-89.
- DE MARTONNE, E. (1923). Nouvelle carte de l'indice d'aridité et des régions privées d'écoulement vers la mer. Annales de Géographie, p. 449-458.

DOUMERGUE, F. (1910). Nomenclatures et cartes géologiques de la région de Tlemcen. Bulletin de la Société de Géographie et d'Archéologie d'Oran, tome 30, p. 105-142.

DOUMERGUE, F. (1922). Description de la feuille géologique de Tlemcen au 1/50000. Service de la Carte Géologique de l'Algérie, 85 p.

ELMI, S. (1970). Schéma structural des Monts de Tlemcen (Algérie occidentale). Compte Rendu Sommaire des Séances de la Société Géologique de France, n° 6, p. 206-208.

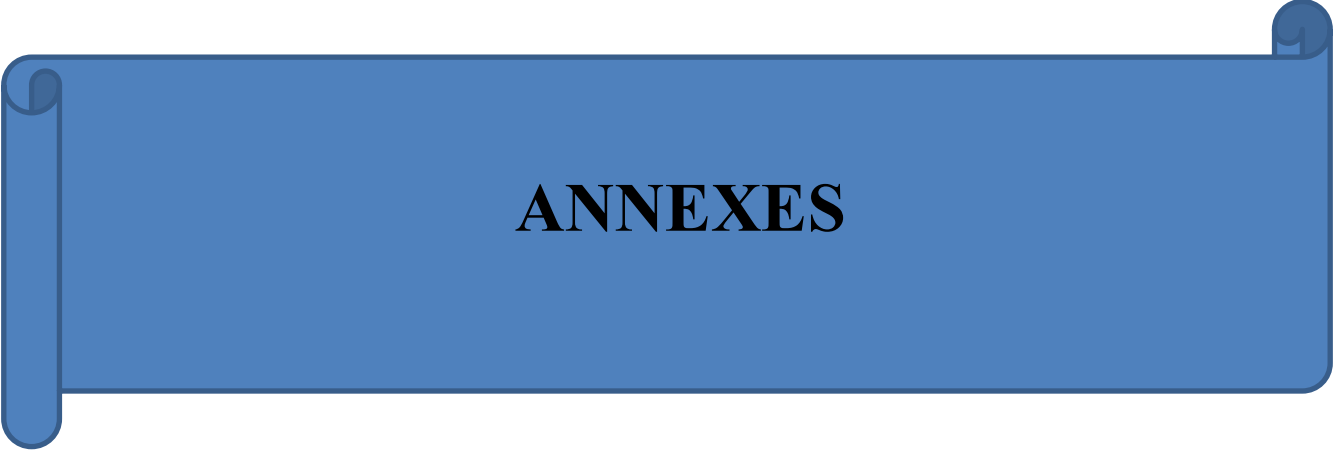
GRANATO, G. ; MOORE, B. ; SMITH, T. (2018). Statistical evaluation of groundwater quality parameters using multivariate analysis. Environmental Earth Sciences, vol. 77, n° 14, p. 512-527.

HAYANE, S. M. (1983). Contribution à l'étude hydrogéologique des aquifères de la région de Tlemcen. Thèse de Magister. Université d'Oran , 145 p.

O.N.S. (2008). Recensement Général de la Population et de l'Habitat. Rapport interne. Office National des Statistiques, Alger, 35 p.

RODIER, J. ; LEGUBE, B. ; MERLET, N. (2009). L'analyse de l'eau. 9e éd. Paris : Dunod, 1526 p.

VERDEIL, P. (1988). Le déficit d'écoulement en Algérie du Nord. Bulletin des Sciences Hydrologiques, vol. 33, n° 2, p. 121-136.



ANNEXES

Tableau 01 : Les résultats de la balance ionique.

Numéros des échantillons	BI (%)	Etat
1	4.25	Acceptable
2	0.80	Bonne
3	3.16	Acceptable
4	2.70	Acceptable
5	2.96	Acceptable
6	1.68	Bonne
7	3.60	Acceptable
8	3.42	Acceptable
9	0.02	Bonne
10	1.71	Bonne
11	0.43	Bonne
12	2.26	Acceptable
13	0.81	Bonne
14	0.31	Bonne
15	3.13	Acceptable
16	1.26	Bonne
17	1.10	Bonne
18	0.49	Bonne
19	0.63	Bonne
20	1.17	Bonne
21	0.01	Bonne
22	1.42	Bonne
23	1.56	Bonne
24	3.19	Acceptable
25	1.63	Bonne
26	0.58	Bonne
27	0.52	Bonne
28	4.07	Acceptable
29	2.07	Acceptable

30	0.37	Bonne
31	2.09	Bonne
32	0.10	Bonne
33	0.65	Bonne
34	0.47	Bonne
35	2.99	Acceptable
36	4.35	Acceptable
37	1.81	Bonne
38	0.89	Bonne
39	2.60	Acceptable
40	0.26	Bonne
41	0.58	Bonne
42	3.51	Acceptable
43	2.07	Bonne
44	2.88	Acceptable
45	1.27	Bonne
46	2.65	Acceptable
47	1.60	Bonne
48	4.31	Acceptable
49	2.97	Acceptable
50	2.27	Acceptable
51	1.25	Bonne
52	3.08	Acceptable
53	3.17	Acceptable
54	0.42	Bonne
55	3.38	Acceptable
56	1.98	Bonne
57	0.24	Bonne
58	3.07	Acceptable
59	2.59	Acceptable
60	1.62	Bonne
61	2.14	Acceptable
62	1.37	Bonne

63	0.97	Bonne
64	3.23	Acceptable
65	3.73	Acceptable
66	3.54	Acceptable
67	1.90	Bonne
68	1.63	Bonne
69	0.86	Bonne
70	1.66	Bonne
71	2.38	Acceptable
72	2.15	Acceptable
73	0.94	Bonne
74	0.65	Bonne
75	1.46	Bonne
76	0.91	Bonne
77	0.33	Bonne
78	4.09	Acceptable
79	0.14	Bonne
80	0.95	Bonne
81	1.12	Bonne
82	2.44	Acceptable
83	1.06	Bonne
84	2.44	Acceptable
85	1.05	Bonne

Tableau n°2 : Conductivités des eaux étudiées et classification de la minéralisation.

Numéros des échantillons	Conductivité (µS/cm)	Minéralisation
1	1260	Elevée
2	1220	Elevée
3	1240	Elevée
4	983	Importante
5	1070	Elevée
6	1030	Elevée
7	1050	Elevée
8	1070	Elevée
9	1100	Elevée
10	1020	Elevée
11	1080	Elevée
12	1060	Elevée
13	1090	Elevée
14	944	Importante
15	1050	Elevée
16	1260	Elevée
17	1240	Elevée
18	999	Importante
19	1200	Elevée
20	983	Importante
21	944	Importante
22	1120	Elevée
23	1390	Elevée
24	1430	Elevée
25	1020	Elevée
26	1120	Elevée
27	1100	Elevée
28	1260	Elevée
29	1430	Elevée
30	1230	Elevée
31	1290	Elevée

32	1270	Elevée
33	1250	Elevée
34	1420	Elevée
35	1222	Elevée
36	1147	Elevée
37	1070	Elevée
38	1250	Elevée
39	979	Importante
40	1197	Elevée
41	1298	Elevée
42	1169	Elevée
43	1072	Elevée
44	1138	Elevée
45	1142	Elevée
46	1205	Elevée
47	1203	Elevée
48	1200	Elevée
49	1098	Elevée
50	1130	Elevée
51	1260	Elevée
52	955	Importante
53	937	Importante
54	1233	Elevée
55	1145	Elevée
56	931	Importante
57	1074	Elevée
58	1214	Elevée
59	1095	Elevée
60	1135	Elevée
61	1172	Elevée
62	1162	Elevée
63	1190	Elevée
64	1206	Elevée

65	1219	Elevée
66	1230	Elevée
67	1020	Elevée
68	971	Importante
69	1260	Elevée
70	1275	Elevée
71	1088	Elevée
72	1195	Elevée
73	1046	Elevée
74	1014	Elevée
75	1215	Elevée
76	1250	Elevée
77	1260	Elevée
78	1263	Elevée
79	1308	Elevée
80	1269	Elevée
81	1212	Elevée
82	598	Moyenne à accentuée
83	1155	Elevée
84	1064	Elevée
85	940	Importante

Tableau n° 3 : Détermination de la minéralisation des eaux.

Numéros des échantillons	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/L)
1	1260	955.76
2	1220	849.56
3	1240	940.59
4	983	745.64
5	1070	811.64
6	1030	781.30
7	1050	796.47
8	1070	811.64
9	1100	834.39
10	1020	773.71
11	1080	819.22
12	1060	804.05
13	1090	826.81
14	944	716.06
15	1050	796.47
16	1260	955.76
17	1240	940.59
18	999	757.78
19	1200	910.25
20	983	745.64
21	944	716.06
22	1120	849.56
23	1390	1054.37
24	1430	1084.71
25	1020	773.71
26	1120	849.56
27	1100	834.39
28	1260	955.76
29	1430	1084.71

30	1230	933.00
31	1290	978.52
32	1270	963.35
33	1250	948.18
34	1420	1077.13
35	1222	926.94
36	1147	870.04
37	1070	811.64
38	1250	948.18
39	979	742.61
40	1197	907.97
41	1298	984.59
42	1169	886.73
43	1072	813.15
44	1138	863.22
45	1142	866.25
46	1205	914.04
47	1203	912.52
48	1200	910.25
49	1098	832.88
50	1130	857.15
51	1260	955.76
52	955	724.40
53	937	710.75
54	1233	935.28
55	1145	868.53
56	931	706.20
57	1074	814.67
58	1214	920.87
59	1095	830.60
60	1135	860.94
61	1172	964.86
62	1162	881.42

63	1190	902.66
64	1206	914.80
65	1219	924.66
66	1230	933.00
67	1020	773.71
68	971	736.54
69	1260	955.76
70	1275	967.14
71	1088	825.29
72	1195	906.46
73	1046	793.43
74	1014	769.16
75	1215	921.63
76	1250	948.18
77	1260	955.76
78	1263	958.04
79	1308	992.17
80	1269	962.59
81	1212	919.35
82	598	428.12
83	1155	876.11
84	1064	807.09
85	940	713.03

Tableau n°4 : Les types de faciès selon Schoeller-Berkaloff.

Numéros des échantillons	Type de faciès
1	Bicarbonaté magnésien
2	Bicarbonaté-calcique
3	Bicarbonaté-calcique
4	Bicarbonaté-calcique
5	Bicarbonaté-calcique
6	Bicarbonaté-calcique
7	Bicarbonaté-calcique
8	Bicarbonaté-calcique
9	Bicarbonaté-calcique
10	Bicarbonaté-calcique
11	Bicarbonaté-calcique
12	Bicarbonaté-calcique
13	Bicarbonaté-calcique
14	Bicarbonaté-calcique
15	Bicarbonaté-calcique
16	Bicarbonaté-calcique
17	Bicarbonaté-calcique
18	Bicarbonaté-calcique
19	Bicarbonaté-calcique
20	Bicarbonaté-calcique
21	Bicarbonaté-calcique
22	Bicarbonaté-calcique
23	Bicarbonaté-calcique
24	Bicarbonaté-calcique
25	Bicarbonaté-calcique
26	Bicarbonaté-calcique
27	Bicarbonaté-sodique
28	Bicarbonaté-calcique

29	Bicarbonaté-calciq
30	Bicarbonaté-calciq
31	Bicarbonaté-calciq
32	Bicarbonaté-calciq
33	Bicarbonaté-calciq
34	Bicarbonaté-calciq
35	Bicarbonaté magnésien
36	Bicarbonatécalciq
37	Bicarbonatécalciq
38	Bicarbonatécalciq
39	Bicarbonaté sodique
40	Bicarbonatécalciq
41	Bicarbonatécalciq
42	Bicarbonatécalciq
43	Bicarbonatécalciq
44	Bicarbonatécalciq
45	Bicarbonatécalciq
46	Bicarbonatécalciq
47	Bicarbonatécalciq
48	Bicarbonaté magnésien
49	Bicarbonaté sodique
50	Bicarbonaté magnésien
51	Bicarbonatécalciq
52	Bicarbonaté calciq
53	Bicarbonaté sodique
54	Bicarbonatécalciq
55	Bicarbonatécalciq
56	Bicarbonaté magnésien
57	Bicarbonaté sodique
58	Bicarbonaté magnésien
59	Bicarbonatécalciq
60	Bicarbonatécalciq
61	Bicarbonatécalciq

62	Bicarbonatécalcique
63	Bicarbonatécalcique
64	Bicarbonatécalcique
65	Bicarbonatécalcique
66	Bicarbonatécalcique
67	Bicarbonaté sodique
68	Bicarbonaté magnésien
69	Bicarbonatécalcique
70	Bicarbonaté calcique
71	Bicarbonatécalcique
72	Bicarbonatécalcique
73	Bicarbonatécalcique
74	Bicarbonatécalcique
75	Bicarbonaté magnésien
76	Bicarbonaté magnésien
77	Bicarbonatécalcique
78	Bicarbonaté sodique
79	Bicarbonatécalcique
80	Bicarbonatécalcique
81	Bicarbonatécalcique
82	Bicarbonaté magnésien
83	Bicarbonaté magnésien
84	Bicarbonatécalcique
85	Bicarbonaté sodique

Tableau n°5 : Types de faciès selon Stabler.

Numéros des échantillons	Types de faciès
1	Bicarbonaté magnésien
2	Bicarbonaté calcique
3	Bicarbonaté calcique
4	Bicarbonaté calcique
5	Bicarbonaté calcique
6	Bicarbonaté calcique
7	Bicarbonaté calcique
8	Bicarbonaté calcique
9	Bicarbonaté calcique
10	Bicarbonaté calcique
11	Bicarbonaté calcique
12	Bicarbonaté calcique
13	Bicarbonaté calcique
14	Bicarbonaté calcique
15	Bicarbonaté calcique
16	Bicarbonaté calcique
17	Bicarbonaté calcique
18	Bicarbonaté calcique
19	Bicarbonaté calcique
20	Bicarbonaté calcique
21	Bicarbonaté calcique
22	Bicarbonaté calcique
23	Bicarbonaté calcique
24	Bicarbonaté calcique
25	Bicarbonaté calcique
26	Bicarbonaté calcique
27	Bicarbonaté sodique
28	Bicarbonaté calcique
29	Bicarbonaté calcique
30	Bicarbonaté calcique

31	Bicarbonaté calcique
32	Bicarbonaté calcique
33	Bicarbonaté calcique
34	Bicarbonaté calcique
35	Bicarbonaté magnésien
36	Bicarbonaté calcique
37	Bicarbonaté calcique
38	Bicarbonaté calcique
39	Bicarbonaté sodique
40	Bicarbonaté calcique
41	Bicarbonaté calcique
42	Bicarbonaté calcique
43	Bicarbonaté calcique
44	Bicarbonaté calcique
45	Bicarbonaté calcique
46	Bicarbonaté calcique
47	Bicarbonaté calcique
48	Bicarbonaté magnésien
49	Bicarbonaté sodique
50	Bicarbonaté magnésien
51	Bicarbonaté calcique
52	Bicarbonaté calcique
53	Bicarbonaté sodique
54	Bicarbonaté calcique
55	Bicarbonaté calcique
56	Bicarbonaté magnésien
57	Bicarbonaté sodique
58	Bicarbonaté magnésien
59	Bicarbonaté calcique
60	Bicarbonaté calcique
61	Bicarbonaté calcique
62	Bicarbonaté calcique
63	Bicarbonaté calcique

64	Bicarbonaté calcique
65	Bicarbonaté calcique
66	Bicarbonaté calcique
67	Bicarbonaté sodique
68	Bicarbonaté magnésien
69	Bicarbonaté calcique
70	Bicarbonaté calcique
71	Bicarbonaté calcique
72	Bicarbonaté calcique
73	Bicarbonaté calcique
74	Bicarbonaté calcique
75	Bicarbonaté magnésien
76	Bicarbonaté magnésien
77	Bicarbonaté calcique
78	Bicarbonaté sodique
79	Bicarbonaté calcique--
80	Bicarbonaté calcique
81	Bicarbonaté calcique
82	Bicarbonaté magnésien
83	Bicarbonaté magnésien
84	Bicarbonaté calcique
85	Bicarbonaté sodique

Tableau n°6:Classification des eaux d'irrigation, D'après servant 19755
(U.SSALINITY LAB)

Degré	Qualité	Classe	Description
1	Excellente	C1-S2	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 sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensible 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 sels, 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 perméable, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

Tableau n°7 : Pourcentages en Sodium des échantillons d'eau étudiés.

Numéros des échantillons	%Na⁺	Classe	Numéros des échantillons	%Na⁺	Classe
1	15.48	Très bonne	44	15.98	Très bonne
2	17.21	Très bonne	45	16.34	Très bonne
3	16.15	Très bonne	46	15.88	Très bonne
4	18.34	Très bonne	47	17.45	Très bonne
5	16.02	Très bonne	48	16.92	Très bonne
6	17.45	Très bonne	49	15.55	Très bonne
7	15.67	Très bonne	50	16.23	Très bonne
8	16.22	Très bonne	51	17.01	Très bonne
9	15.89	Très bonne	52	15.78	Très bonne
10	17.05	Très bonne	53	16.44	Très bonne
11	16.44	Très bonne	54	15.22	Très bonne
12	15.32	Très bonne	55	15.17	Très bonne
13	16.18	Très bonne	56	16.08	Très bonne
14	17.54	Très bonne	57	15.88	Très bonne
15	15.98	Très bonne	58	16.56	Très bonne
16	16.77	Très bonne	59	15.45	Très bonne
17	15.44	Très bonne	60	17.32	Très bonne
18	16.89	Très bonne	61	16.11	Très bonne
19	17.12	Très bonne	62	15.67	Très bonne
20	15.23	Très bonne	63	16.95	Très bonne
21	16.45	Très bonne	64	17.08	Très bonne
22	15.77	Très bonne	65	15.44	Très bonne
23	15.22	Très bonne	66	16.23	Très bonne
24	16.21	Très bonne	67	15.11	Très bonne
25	15.90	Très bonne	68	16.05	Très bonne
26	16.04	Très bonne	69	17.28	Très bonne
27	15.45	Très bonne	70	16.45	Très bonne
28	14.89	Très bonne	71	15.89	Très bonne
29	15.12	Très bonne	72	16.12	Très bonne

30	16.33	Très bonne	73	15.34	Très bonne
31	17.11	Très bonne	74	16.48	Très bonne
32	15.56	Très bonne	75	15.95	Très bonne
33	16.72	Très bonne	76	16.21	Très bonne
34	14.95	Très bonne	77	17.05	Très bonne
35	16.25	Très bonne	78	15.55	Bonne
36	17.02	Très bonne	79	16.44	Très bonne
37	15.67	Très bonne	80	15.92	Très bonne
38	16.38	Très bonne	81	16.18	Très bonne
39	15.11	Très bonne	82	17.21	Très bonne
40	16.55	Très bonne	83	15.88	Très bonne
41	15.82	Très bonne	84	16.02	Très bonne
42	16.04	Très bonne	85	15.45	Très bonne
43	17.23	Très bonne			

Tableau.8 : Valeurs du Kr des échantillons étudiés.

Numéros des échantillons	Kr	Qualité de l'eau	Numéros des échantillons	Kr	Qualité de l'eau
1	0.23	Bonne	43	0.09	Bonne
2	0.45	Bonne	44	0.71	Bonne
3	0.32	Bonne	45	0.17	Bonne
4	0.27	Bonne	46	0.39	Bonne
5	0.15	Bonne	47	0.28	Bonne
6	0.26	Bonne	48	0.31	Bonne
7	0.1	Bonne	49	0.29	Bonne
8	0.35	Bonne	50	0.12	Bonne
9	0.24	Bonne	51	0.44	Bonne
10	0.34	Bonne	52	0.34	Bonne
11	0.12	Bonne	53	0.44	Bonne
12	0.5	Bonne	54	0.46	Bonne
13	0.33	Bonne	55	0.25	Bonne

14	0.2	Bonne	56	0.35	Bonne
15	0.26	Bonne	57	0.13	Bonne
16	0.21	Bonne	58	0.18	Bonne
17	0.17	Bonne	59	0.12	Bonne
18	0.3	Bonne	60	0.23	Bonne
19	0.24	Bonne	61	0.27	Bonne
20	0.18	Bonne	62	0.18	Bonne
21	0.46	Bonne	63	0.36	Bonne
22	0.14	Bonne	64	0.31	Bonne
23	0.15	Bonne	65	0.27	Bonne
24	0.25	Bonne	66	0.21	Bonne
25	0.38	Bonne	67	0.21	Bonne
26	0.45	Bonne	68	0.65	Bonne
27	0.19	Bonne	69	0.12	Bonne
28	0.19	Bonne	70	0.37	Bonne
29	0.22	Bonne	71	0.34	Bonne
30	0.1	Bonne	72	0.13	Bonne
31	0.23	Bonne	73	0.08	Bonne
32	0.16	Bonne	74	0.48	Bonne
33	0.2	Bonne	75	0.37	Bonne
34	0.29	Bonne	76	0.31	Bonne
35	0.39	Bonne	77	0.34	Bonne
36	0.38	Bonne	78	0.1	Bonne
37	0.19	Bonne	79	0.18	Bonne
38	0.14	Bonne	80	0.16	Bonne
39	0.62	Bonne	81	0.35	Bonne
40	0.37	Bonne	82	0.37	Bonne
41	0.15	Bonne	83	0.22	Bonne
42	0.21	Bonne	84	0.2	Bonne
			85	0.23	Bonne

ملخص:

المساهمة في الدراسة الهيدروجيوكيميائية لمنع عين العنصر، ولاية تلمسان (شمال غرب الجزائر)
يهدف هذا العمل إلى تحديد أصل التمدن وتقييم جودة مياه منبع "عين العنصر" من خلال المتابعة الفيزيوكيميائية شملت الفترة الممتدة بين 2017 و2024 (85 عينة).
تُظهر نتائج تفسير التحاليل الفيزيوكيميائية أن مياه المنبع تتميز بـ pH قاعدي عموماً (6.90 إلى 8.10) وهي مطابقة لمعايير صلاحية الشرب. تشير الموصلية الكهربائية (598 إلى 1430 ميكروسيمنز/سم) إلى أنها أدنى من الحد المسموح به في المعايير الجزائرية. كما أن جميع العناصر الكيميائية (الكاتيونات والأنيونات) تتوافق مع معايير الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية (JORA)، باستثناء محتويات النترات (NO_3^-) التي تسجل تبايناً حرجاً (18 إلى 180 ملغ/لتر) متجاوزة في معظم العينات المدروسة الحد المسموح به والمقدر بـ 50 ملغ/لتر، مما يبرز بوضوح تأثيراً بشرياً رئيسياً.
تُبين مخططات "شولر بيركالوف" و"ستابلر" سيادة ثلاثة سحنات: بيكربونات الكالسيوم، بيكربونات المغنيسيوم، وبيكربونات الصوديوم. في حين يُصنف مخطط "بايبر" هذه المياه إلى عائلتين من السحنات: كلورية وكبريتات كالسيوم ومغنيسيوم، وبيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم.
من جهة أخرى، توضح النسب المئوية لنسبة الصوديوم ومؤشر "Kelly's Ratio" أن مياه منبع عين العنصر ممتازة إلى جيدة للاستخدام في الري. ويصنف مخطط "ويلكوكس" المياه في الفئة الجيدة، بينما يشير مخطط "ريفرسايد" إلى أن المياه مقبولة للري (C3-S1).
أخيراً، كشف تطبيق الأساليب الإحصائية متعددة المتغيرات (ACP) و (CAH) أن كيمياء المياه تتحكم فيها بشكل أساسي ظاهرتان: التفاعل الطبيعي بين الماء والصخر (إذابة التكوينات الكربونية للمكمن الكارستي المرتبط بزمز المكوث)، وتلوث خارجي منتشر. هذا التلوث، المتميز بالتلوث البشري المنشأ البوتاسيوم و النترات و الكبريتات، يرتبط مباشرة بالممارسات الفلاحية ومياه الصرف الصحي المنزلية.
الكلمات المفتاحية: عين العنصر، تلمسان، مكمن كارستي، المعايير الفيزيوكيميائية، النترات، المخططات، التمدن، Xlstat، ACP، CAH

RESUME

CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOCHIMIQUE DE LA SOURCE D'EL ONSOR, WILAYA DE TLEMCEN, NORD-OUEST ALGERIEN.

Le but de ce travail est de déterminer l'origine de la minéralisation et d'évaluer la qualité des eaux de la source El Onsor à travers un suivi physico-chimique étalé sur la période 2017–2024 (85 échantillons).

D'après les interprétations des analyses physico-chimiques, les eaux de la source présentent un pH globalement alcalin (6,90 à 8,10) et conforme à la norme de potabilité. La conductivité électrique (598 à 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est au-dessous de la norme algérienne prescrite. Tous les paramètres chimiques (cations et anions) sont au-dessous des normes du JORA, excepté les teneurs en nitrates (NO_3^-) qui affichent une variabilité critique (18 à 180 mg/L) dépassant souvent le seuil admissible de 50 mg/L dans la majorité des échantillons étudiés, ce qui met en évidence un impact anthropique majeur.

Les diagrammes de Schoeller Berkaloff et Stabler montrent 3 faciès : bicarbonaté calcique, bicarbonaté magnésien et bicarbonaté sodique, tandis que le diagramme de Piper classe les eaux en deux familles de faciès : Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne et Bicarbonaté calcique et magnésienne.

Les pourcentages en $\% \text{Na}^+$ et l'indice de Kelly's Ratio montrent que les eaux de la source d'El Onsor sont très bonnes à bonnes pour l'usage en irrigation. Le diagramme de Wilcox classe les eaux dans la catégorie bonne tandis que celui de Riverside indique une eau admissible pour l'irrigation (C3-S1).

L'application des méthodes statistiques multivariées (ACP et CAH) révèle que la chimie des eaux est principalement régulée par deux phénomènes : l'interaction naturelle eau-roche (dissolution des formations carbonatées de l'aquifère karstique liée au temps de séjour) et une pollution exogène diffuse. Cette pollution, caractérisée par le triptyque anthropique K^+ , SO_4^{2-} et NO_3^- , est directement associée aux pratiques agricoles et aux rejets domestiques.

Mots clés : Aïn El Onsor, Tlemcen, aquifère karstique, paramètres physico-chimiques, nitrates, Diagrammes, minéralisation, Xlstat, ACP, CAH.

ABSTRACT.

CONTRIBUTION TO THE HYDROGEOCHEMICAL STUDY OF THE EL ONSOR SPRING, TLEMCEN WILAYA (NORTH-WESTERN ALGERIA).

The aim of this work is to determine the origin of mineralization and to assess the quality of the waters of the El Onsor spring through physicochemical monitoring carried out over the period 2017–2024 (85 samples).

Based on the interpretation of physicochemical analyses, the spring waters show a globally alkaline pH (6.90 to 8.10) and comply with drinking water standards. The electrical conductivity (598 to 1430 $\mu\text{S}/\text{cm}$) is below the prescribed Algerian standard. All chemical parameters (cations and anions) are below the JORA standards, except for nitrate (NO_3^-) contents, which display a critical variability (18 to 180 mg/L), frequently exceeding the admissible threshold of 50 mg/L in the majority of the studied samples, highlighting a major anthropogenic impact.

The Schoeller-Berkaloff and Stabler diagrams show 3 facies: calcium bicarbonate, magnesium bicarbonate, and sodium bicarbonate, while the Piper diagram classifies the waters into two facies families: chloride and sulfate calcium and magnesium, and calcium and magnesium bicarbonate.

The percentages of $\% \text{Na}^+$ and Kelly's Ratio show that the waters of the El Onsor spring are very good to good for irrigation use. The Wilcox diagram classifies the waters in the "good" category, while the Riverside diagram indicates acceptable water for irrigation (C3-S1).

The application of multivariate statistical methods (PCA and HCA) reveals that water chemistry is mainly regulated by two phenomena: natural water-rock interaction (dissolution of carbonate formations of the karst aquifer related to residence time) and diffuse exogenous pollution. This pollution, characterized by the anthropogenic triptych K^+ , SO_4^{2-} , and NO_3^- , is directly associated with agricultural practices and domestic wastewater.

Keywords: Ain El Onsor, Tlemcen, karst aquifer, physicochemical parameters, nitrates, Diagrams, mineralization, Xlstat, PCA, HCA.