



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة زيان عاشور-الجلفة

Université Ziane Achour –Djelfa

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم علوم الفلاحيية و البيطرية

Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Mémoire de fin d'étude

En Vue De l'Obtention Du Diplôme De Master

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Eau et Environnement

Thème :

Caractérisation hydrochimique et évaluation de la potabilité des eaux souterraines à l'aide de différents indices de qualité de l'eau (cas de la région de Djelfa)

Présenté par : HADJI Oum Keltoum

DEVANT LE JURY :

| | | |
|-----------------------------------|-----------|----------------------|
| Président : M. ELAHCENE Omar | Pr | Université de Djelfa |
| Promoteur : M. BOUTELDJAOUI Fatah | MCA | Université de Djelfa |
| Co-promoteur : M. HEBCHI Samir | Ingenieur | ADE de Djelfa |
| Examineur : M. FOUFOU Atif | MCA | Université de Djelfa |
| Examineur : M. BOULEKNAFET Zoheir | MCA | Université de Djelfa |

Année Universitaire 2025/2026

DÉDICACES

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents,
pour leur amour inconditionnel et leur soutien constant,*

*À mes frères et sœurs,
pour leur présence et leur encouragement,*

*Et à toute ma famille,
avec amour et profonde reconnaissance.*

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord exprimer ma plus profonde reconnaissance à mon promoteur : **Dr BOUTELLOUJI Fatah** pour son encadrement, ses conseils et encouragements. Je vous remercie pour votre disponibilité et pour tous les efforts fournis pour mener à son terme ce mémoire.

Je voudrais, adresser mes vifs remerciements aux membres de jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail. Je leur suis reconnaissant pour leurs remarques constructives, leurs suggestions pertinentes et leurs recommandations, sur ce manuscrit.

Je souhaite aussi présenter mes remerciements aux enseignants qui ont contribué à ma formation. Je vous en suis très reconnaissant.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à ce travail.

Résumé

La présente étude combine des outils hydrogéochimiques, statistiques (**ACP** et **CHA**) et les indices de la qualité de l'eau (**WQI**), en vue d'une afin caractérisation qualitative des eaux souterraines dans la zone d'étude Oued Seddeur. L'étude hydrochimique a montré que l'abondance relative des principaux cations dans les eaux souterraines de la zone d'étude : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ pour les cations ; alors que pour les anions, elle est $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. Le diagramme de Piper révèle la présence de deux faciès chimiques : **Ca-Mg-Cl-SO₄** (86, 66%) et **(Ca-Mg-HCO₃)** (13, 33%). Le calcul des indices de saturation (**IS**) des minéraux a montré que Tous les échantillons sont sous-saturés vis-à-vis des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite et halite) et carbonatés (calcite, aragonite et dolomite). En outre, le processus d'échange ionique direct contribue à la minéralisation des souterraines de Oued Seddeur. La comparaison des résultats des analyses physico-chimiques des eaux avec les normes de l'**OMS** et de l'Algérie a montré que la qualité de l'eau des forages respecte ces normes. Les valeurs de l'indice de la qualité de l'eau (**WQI**) pour les forages montrent que la plupart présentent une eau d'excellente qualité selon les normes de l'**OMS** et de l'Algérie. L'indice **WAWQI** révèle qu'environ 73,33% des échantillons sont classés comme excellente ou bonne selon ces normes. L'analyse en composantes principales (**ACP**) a permis d'identifier quatre facteurs pouvant influencer la minéralisation des eaux souterraines. Ce facteur reflète le processus de dissolution des minéraux évaporitiques, l'impact de l'utilisation des engrais chimiques en agriculture, la dissolution des minéraux carbonatés et les rejets d'eaux usées urbaines. L'**ACP** a également permis de classer les échantillons en trois groupes selon leur minéralisation, et la classification ascendante hiérarchique (**CAH**) a regroupé les forages ayant des caractéristiques hydrochimiques similaires, suggérant ainsi des origines communes. Cette approche statistique a confirmé les résultats de l'étude hydrogéochimique, soulignant l'importance des processus de dissolution.

Mots clés : Eaux souterraines, Hydrochimie; Eau potable, indice de la qualité de l'eau (WQI); Statistique multivarié, Oued Seddeur

Abstract

This study combines hydrogeochemical and statistical approaches (**PCA** and **HCA**) with water quality indices (**WQI**) to assess the quality of groundwater in the Oued Seddeur study area. The hydrochemical analysis demonstrated that the relative abundance of the major cations in the groundwater of the study area is: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ for cations; while for anions, it is $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. The Piper diagram reveals the presence of two hydrochemical facies: **Ca-Mg-Cl-SO₄** (86.66%) and **Ca-Mg-HCO₃** (13.33%).

Calculation of the saturation indices (**SI**) of the minerals indicated that all samples are undersaturated with respect to evaporite minerals (gypsum, anhydrite, and halite) and carbonate minerals (calcite, aragonite, and dolomite). In addition, the direct ion exchange process also contributes to the mineralization of the Oued Seddeur groundwater. A comparison of the results of the physicochemical water analyses with **WHO** and Algerian standards showed that the water quality of the boreholes complies with these standards. The Water Quality Index (**WQI**) values for the boreholes show that most have excellent water quality according to **WHO** and Algerian standards. The **WAWQI** index reveals that approximately 73.33% of the samples are classified as excellent or good according to these standards.

Principal component analysis (**PCA**) revealed four factors that influence groundwater mineralization. These factors reflect the dissolution of evaporitic minerals, the impact of chemical fertilizer use in agriculture, the dissolution of carbonate minerals, and urban wastewater discharges. **PCA** also classified the samples into three groups based on their mineralization, and hierarchical cluster analysis (**HCA**) grouped wells with similar hydrochemical characteristics, indicating common origins. This statistical approach supported the results of the hydrogeochemical study, highlighting the importance of dissolution processes.

Keywords: Groundwater, Hydrochemistry; Drinking water, Water Quality Index (**WQI**); Multivariate statistics, Oued Seddeur

ملخص

تجمع هذه الدراسة بين الأدوات الهيدروكيميائية والإحصائية (ACP و CHA) ومؤشرات جودة المياه (WQI)، بهدف التوصيف النوعي للمياه الجوفية في منطقة الدراسة وادي سدر. أظهرت الدراسة الهيدروكيميائية أن الوفرة النسبية للأيونات الرئيسية في المياه الجوفية في منطقة الدراسة هي $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+} > K^{+}$: بالنسبة للأيونات الموجبة؛ بينما بالنسبة للأيونات السالبة، فهي $HCO_3^{-} > SO_4^{2-} > Cl^{-} > NO_3^{-}$. يكشف مخطط بايير عن وجود نوعين من الوجوه الكيميائية: (86.66%) $Ca-Mg-Cl-SO_4$ و (13.33%) $(Ca-Mg-HCO_3)$ أظهر حساب مؤشرات التشبع (IS) للمعادن أن جميع العينات تحت التشبع بالنسبة للمعادن المتبخرة (الجبس، الأنهيدريت والملح) والكربوناتية (الكالسيوم، الأراجونيت والدولوميت). (علاوة على ذلك، يساهم عملية التبادل الأيوني المباشر في التمعدين الجوفي لوادي سدر. مقارنة نتائج التحليل الفيزيائية والكيميائية للمياه مع معايير منظمة الصحة العالمية ومعايير الجزائر أظهرت أن جودة مياه الآبار تتوافق مع هذه المعايير. قيم مؤشر جودة المياه (WQI) للآبار تظهر أن معظمها تحتوي على مياه ذات جودة ممتازة وفقاً لمعايير منظمة الصحة العالمية والجزائر. يكشف مؤشر WAWQI أن حوالي 73.33% من العينات مصنفة على أنها ممتازة أو جيدة وفقاً لهذه المعايير

سمحت تحليل المكونات الرئيسية (ACP) بتحديد أربعة عوامل يمكن أن تؤثر على تكلس المياه الجوفية. يعكس هذا العامل عملية إذابة المعادن المتبخرة، وتأثير استخدام الأسمدة الكيميائية في الزراعة، وإذابة المعادن الكربوناتية، وتصريف المياه العادمة الحضرية. سمح تحليل المكونات الرئيسية (ACP) أيضاً بتصنيف العينات إلى ثلاث مجموعات وفقاً لمعدلات التمعدين، وقام التصنيف الهرمي التصاعدي (CAH) بتجميع الآبار ذات الخصائص الهيدروكيميائية المماثلة، مما يشير إلى أصول مشتركة. أكدت هذه المقاربة الإحصائية نتائج الدراسة الهيدروكيميائية، مما يبرز أهمية عمليات الذوبان. الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، الهيدروكيمياة؛ مياه الشرب، مؤشر جودة المياه (WQI)؛ الإحصاء متعدد المتغيرات، وادي سدر

| Table des Matières | |
|--|-----------|
| Remerciements | |
| Dédicaces | |
| Résumé | |
| Abstract | |
| ملخص | |
| Table de matières | |
| Liste des tableaux | |
| Liste des figures | |
| Liste des abréviations | |
| Introduction générale | 01 |
| Chapitre I : Synthèse bibliographique sur la zone d'étude | |
| I.1.Introduction | 03 |
| I.2.Situation géographique de la Wilaya de Djelfa | 04 |
| I.3. Climatologie | 05 |
| I.3.1. Diagramme de Bagnouls et Gausson (1953) | 05 |
| I.3.2. Climagramme d'Emberger | 05 |
| I.4.Ressources en eau de la wilaya de Djelfa | 06 |
| I.4.1. Les ressources en eau superficielles | 06 |
| I.4.2. Les ressources en eau souterraine | 07 |
| I.5.Cadre géologique et hydrogéologique de synclinal d'Ain El-Bel | 07 |
| I.5.1.Cadre géologique | 07 |
| I.5.2. Description lithologique des formations | 09 |
| I.5.3.Aperçu tectonique : | 11 |
| I.5.4.Le Synclinal Sud de Djelfa | 11 |
| I.6 Cadre hydrogéologique | 11 |
| I.6.1.La piézométrie | 12 |
| I.7. Exploitation des eaux souterraines | 12 |
| I.8. Conclusion | 13 |
| Chapitre II : Matériels et méthodes | |
| II.1. Introduction | 14 |
| II.2. Techniques d'analyse statistique | 14 |
| II.2.1. Analyse en Composantes Principales (ACP) | 14 |

| | |
|---|-----------|
| II.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) | 14 |
| II.3. Représentations graphiques des analyses hydrochimiques | 15 |
| II.3.1. Diagramme de Piper | 15 |
| II.3.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff | 17 |
| II.3.3. Diagramme de Stiff | 17 |
| II.3.4. Le diagramme de Chadha | 18 |
| II.4. Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse | 19 |
| II.4.1. Balance ionique | 20 |
| II.4.2. Indice de qualité de l'eau arithmétique (WQI) | 21 |
| II.4.3. Indice de qualité de l'eau pondéré (WQI) | 22 |
| II.5. Présentation des logiciels | 23 |
| II.5.1 Logiciel DIAGRAMMES | 24 |
| II.5.2 Logiciel STATISTICA | 24 |
| II.6. Conclusion | 25 |
| Chapitre III: Analyse statistique multivariée des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines | |
| III.1. Introduction | 26 |
| III.2. Matrice de corrélation | 27 |
| III.3. Analyse en composantes principales « ACP » | 28 |
| III.4. Projection des individus sur les plans factoriels | 31 |
| III.5. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) | 33 |
| III.5.1. Le dendrogramme des individus | 33 |
| III.5.2. Le dendrogramme des variables | 33 |
| III.6. Conclusion | 37 |
| Chapitre IV: Caractérisation hydrogéochimique et évaluation de la qualité des eaux souterraines | |
| IV. 1. Introduction | 38 |
| IV.2. Étude hydrochimique des eaux souterraines | 39 |
| IV.2.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux | 39 |
| IV.2.1.1. Résultats des analyses physiques | 39 |
| IV.2.1.2. Résultats des analyses chimiques | 42 |
| IV.3. Étude des paramètres chimiques (éléments majeurs) | 47 |

| | |
|--|-----------|
| IV.4. Classification des eaux souterraines des eaux souterraines d'Oued Seddeur | 48 |
| IV.4.1. Classification des eaux selon la conductivité électrique (C.E) | 48 |
| IV.4.2. Classification des eaux selon les solides totaux dissous (TDS) | 48 |
| IV.4.3. Classification des eaux selon la dureté totale (TH) | 48 |
| IV.5. Représentation graphique des faciès chimiques : | 49 |
| IV.5.1. Diagramme de Piper | 49 |
| IV.5.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff | 49 |
| IV.5.3. Diagramme de Stabler | 50 |
| IV.5.4. Diagramme de Stiff | 53 |
| IV.5.5. Le diagramme de Chadha | 54 |
| IV.6. Diagrammes binaires | 54 |
| IV.6.1. Relation entre les ions Na^+ vs Cl^- | 54 |
| IV.6.2. Relation entre les ions Ca^{2+} vs SO_4^{2-} | 55 |
| IV.6.3. Relation entre les ions Ca^{2+} vs HCO_3^- | 56 |
| IV.6.4. Relation entre les ions $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- | 57 |
| IV.6.5. Relation entre les ions $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ | 58 |
| IV.6.6. Relation entre les ions Mg^{2+} vs SO_4^{2-} | 58 |
| IV.6.7. Relation entre les ions Ca^{2+} vs Mg^{2+} | 59 |
| IV.6.8. Relation entre les ions Ca^{2+} vs Cl^- | 60 |
| IV.7. Indice de saturation des eaux (IS) | 61 |
| IV.8. Mise en évidence des échanges de base | 65 |
| IV.8.1. Indices chloro-alkalins (CA-1 et CA-2) | 65 |
| IV.8.2. La relation $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$ vs $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$ | 66 |
| IV.9. Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité des eaux souterraines | 67 |
| IV.9.1. Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) | 67 |
| IV.9.1.1. Normes nationales de l'Algérie | 67 |
| IV.9.1.2. Normes internationales de l'OMS | 68 |
| IV.9.2. Indice arithmétique de qualité de l'eau (WAWQI) | 69 |

| | |
|--|-----------|
| IV.9.2.1. Normes nationales de l'Algérie | 69 |
| IV.9.2.2. Normes internationales de l'OMS | 70 |
| IV.10. Conclusion | 71 |
| Conclusion Générale | 73 |
| Recommandations et Perspectives | 74 |
| Références Bibliographiques | 75 |
| Annexes | |

Liste abréviation

| | |
|---------------------|---|
| O.M.S | Organisation Mondiale de la Santé. |
| ONM | Office National de la Météorologie. |
| A.D.E : | Algérienne Des Eaux |
| A.N.R.H : | Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. |
| J.O.R.A : | Journal Officiel de la République Algérienne. |
| ANAT | Agence Nationale de l'Aménagement de territoire |
| DRE | Direction des Ressources en Eau |
| ACP | Analyse en Composantes Principales |
| CAH | Classification Ascendante Hiérarchique |
| CE | Conductivité électrique |
| TDS | Total Dissolved Solid |
| TH | Titre Hydrotimétrique (Dureté total) |
| CA-1 et CA-2 | Indices chloro-alcalins |
| WQI | Water Quality Index |
| WAWQI | Weighted Arithmetic Water Quality Index |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| Tableau. I.1: les retenues collinaires de la wilaya de Djelfa | 07 |
| Tableau. I.2 : Les unités hydrogéologiques de la wilaya | 07 |
| Tableau II.1 : Méthodes d'analyse des paramètres chimiques | 20 |
| Tableau II.2 : Evaluation de la qualité de l'eau selon la méthode de l'indice de qualité WQI | 22 |
| Tableau II.3 : Classification des eaux basée sur les valeurs WQI | 23 |
| Tableau III.1 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques : | 27 |
| Tableau III.2: valeurs propres des composantes principales. | 28 |
| Tableau III.3 : Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1, F2, F3 et. F4 | 31 |
| Tableau III.4: Statistique descriptive des paramètres hydrochimiques majeurs pour les principaux groupes (Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). | 35 |
| Tableau IV.1: Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 39 |
| Tableau IV.2: Classification des eaux souterraines d'Oued Seddeur selon CE | 48 |
| Tableau IV.3: Classification des eaux souterraines d'Oued Seddeur (solides dissous totaux (TDS) | 48 |
| Tableau IV.4: Classification des eaux souterraines d'Oued Seddeur(Dureté Totale) | 49 |
| Tableau IV.5: Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER | 52 |
| Tableau IV.6: statistique descriptive des indices de saturation | 62 |
| Tableau IV.7 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 68 |
| Tableau IV.8: Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 69 |

Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Djelfa | 04 |
| Figure I.2: Diagramme ombrothermique de la station de Djelfa (1975 – 2018) (Source : Boudiaf et Kamel, 2018). | 05 |
| Figure I.3: Climagramme d’Emberger (Source : Boudiaf et Kamel, 2018) | 06 |
| Figure I.4. : Log stratigraphique du synclinal de Djelfa (Source : ANRH). | 08 |
| Figure I.5 : Carte géologique du secteur (ANRH, 2018) | 09 |
| Figure I.6. Carte piézométrique du nappe Barrémien (Elguizi et Zeddouri, 2019) | 12 |
| Figure I.7 : Carte piézométrique du nappe Albien (Elguizi et Zeddouri, 2019) | 13 |
| Figure II.1 : Représentation hiérarchique d’un dendrogramme | 15 |
| Figure II.2 : Diagramme de piper | 16 |
| Figure II.3: Facies hydrochimique (Diagramme de piper) | 16 |
| Figure II.4 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff | 17 |
| Figure II.5 : Diagramme de Stiff | 18 |
| Figure II.6 : Diagramme de Chadha | 19 |
| Figure II.7: Représentation de l’interface du logiciel Diagrammes | 24 |
| Figure III.1 : Valeurs propres de la matrice de corrélation (Kaiser, 1960) | 29 |
| Figure III.2 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2. | 29 |
| Figure III.3 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F3. | 30 |
| Figure III.4 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F4. | 30 |
| Figure III.5 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2. | 32 |
| Figure III.6 : Projection des individus sur le plan factoriel F2-F3. | 32 |
| Figure III.7 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux souterraines (Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)) | 33 |
| Figure III.8 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des échantillons d’eau souterraine (Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)) | 34 |
| Figure III.9: Représentation des trois groupes d’eaux (CAH) sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff. | 36 |
| Figure III.10 : Représentation des trois groupes d’eaux(CAH) sur le diagramme de Stiff. | 36 |
| Figure IV.1. Variation de la température des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 40 |
| Figure IV. 2. Variation du pH des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 40 |
| Figure IV.3. Variation de la conductivité électrique (CE) des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 41 |
| Figure IV.4. Variation de TDS(Total Dissolved Solid) des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 41 |
| Figure IV.5. Variation de la dureté totale (TH) des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 42 |
| Figure IV.6. Variation des concentrations de Ca ²⁺ des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 43 |
| Figure IV.7. Variation des concentrations de Mg ²⁺ des eaux souterraines du | 43 |

| | |
|---|-----------|
| champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | |
| Figure IV.8. Variation des concentrations de Na^+ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 44 |
| Figure IV.9. Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 44 |
| Figure IV.10. Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 45 |
| Figure IV.11. Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 45 |
| Figure IV.12. Variation des concentrations de Cl^- des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 46 |
| Figure IV.13. Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 46 |
| Figure IV.14. Variation des concentrations de NO_3^- des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 47 |
| Figure IV.15. Distribution statistique des anions et cations des eaux souterraines (Oued Seddeur, Octobre 2025) | 47 |
| Figure IV.16. Digramme de Piper des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 50 |
| Figure IV.17. Diagramme de Schöeller-Berkaloff pour les eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) | 51 |
| Figure IV.18. Classification des eaux selon le diagramme de Stabler | 52 |
| Figure IV.19. Classification des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) selon le diagramme de Stiff | 53 |
| Figure IV. 20. Le diagramme de Chadha : | 54 |
| Figure IV.21. Relation entre les ions Na^+ vs Cl^- . | 55 |
| Figure IV.22. Relation entre les ions Ca^{2+} vs SO_4^{2-} . | 56 |
| Figure IV.23. Relation entre les ions Ca^{2+} vs HCO_3^- . | 57 |
| Figure IV.24. Relation entre les ions $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- | 57 |
| Figure IV.25. Relation entre les ions $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$. | 58 |
| Figure IV.26. Relation entre les ions Mg^{2+} vs SO_4^{2-} | 59 |
| Figure IV.27. Relation entre les ions Ca^{2+} vs Mg^{2+} | 60 |
| Figure IV.28. Relation entre les ions Ca^{2+} vs Cl^- . | 60 |
| Figure IV.29. Relations entre Indices de saturation des minéraux (IS) et la TDS (en mg/l). | 62 |
| Figure IV.30. Indices de saturation de (a et b) anhydrite et gypse Vs ($\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$), | 63 |
| Figure IV.31. Indices de saturation de l'halite Vs ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$) | 63 |
| Figure IV.32. Indices de saturation de la calcite Vs $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$, | 64 |
| Figure IV.33. Indices de saturation de la dolomite Vs $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-$, | 64 |
| Figure IV.34. Indices de saturation de (a et b) calcite et aragonite Vs ($\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$) | 65 |

| | |
|---|-----------|
| Figure IV.35. Diagrammes montrant l'échange d'ions dans les eaux souterraines : indices Chloro-Alcalins 1 et 2 (CAI-1 et CAI-2) | 66 |
| Figure IV.36. Diagrammes montrant l'échange d'ions dans les eaux souterraines : $[(Na^+ + K^+ + Cl^-)]$ en fonction de $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)]$ | 67 |
| Figure IV.37. Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes Algérienne). | 68 |
| Figure IV.38. Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes OMS) | 69 |
| Figure IV.39. Indice arithmétique de qualité de l'eau (WAWQI) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes Algérienne). | 70 |
| Figure IV.40. Indice arithmétique de qualité de l'eau (WAWQI) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes OMS) | 70 |

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

1. Problématique

La wilaya de Djelfa se caractérise par un climat semi-aride à aride, avec de très faibles précipitations et un fort taux d'évaporation de l'air. Il s'agit d'une zone à vocations agro-pastorale (Ouanouki, 2012). Tous les programmes de développement de la région de Djelfa se sont heurtés à la problématique de la disponibilité de l'eau (ANAT, 2003). Le champ captant d'Oued Seddeur renferme la principale ressource en eau pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Djelfa, dans un contexte de stress hydrique aggravé par la rareté des eaux de surface et une diminution des apports pluviométriques. L'exploitation de la nappe du champ captant Oued el Seddeur, avec plus de 20 forages, risque d'entraîner un rabattement du niveau de la nappe, une dégradation de la qualité de l'eau et une diminution des débits d'exploitation. Dans cette zone située à 25 km au sud de Djelfa, on se trouve sur le flanc sud du synclinal de Djelfa (Azlaoui, 2013; Elguizi et Zeddouri, 2019).

La Wilaya de Djelfa, située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord, se trouve à 300 kilomètres au Sud de la capitale, s'étendant sur des plaines steppiques au Nord et au Sud de l'Atlas Saharien, avec des coordonnées entre 2 et 5 ° de longitude Est et 33° et 35° de latitude Nord. La maîtrise de la gestion des eaux souterraines dans la région de Djelfa nécessite une étude approfondie de l'aspect qualitative de ces ressources en eau. La composition chimique des eaux souterraines dépend de la géochimie et des caractéristiques de l'aquifère. Elle est soumise à de l'influence de divers facteurs, tels que la topographie, la lithologie de la roche aquifère, le temps de résidence et les activités humaines. Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines d'Oued Seddeur par une approche hydrogéochimique, basée sur la détermination des faciès chimiques, l'origine de la minéralisation, l'aptitude des eaux à la consommation, l'identification des principaux processus géochimiques régissant l'évolution du chimisme des eaux souterraines. En outre, afin de compléter la caractérisation hydrogéochimique des eaux une approche statistique multivariées, telles que la matrice de corrélation, l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CHA) a été utilisé pour l'évaluation qualitative des eaux souterraines de la zone d'étude.

1. Objectifs de ce travail

- Dans le contexte de cette étude, une évaluation des caractéristiques physico-chimiques des eaux des principaux aquifères de la zone d'étude sera menée.
- L'identification des processus hydrogéochimiques qui régissent le comportement chimique de ce système aquifère.
- Évaluation de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine en se basant sur les indices de qualité de l'eau (WQI)

INTRODUCTION GENERALE

3. Approche et méthodologie

Afin de répondre à la problématique posée et en vue d'atteindre les objectifs fixés, une approche multidisciplinaire a été utilisée. Cette démarche méthodologique a combiné des méthodes hydrogéochimiques, statistiques et l'indice de la qualité de l'eau (WQI)

3. Structure de mémoire

Dans le cadre de cette étude, le **premier chapitre** est consacré à la présentation de la zone d'étude. Nous aborderons les principaux contextes susceptibles d'avoir une influence directe ou indirecte sur la ressource en eau. Une attention particulière sera portée sur la géologie et l'hydrogéologie de la zone d'étude.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la présentation des méthodes hydrogéochimiques et statistiques utilisés pour l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la zone d'étude.

Le **troisième chapitre**, aborde l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines, elle portera sur l'interprétation hydrogéochimique des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau analysés. A travers cette partie, on a essayé d'identifier les processus géochimiques responsables de l'acquisition de la minéralisation de l'eau souterraine.

Le **quatrième chapitre** est réservé à une étude statistique multivariée (ACP et CHA) des différents paramètres physico-chimiques, pour une meilleure compréhension de comportement hydrogéochimique du système aquifère.

Enfin, ce travail se termine par une **conclusion générale** et quelques recommandations.

CHAPITRE I :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LA ZONE D'ETUDE

I.1.Introduction

Le présent chapitre est dédié à la présentation de la zone d'étude. Il fournit des précisions sur les raisons qui ont motivé le choix de cette zone, ainsi que sur ses caractéristiques géographiques, climatiques et hydrographiques. En outre, ce chapitre aborde le contexte géologique et hydrogéologique de la région étudiée, en s'appuyant sur une synthèse de certaines études et publications antérieures pertinentes pour notre mémoire de master (Pouget, 1977 ; Azlaoui, 2013; ANRH, 2018; Elguizi et Zeddouri, 2019).

Le choix de la région d'étude pour ce travail de mémoire s'appuie sur plusieurs critères favorables. Tout d'abord, on dispose de données géologiques et hydrogéologiques abondantes issues de nombreux forages réalisés dans le cadre de plusieurs programmes nationaux dans la région. Ces données ont été exploitées dans ce mémoire, ce qui permet de mieux cerner et d'améliorer l'accès à l'eau potable pour la population locale. De plus, ces données contribuent à améliorer les connaissances hydrogéochimiques des eaux souterraines de champs captant d'Oued Seddeur et apportent une valeur ajoutée précieuse pour une gestion durable des ressources en eau dans la wilaya de Djelfa.

Pour toute étude sur les eaux souterraines, il est indispensable de disposer de connaissances géologiques, afin de déterminer la perméabilité du sous-sol, qui est un facteur déterminant dans le ruissellement et l'infiltration de l'eau. Nous donnerons ensuite une description lithostratigraphique des formations géologiques afin de définir les principales caractéristiques des unités hydrogéologiques de la zone d'étude. Il est en outre essentiel de bien comprendre les caractéristiques hydrogéologiques des principaux aquifères de la région afin de mettre au point une stratégie efficace pour une meilleure maîtrise et protection des eaux souterraines. L'étude des paramètres climatiques (précipitations, température, évapotranspiration) revêt une importance capitale pour mieux comprendre les mécanismes par lesquels les nappes phréatiques se rechargent grâce à l'infiltration des précipitations.

I.2.Situation géographique de la Wilaya de Djelfa

La Wilaya de Djelfa est située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord au - delà des piemonts Sud de l'Atlas Tellien en venant du Nord dont le chef - lieu de Wilaya est à 300 kilomètres au Sud de la capitale. Elle s'étale sur les vastes plaines steppiques au Nord et au Sud de l'Atlas Saharien (Bentchich et Mellouk, 2021). Elle est comprise entre 2 et 5 ° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord.

Elle est limitée (Figure I.1):

- Au Nord par les Wilayas de Médéa et de Tissemsilt
- A l'Est par les Wilayas de M'Sila et Biskra
- A l'Ouest par les Wilayas de Laghouat et de Tiaret
- Au Sud par les Wilaya de Ouargla, d'El Oued et de Ghardaïa.

Djelfa a accédé au rang de département (wilaya) depuis 1974. Cette partie du territoire occupe une superficie totale de 32 256,35 km², avec une population de 1 491 370 habitants.



Figure I.1: Situation géographique de la wilaya de Djelfa (<https://d-maps.com>, consulté le 04/04/2026).

I.3. Climatologie

La Wilaya de Djelfa a un climat continental méditerranéen à tendance xérothermique. Il se distingue par des étés très chauds et secs (avec des températures atteignant 35 °C ou plus) et des hivers longs, froids et venteux (avec des températures souvent proches de 0 °C ou inférieures).

I.3.1. Diagramme de Bagnouls et Gaussen (1953)

Le diagramme précipitations-températures de [Bagnouls et Gaussen \(1953\)](#) est un diagramme climatique qui représente les variations mensuelles de la température (moyenne) et des précipitations sur des échelles standardisées : une unité sur l'échelle des précipitations correspond à deux unités sur l'échelle des températures ($P = 2T$). D'après la [Figure I.2](#), on peut déduire deux périodes bien distinctes ([Boudiaf et Kamel, 2018](#)) :

- Une saison sèche et chaude s'étend du mois de mai, avec une température moyenne de 16,93 °C, jusqu'à la dernière semaine du mois d'octobre, où la température moyenne est de 15,33 °C à Djelfa.
- Une saison humide s'étendant de la fin octobre au mois de mai.

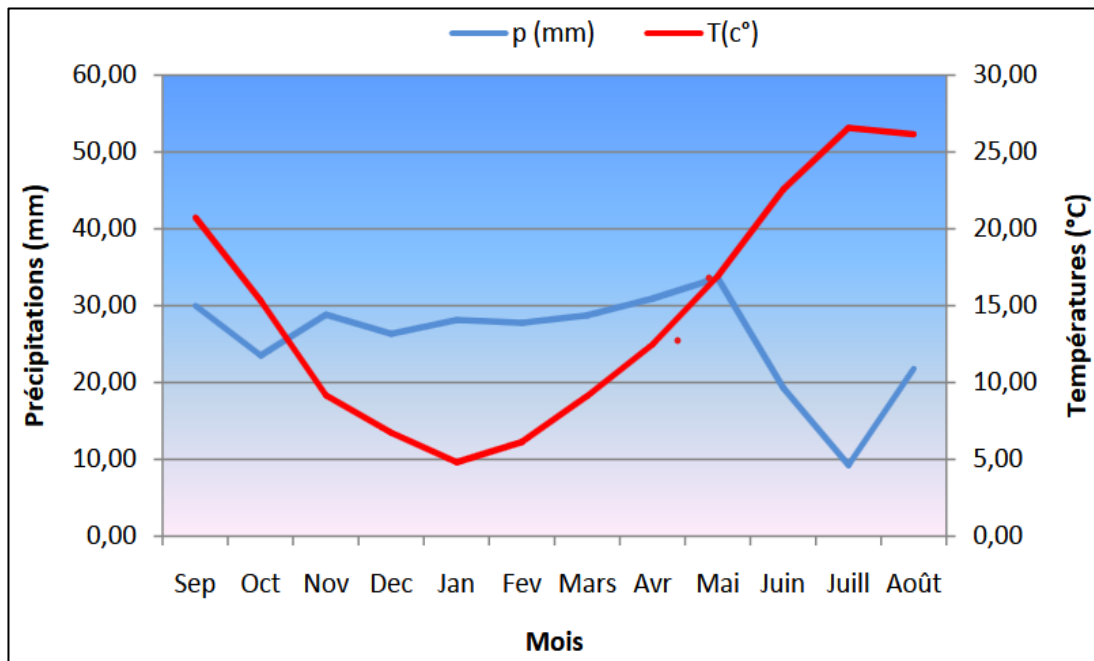


Figure I.2: Diagramme ombrothermique de la station de Djelfa (1975 – 2018) (Source : [Boudiaf et Kamel, 2018](#)).

I.3.2. Climagramme d'Emberger

Le Climagramme d'EMBERGER, un autre outil de synthèse climatique, permet de déterminer la zone bioclimatique d'une station donnée. Il est obtenu à partir de la formule suivante :

$$Q = \frac{2000P}{M^2 - m^2} \quad \text{Eq.I.1}$$

où : Q : quotient pluviométrique modifié d'Emberger

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA ZONE D'ÉTUDE

P : Précipitation (pluviométrie) annuelle moyenne, exprimée en millimètres (mm)

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud, exprimée en degrés Celsius (°C) ou en Kelvin (K).

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid, exprimée en degrés Celsius (°C) ou en Kelvin (K).

Après application de la formule, nous obtenons la valeur de Q égale à 32,03 (avec $m = 0,41$ °C), cette dernière situe la zone d'étude dans l'étage semi-aride à hiver frais (Figure I.3).

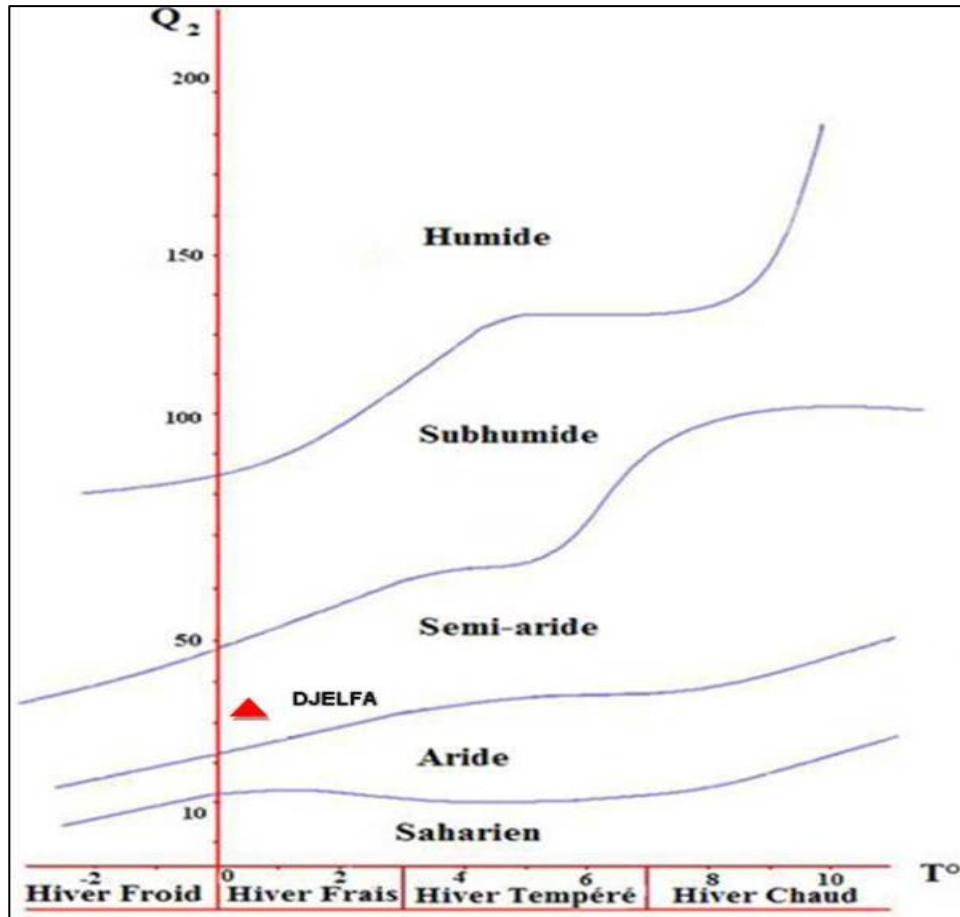


Figure I.3: Climagramme d'Emberger (Source : Boudiaf et Kamel, 2018).

I.4. Ressources en eau de la wilaya de Djelfa

I.4.1. Les ressources en eau superficielles

Les ressources en eau de la région ne sont pas très bien connues. Au niveau de la wilaya de Djelfa, l'exploitation des ressources en eaux de surface est très limitée, voire négligeable ; cette situation est aggravée par des conditions climatiques défavorables :

- Précipitations faibles et irrégulières (100 à 300 mm/an).
- Forte évaporation, de l'ordre de 800 à 1 000 mm/an

Les ouvrages de mobilisation d'eau superficielle existants sont représentés dans le [Tableau I.1](#): (ANAT, 2003 ; Ouanouki, 2012).

Tableau.I.1: les retenues collinaires de la wilaya de Djelfa (ANAT, 2003)

| Commune | Capacité annuelle (Hm³) |
|--------------------------|---|
| Charef (El Hajia) | 1,87 |
| Taâdmit (Toukersane) | 1,54 |
| Djelfa (Oued Boutreifis) | 0,4 |
| Djelfa (Chebaika) | 0,04 |
| Djelfa (Oued El Kirane) | 0,04 |
| Total | 3,89 |

I.4.2. Les ressources en eau souterraine

Les unités hydrogéologiques les plus connues sont celles de la plaine d'Ain Oussera, du synclinal de Djelfa et de Zahrez (Tableau I.2).

Tableau. I.2 : Les unités hydrogéologiques de la wilaya (ANRH de Djelfa, 2018)

| Unité hydrogéologique | Volume mobilisable | Volume mobilisable |
|---|---------------------------|---------------------------|
| | minima(Hm ³) | maxima(Hm ³) |
| Bassin de Zahrez | 50 | 140 |
| Plaine d'Ain Oussera | 27 | 55 |
| Synclinal de Djelfa | 30 | 40 |
| Vallée de l'Oued Touil | 15 | 25 |
| Synclinal d'Ain El Bel et plateau de Messad | 25 | 45 |

I.5.Cadre géologique et hydrogéologique de synclinal d'Ain El-Bel

I.5.1. Cadre géologique

L'étude géologique du terrain de la région de Djelfa a mis en évidence l'existence de plusieurs conditions propices à la formation d'aquifères importants, tant superficiels que profonds (Chibane, et al., 2010; Elguizi et Zeddouri, 2019). Le synclinal de Djelfa présente une géologie variée, où des formations perméables alternent avec des couches imperméables (ANRH, 2018) (Figures I.4 et I.5). D'un point de vue structural, la région d'Ain El Bel correspond à un vaste synclinorium dont l'axe nord-est - sud-ouest passe par les localités de Sidi Makhoulouf, Ain El Bel et Ksar Timekmert. Le synclinal d'Ain El Bel est représenté par une série détritique du Barremien, essentiellement recouverte par endroits de dépôts continentaux du Quaternaire en discordance avec les formations plus anciennes (Pouget, 1977 ; Azlaoui, 2013). La dépression d'Ain El Bel est une vaste zone encaissée située à l'ouest de l'anticlinal des djebels Zerga-Tafara, qui s'étend de Sidi Makhoulouf au sud jusqu'à Zakkar au nord, et qui est délimitée à l'ouest par le djebel Azreg.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE

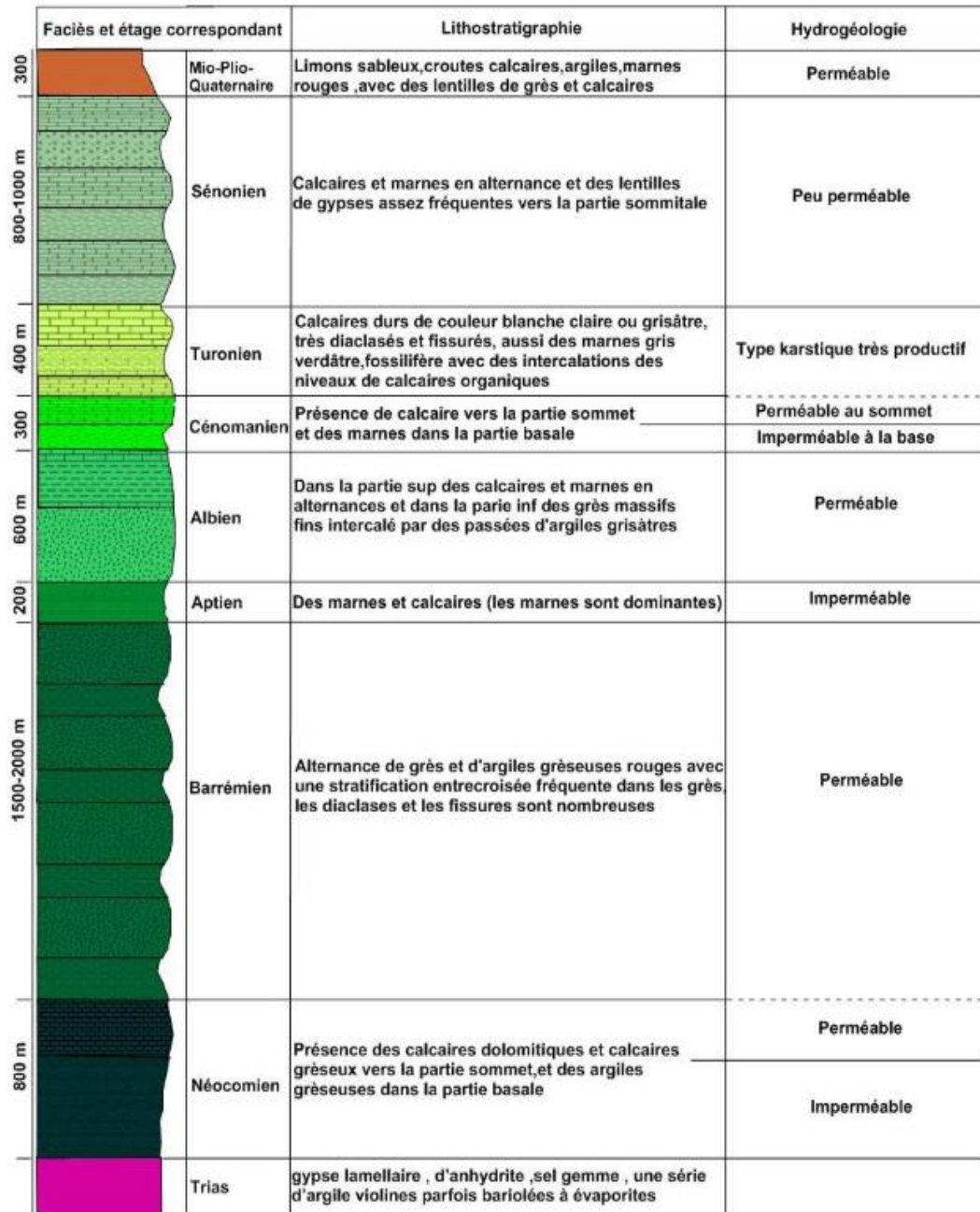
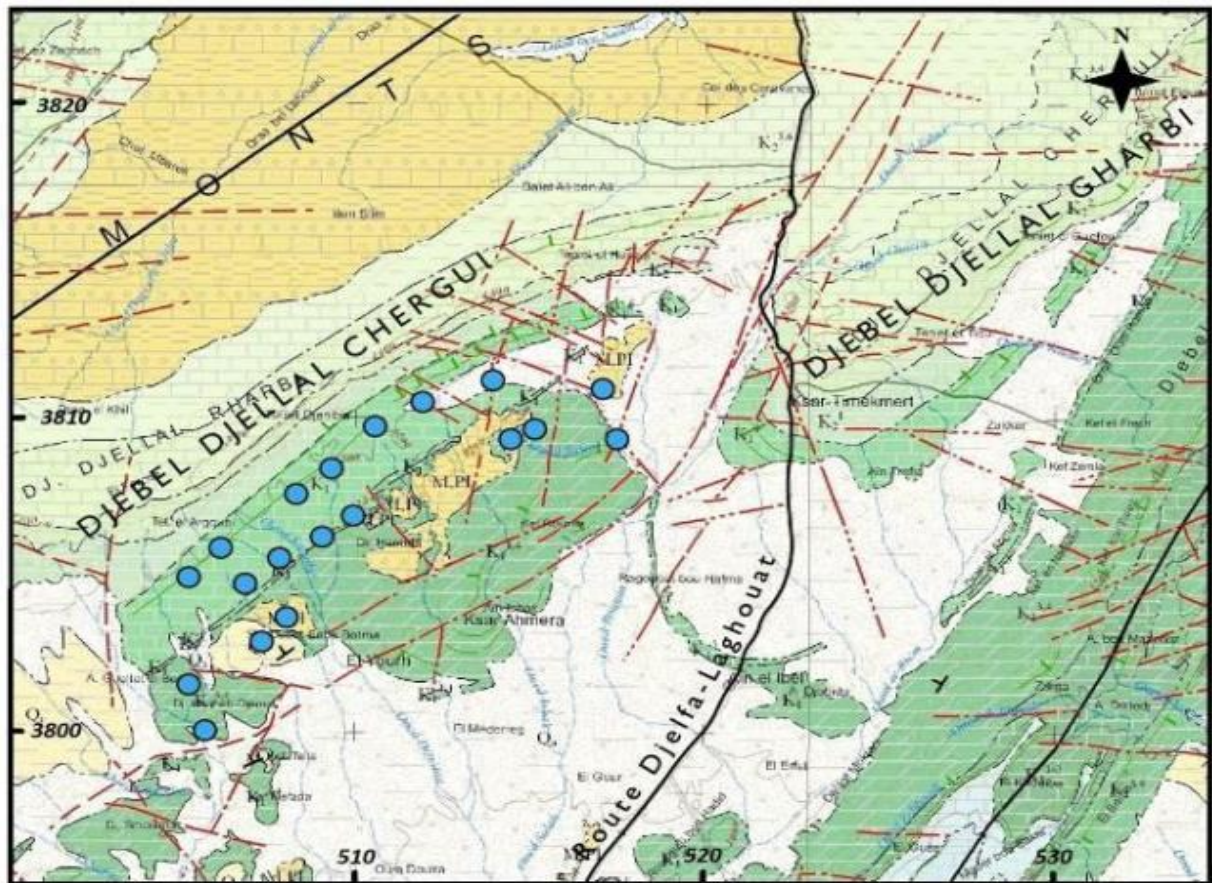


Figure I.4 : Log stratigraphique du synclinal de Djelfa (Source : ANRH).



Légende des formations litho-stratigraphiques



Echelle



Figure I.5 : Carte géologique du secteur d'étude (ANRH, 2018).

I.5.2. Description lithologique des formations

Le jurassique supérieur

Les affleurements du Jurassique supérieur sont localisés au sein des anticlinaux pincés bordant le synclinal d'Ain El Ibel, se présentant stratigraphiquement de bas en haut.

Cette série, composée de marne grise, de calcaire argileux et de calcaire oolithique, est attribuée au Kimméridgien.

-100 m de calcaires gris, avec de rares intercalations de marnes lumachelliques, surmontés par 120 m de marnes, pouvant inclure un banc de calcaire à oolithes ferrugineuses.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE

- 200 m de calcaire argileux à grains fins, de calcaire oolithique et de calcaire organique intercalés avec 50 m de marne.

Le néocomien

Le Néocomien affleure au Sud d'Ain El Bel, formant une série gréseuse avec des intercalations de calcaires à débris de Lamellibranches et de Gastéropodes, des dolomies, des calcaires gréseux et des marnes gréseuses versicolores, au flanc nord-ouest de l'anticlinal du Djebel Zerga. Cette formation de 330 m d'épaisseur au Djebel Zerga a été datée par la présence de la microfaune *Trocholineelongata*.

Le Barrémien

Le Barrémien, correspondant à l'étage géologique le plus ancien et étendu, affleure sur les flancs du synclinal, principalement à Aïn El Ibel dans les secteurs est et ouest, ainsi qu'à Sidi Makhoulf et Ksar Zekkar (Pouget, 1977 ; Azlaoui, 2013). Lithostratigraphiquement, la série barrémienne atteignant 500 m d'épaisseur est structurée de la base au sommet.

- De grès plus ou moins marneux sans dragées de quartz.
- De grès massifs à dragées de quartz.
- Une alternance de marnes, de grès fins et d'argiles rouges.
- Des grès massifs à dragées de quartz.
- Une alternance de grès de marnes et d'argiles rouges.
- Des grès rouges.
- Des grès, des marnes bariolées à gypse

L'Aptien

Dans la région étudiée, l'Aptien, dont la datation repose sur la présence de fossiles d'orbito-lignes, affleure au nord-est d'Ain El Ibel, à Oued Seddeur, Draa et Ahmar, où il se présente, de la base au sommet, comme suit :

- Des calcaires marneux lumachelliques à Orbitolines ,Gastéropodes, Terébratules, lamellibranches et algues.

- Des intercalations de marnes et de calcaires.
- Des calcaires de couleur beige clair siliceux compacts à rognons de silex abondants.

L'épaisseur de l'Aptien dans le synclinal d'Ain El Ibel est relativement faible, allant de 30 à 40 mètres.

L'Albien

L'Albien affleure dans la partie occidentale de la zone d'étude, sur le flanc ouest d'un anticlinal, sous la forme de deux formations principales : une série argilo-gréseuse de 30 à 50 mètres d'épaisseur attribuée à l'Albien inférieur, composée de grès fins et d'argiles présentant une stratification oblique et des intercalations de grès friables et de sables jaunâtres, et une formation argilo-carbonatée comprenant des marnes jaunes à des dolomites et divers calcaires, datant de l'Albien supérieur (Pouget, 1977; Azlaoui, 2013; Elguizi et Zeddouri, 2019).

L'Albien supérieur est constituée de divers carbonates (calcaire sableux, le calcaire dolomitique et le calcaire crayeux de couleur beige ou grise) et de marnes vertes salifères ou gypseuses (Pouget, 1977 ; ANRH, 2018).

Le Quaternaire

Les formations quaternaires se posent en discordance sur les formations crétacées, couvrant une vaste superficie dans le secteur étudié (Pouget, 1977 ; Azlaoui, 2013). Elles comprennent : des conglomérats à galets parfois ferruginisés surmontés d'une croûte calcaire (quaternaire ancien), des dépôts conglomératiques hétérométriques cimentés par un calcaire blanc ou rosé (quaternaire moyen), et des limons et galets occupant les zones déprimées (quaternaire récent) (Pouget, 1977 ; Azlaoui . 2013).

I.5.3. Aperçu tectonique :

La structure géologique actuelle des monts des OuledsNaïls est issue essentiellement des plissements tertiaires, avec des séries crétacées constituant l'ossature de ces monts, ils sont très plissés selon une direction SW-NE (Trayssac, 1981).

Le synclinal est subdivisé en deux parties :

- La partie centrale (axiale)
- Les flancs Nord et Sud du synclinal.

I.5.4. Le Synclinal Sud de Djelfa

Le Synclinal de Djelfa a la géologie variée ou les formations perméables alternent avec des niveaux imperméables (ANRH, 2018 ; Elguizi et Zeddouri, 2019). Elle est formée d'une série monoclinale avec un pendage relativement faible vers le nord-ouest, oscillant entre 12° et 30° (Rahmani, 2016). Ce flanc est traversé par une structure tectonique majeure, à savoir une faille de décrochement à glissement latéral droit avec un déplacement horizontal dépassant 5 km, qui divise le flanc sud du synclinal de Djelfa en deux parties (djebels) : le Djebel Djellal Gharbi à l'ouest de la route Djelfa-Laghouat et le Djebel Djellal Chergui à l'est de cette route (Pouget, 1977 ; Azlaoui M. 2013).

I.6 Cadre hydrogéologique

Dans la région d'Ain El Bel, le captage des eaux souterraines s'effectue principalement dans les aquifères du Valanginien-Barremien, formés de grès et d'argile à porosité interstitielle (Azlaoui, 2013). Le forage F13 a mis en évidence une épaisseur de 403 m dans une zone centrale, avec des débits importants, en particulier au centre du synclinal d'Ain El Bel (BEREGH. E.U.R.L, 2001; A.N.R.H, 2010, Azlaoui, 2013). L'aquifère du Valangénien-Barrémien est constitué d'une nappe libre sur les flancs du synclinal,

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE

dominée par des grès, et d'une nappe semi-captive au centre, où le toit devient argileux (A.N.R.H, 2010, Azlaoui, 2013).

I.6.1. La piézométrie

Les mesures des niveaux d'eau statiques dans les forages des aquifères de l'Albien et du Barrémien ont servi à établir une carte piézométrique pour chaque aquifère. L'analyse de la carte piézométrique (Figure I.7) de l'aquifère du Barrémien à Oued Seddeur révèle que la partie supérieure se trouve au nord à 1140 m (forage OS 08) et la partie inférieure au sud-ouest à 1070 m (forage OS 20), qui se trouve sur la route en direction d'El Idrissia. Les iso-pièzes sont espacées dans le sud, indiquant un écoulement du nord-est vers le sud, tandis qu'elles sont serrées dans le nord-est, possiblement en raison de la convergence et de la surexploitation des puits OS 6, 7, 8 et 16. La carte piézométrique de l'aquifère de l'Albien (Figure I.8) montrant le même type de configuration piézométrique que la carte précédente, ce qui suggère le même régime d'écoulement ; cette fois-ci, les isopiézomètres sont concentrés dans la partie sud-ouest, à proximité du forage OS 10.

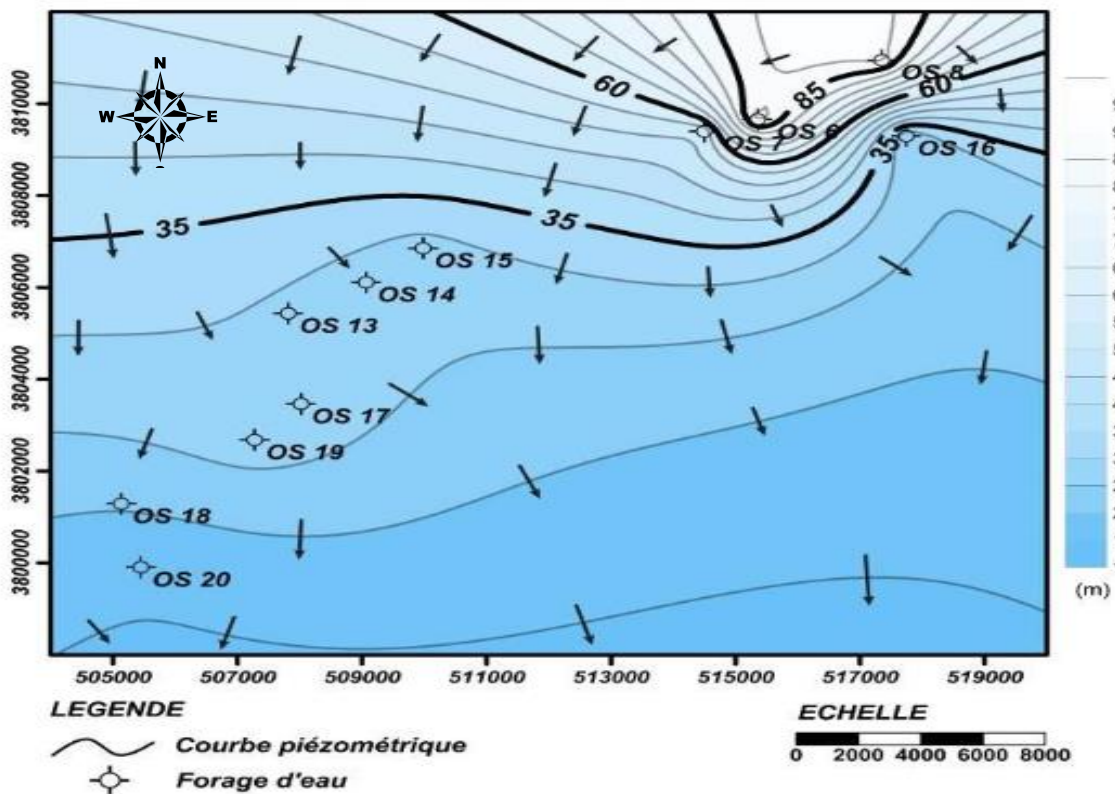


Figure I.6. Carte piézométrique du nappe Barrémien (Elguizi et Zeddouri, 2019)

I.7. Exploitation des eaux souterraines

Le champ captant d'Oued Seddeur a été mis en exploitation à partir de 2007. Dans cette zone située à 25 km au sud de Djelfa (Figure. 1), nous sommes sur le flanc sud du synclinal de Djelfa. Deux forages d'exploitation ont été réalisés à ce site en 1995 (DRE, 2018; ANRH, 2018). Ces forages faisaient partie d'un projet de fabrication de ciment. Ils ont montré l'existence d'un important potentiel aquifère. En 2003, la zone d'oued el Seddeur a été considérée comme un site de protection des ressources hydriques de la wilaya (ANRH, 2018; Elguizi et Zeddouri, 2019). 9 forages albiens ont été réalisés le long des

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA ZONE D'ETUDE

affleurements (OS1 à OS5 en 2007, OS9 en 2008 et OS10 à OS13 en 2012), et dix forages du Barremien ont été réalisés plus au sud sur les affleurements du Barremien (OS6 en 2004, OS7 et OS8 en 2007, et OS14 à OS20 en 2015) (ANRH, 2018 ; Elguizi et Zeddouri, 2019).

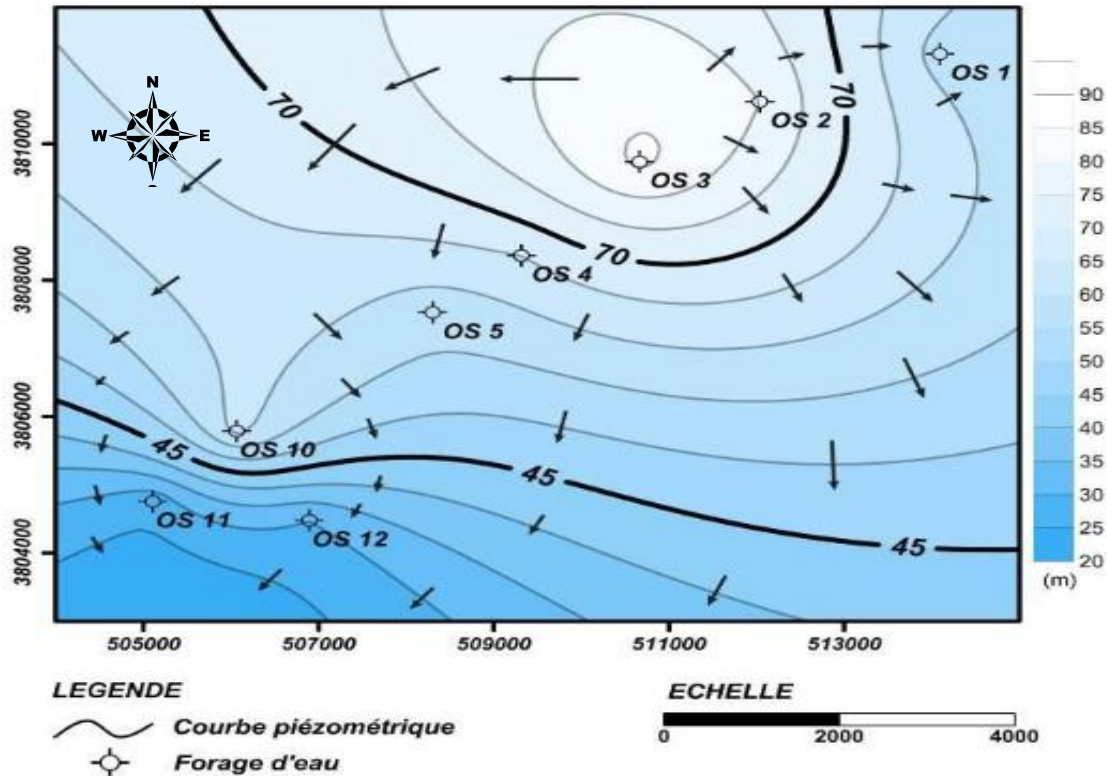


Figure I.7. Carte piézométrique du nappe Albien (Elguizi et Zeddouri, 2019)

I.8. Conclusion

La Wilaya de Djelfa se caractérise par un climat semi-aride à aride, avec une pluviométrie faible (100-300 mm/an) et irrégulière et un fort pouvoir évaporant de l'air. La nature géologique du terrain de la wilaya de Djelfa a montré qu'il existait un certain nombre de conditions favorisant la formation de nappes aquifères importantes, tant phréatiques que profondes. Elle se caractérise par d'importantes unités hydrogéologiques, telles que le bassin de Zahrez, la plaine d'Ain Oussera, le synclinal de Djelfa, la vallée de l'Oued Touil, le synclinal d'Ain El Bel et le plateau de Messad. Du point de vue géologique, Le synclinale d'Ain El Bel se caractérise par des séries détritiques du Barremien, recouvertes par endroits de dépôts continentaux discordants du Quaternaire. Le captage des eaux souterraines de l'aquifère de l'Oued Seddeur (flanc sud du synclinal de Djelfa) via des forages albiens et barrémiens constitue la source d'eau potable pour la plupart de la population de la ville de Djelfa.

CHAPITRE II :
MATÉRIEL ET MÉTHODES

II.1. Introduction

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différentes approches méthodologiques et des logiciels utilisés pour le traitement des données hydrochimiques. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé des méthodes distinctes pour la caractérisation et la classification des eaux souterraines, telles que des techniques d'analyse statistique multivariée comme l'analyse en composantes principales (ACP) ou la classification ascendante hiérarchique (CAH), ainsi que l'analyse de la chimie des eaux souterraines et l'utilisation d'outils hydrochimiques tels que les diagrammes de Piper (Piper, 1944), Schöeller-Berkaloff (Schoeller, 1965), Stiff (Stiff, 1951), et Stabler, et les diagrammes de Chadha et les diagrammes binaires. En outre, la méthode de l'Indice de Qualité de l'Eau (WQI) a été utilisée afin d'évaluer la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. L'indice WQI synthétise une grande quantité d'informations sur la qualité de l'eau en des termes clairs (par exemple, excellent, bon, mauvais, etc.) pour une compréhension aisée et cohérente destinée aux décideurs et au public concernés.

II.2. Techniques d'analyse statistique

II.2.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique utilisée pour analyser des données multidimensionnelles, notamment en hydrochimie. Elle identifie les corrélations entre les variables physico-chimiques et les regroupe par similarité, révélant ainsi les relations entre elles. Basée sur une matrice de corrélation, l'ACP aide à visualiser graphiquement ces relations et à réduire la dimensionnalité des données, exprimant les variables sous forme de combinaisons linéaires pour concentrer l'information sur des axes factoriaux clés (Davis, 1986; Lalaoui, 2021). Cette approche méthodologique en hydrochimie s'avère un complément utile pour une meilleure interprétation et analyse des processus hydrochimiques des eaux souterraines, notamment en ce qui concerne leurs origines, leur écoulement, leur temps de séjour, la nature du réservoir, entre autres (Madene, 2021).

II.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

L'analyse de classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode statistique permettant d'identifier des groupes au sein des données en les regroupant selon leurs similarités (Khadri, 2024). Efficace pour l'analyse hydrochimique des eaux, elle complète l'analyse en composantes principales (ACP). Cette approche mathématique utilise le calcul de la distance euclidienne et nécessite la normalisation des données par rapport à leurs moyennes en utilisant l'équation.

$$K_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{S_{ic}} \quad \text{Eq. II. 1}$$

Où K_{ij} est la valeur normale de X_{ij} pour la $i^{\text{ème}}$ variable du $j^{\text{ème}}$ individu, \bar{X} est la moyenne de la $i^{\text{ème}}$ variable et S_{ic} l'écart type

La procédure adoptée attribue un poids égal à chaque variable, utilisant la distance euclidienne pour mesurer la similarité entre deux individus (j, k).

$$d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^n [(K_{ij} - K_{ik})^2]^{1/2} \right] \quad \text{Eq. II. 2}$$

Où K_{ik} représente la K_i ème variable mesurée sur l'objet i , et K_{jk} la K_j ème variable mesurée sur l'objet j (Davis, 1986).

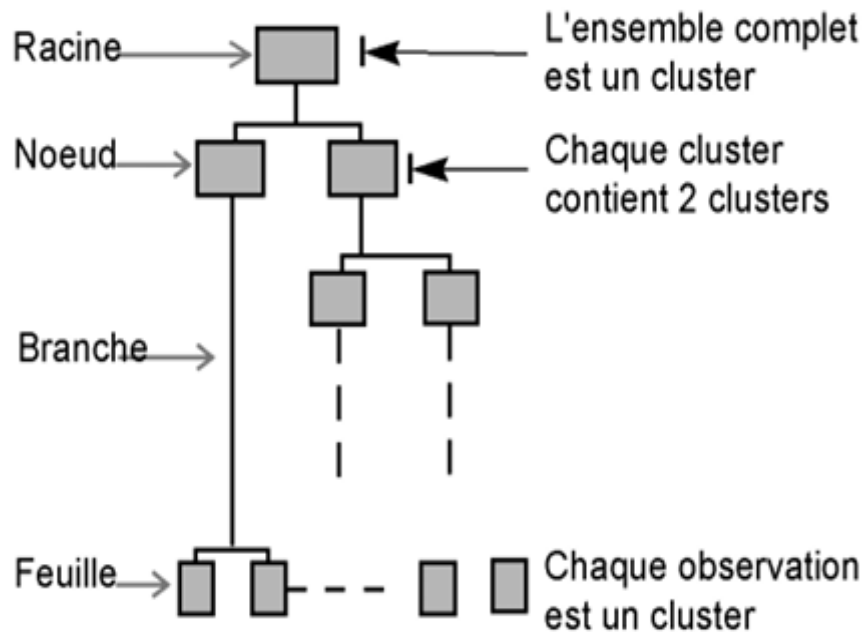


Figure II.1 : Représentation hiérarchique d'un dendrogramme (Chevalier et Bellac, 2012).

II.3. Représentations graphiques des analyses hydrochimiques

Pour mieux identifier les faciès hydrochimiques et obtenir des détails sur la qualité des eaux souterraines, les représentations graphique des résultats d'analyses constituent un outil indispensable (Madene, 2021). Nous utilisons les diagrammes de Piper, Schoeler-Berkaloff, de Stiff, de Stabler et le diagramme de Chadha. Ces représentations graphiques permettent de visualiser rapidement les résultats d'analyses afin de mieux caractériser le chimisme de l'eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique (Madene, 2021).

II.3.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper (Piper, 1944) est un outil très utilisé pour analyser les problèmes liés à l'évolution géochimique des eaux souterraines (Yebdri, 2023). Il se compose de trois champs distincts (figure 16). Deux triangles et un losange. Les teneurs en cations, exprimées en pourcentage de leur total en meq/L, sont représentées par un seul point sur le triangle de gauche. En revanche, le point représentant les concentrations en anions, exprimées par rapport au total des anions (en %), se place dans le triangle de droite.

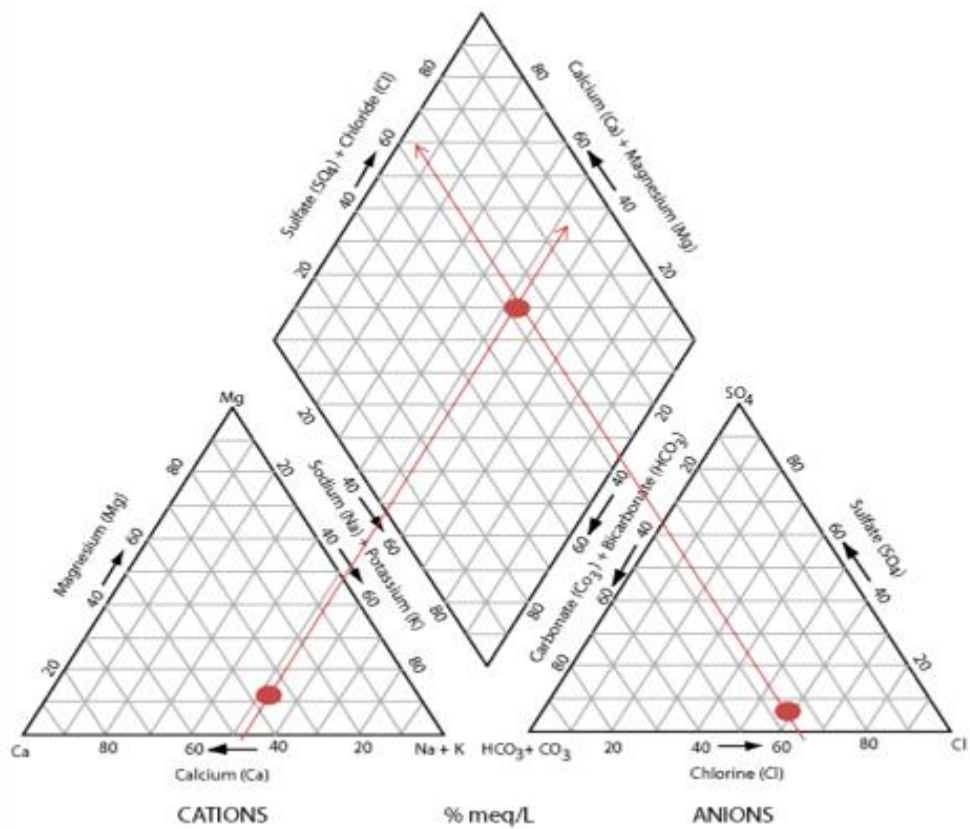


Figure II.2 : Diagramme de piper (Piper, 1944)

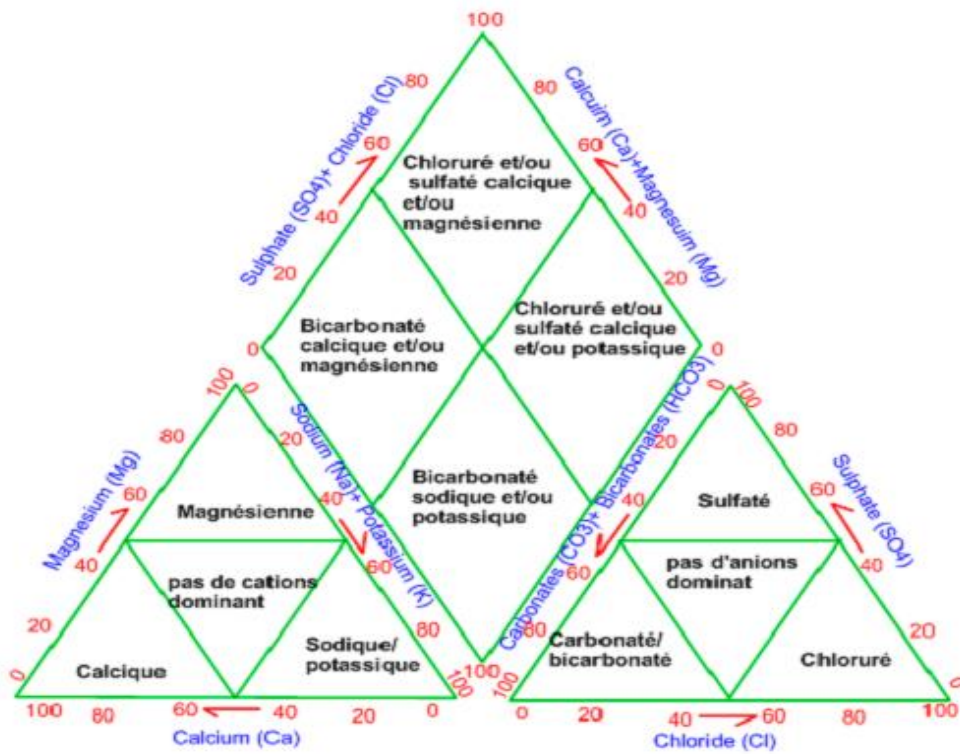


Figure II.3: Facies hydrochimique (Diagramme de piper) (Piper, 1944)

II.3.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff (Schoeller, 1965). permet de représenter, dans un seul graphe, les faciès chimiques de plusieurs échantillons d'eau. Il s'agit d'une représentation graphique basée sur une série d'axes verticaux gradués selon des échelles logarithmiques différentes (Madene, 2021). Chaque axe est associé à un ion ou à un groupe d'ions. Les concentrations, exprimées en mg/l, sont représentées sur les axes, puis reliées par des droites. Les droites obtenues se superposent si les concentrations sont identiques, et se décalent les unes par rapport aux autres dans le cas contraire. La distinction du faciès de l'eau est donc établie en fonction de la forme du polygone (Hassane Saley, 2018), ce qui permet de déterminer les espèces dominantes et la parenté chimique (Bouteldjaoui, 2020).

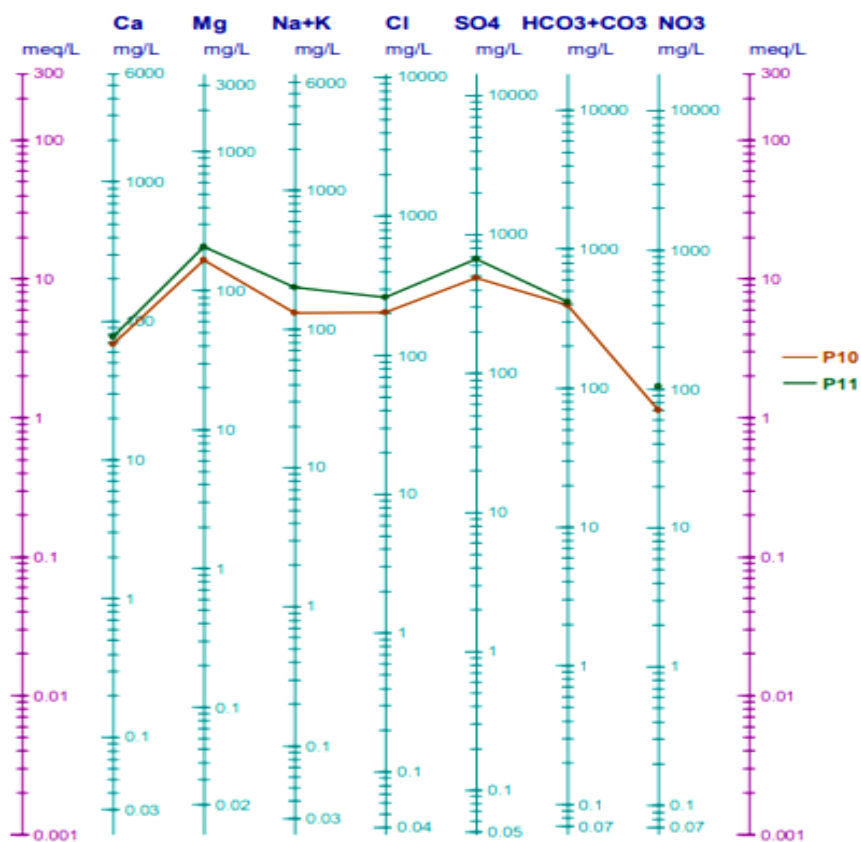


Figure II.4 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (Schoeller, 1965).

II.3.3. Diagramme de Stiff

Stiff (1951) a élaboré une représentation graphique permettant de différencier les divers types d'eaux souterraines au moyen d'un polygone. Les ions majeurs sont affichés sous forme de trois axes horizontaux (Bourjila, 2023). Ces axes sont en meq/l. Les cations sont tracés à gauche et les anions sont tracés à droite. Les paires cation-anion sont présentées de haut en bas du diagramme, comme suit : Les paires cation-anion sont présentées de haut en bas du diagramme comme suit : $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$, et $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ (Bourjila, 2023).

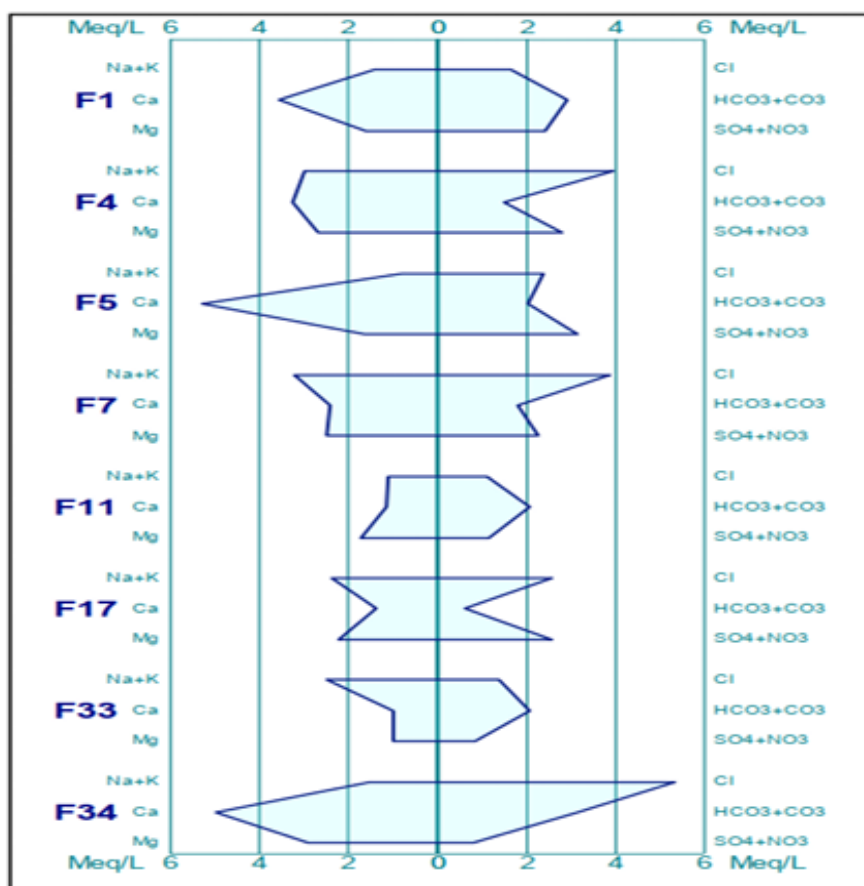


Figure II.5 :Diagramme de Stiff (Stiff, 1951).

II.3.4.Le diagramme de Chadha

Le diagramme de Chadha (Chadha, 1999) a été appliqué dans le but d'identifier les processus hydrochimiques et les faciès des eaux souterraines. Ce diagramme permet de classer les eaux en quatre groupes (Djenba et al., 2015):

Groupe 1 : Eaux de recharge de type Ca-HCO₃

Groupe 2: Eaux avec un excès en Ca-Mg-Cl ayant subi un échange ionique inverse

Groupe 3 : Eaux salées riches en Na-Cl qui sont soit des eaux de mer soit ayant séjourné en contact avec des formations salées.

Groupe 4 : Eaux ayant subi un échange ionique Na-HCO₃

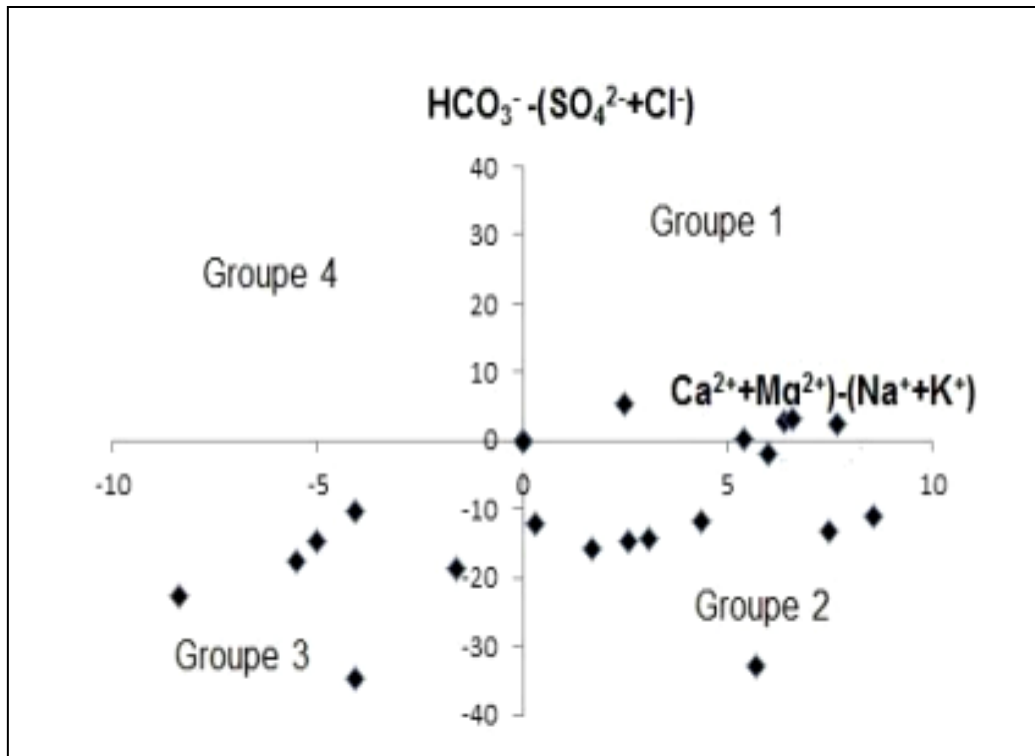


Figure II.6 : Diagramme de Chadha (Chadha, 1999)

II.4.Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse

La campagne l'échantillonnage a été réalisée sur 15 forages dans Oued Seddeur Djelfa par les services de la Direction Algérienne des Eaux (ADE de Djelfa) en octobre 2025. Le prélèvement, le transport et la conservation des échantillons ont été faits selon les recommandations de Rodier et al. 2009 Les échantillons d'eau pour les analyses physico-chimiques ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 1,5 Litres. Tous les échantillons sont acheminés au laboratoire dans une enceinte maintenue à une température égale à 4°C dans les 24 heures qui suivent la fin du prélèvement. Les paramètres physiques, tels que la température, le pH, la conductivité électrique (CE) ont été mesurés in situ avec le multiparamètre. Les éléments majeurs à doser dans le laboratoire sont : Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ et NO₃⁻ selon les méthodes d'analyses récapitulées dans le **Tableau II.1**. Les analyses physico-chimiques des eaux ont été réalisées selon les normes préconisées par AFNOR (1997) ou celles homologuées par Rodier (2009).

CHAPITRE II: MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tableau II.1 : Méthodes d'analyse des paramètres chimiques (ADE, 2026)

| Paramètres | Méthode d'analyse | Norme |
|---|-----------------------------------|---------------|
| Potentiel hydrogène (pH) | pH-mètre | NF T90-008 |
| Conductivité électrique(CE) | Conductimètre | NF T90-031 |
| Turbidité | Turbidimètre | NF T 90 – 033 |
| Le calcium (Ca ²⁺) | Titration (EDTA) | NF T90-003 |
| Magnésium (Mg ²⁺) | Titration (EDTA) | NF T90-003 |
| Potassium (K ⁺) | Photomètre de flamme(JENWAY). | ISO 9964/3 |
| Le Sodium (Na ⁺) | Photomètre de flamme (JENWAY). | ISO 9964/3 |
| L'ammonium(NH ₄ ⁺) | Spectrophotométrie HACH (DR/2000) | ISO N°7150 |
| Chlorure (Cl ⁻) | Titration | NF T 90 – 014 |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | Spectrophotométrie HACH (DR/2000) | NF T 90 040 |
| Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) | Titration | NF T0-036 |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | Spectrophotométrie HACH (DR/2000) | T90-012 |

II.4.1. Balance ionique

La balance ionique est un paramètre très important, car elle permet de vérifier la validité des résultats issus des techniques d'analyse (Kamenan, 2021). Une balance ionique parfaitement équilibrée est rarement obtenue. Il y a toujours un certain pourcentage d'erreur, calculé selon la formule de l'équation 1 (Yao, 2021). :

$$BI = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad \text{Eq. II. 3}$$

$$\text{Avec } \sum \text{anions} = [r\text{HCO}_3^-] + [r\text{SO}_4^{2-}] + [r\text{Cl}^-] + [r\text{NO}_3^-] \quad \text{Eq. II. 4}$$

$$\sum \text{cations} = [r\text{Ca}^{2+}] + [r\text{Mg}^{2+}] + [r\text{Na}^+] + [r\text{K}^+] \quad \text{Eq. II. 5}$$

: La concentration de l'élément chimique est exprimée en milliéquivalent par litre (még/L). [rX]

- Si **BI < 5%**, alors l'analyse est jugée satisfaisante.
- Si **5 % < BI < 10%**, alors l'analyse est jugée acceptable.
- Si **BI > 10%**, alors l'analyse est douteuse et doit être reprise pour vérification.

II.4.2. Indice de qualité de l'eau arithmétique (WQI)

Dans le cadre de cette étude l'indice WQI a été appliqué afin d'évaluer l'influence des différents facteurs, aussi bien naturels qu'anthropiques, sur la base de plusieurs paramètres physico-chimiques des eaux souterraines. Cet indice est déterminé selon la méthode de l'indice arithmétique pondéré, une approche méthodologique qui a été élaborée par [Brown et al. \(1970\)](#), [Brown et al. \(1972\)](#), [Yidana et Yidana \(2010\)](#) ; [Talhoui et al., 2020](#). L'indice est calculé en utilisant les équations suivantes :

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{s_i}\right)} \quad \text{Eq. II. 6}$$

$$K = \frac{1}{\left[\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \dots + \frac{1}{s_n}\right]} \quad \text{Eq. II. 7}$$

K : constante de proportionnalité

S_i: valeur maximale de la norme standard de chaque paramètre en **mg/l**

n: nombre de paramètres

$$w_i = \frac{k}{s_i} \quad \text{Eq. II. 8}$$

W_i: le poids de chaque paramètre selon son importance relative dans la qualité des eaux de boisson.

K : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante :

Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (**Q_i**) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par **100** comme dans la formule suivante :

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{s_i}\right) \cdot 100 \quad \text{Eq. II. 9}$$

Q_i: échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre

C_i: la concentration de chaque paramètre en **mg/l**.

Finalement l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{Eq. II. 10}$$

L' **WQI** a été classé en 5 classes.

CHAPITRE II: MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le **Tableau II.2** représente les **cinq (05) classes** de qualité de l'eau basée sur la méthode de l'indice WQI arithmétique pondéré.

Tableau II.2 : Evaluation de la qualité de l'eau selon la méthode de l'indice de qualité WQI (Brown et al., 1970 ;).

| Classe de WQI | Type d'eau | Usage possible |
|---------------|---------------------------|---|
| 0 – 25 | Excellente qualité | Eau potable, irrigation et industrie |
| >25 – 50 | Bonne qualité Eau | Eau potable, Irrigation et industrie |
| >51 – 75 | Mauvaise qualité Eau | qualité Irrigation et industrie |
| >76 – 100 | Très mauvaise qualité Eau | Irrigation |
| > 100 | Eau non potable | Traitement approprié requis avant utilisation |

II.4.3.Indice de qualité de l'eau pondéré (WQI)

La potabilité de l'eau est évaluée par l'Indice de Qualité de l'Eau (WQI), une méthode largement utilisée, développé par [Brown et al. \(1970\)](#) et modifié par [Backman et al. \(1998\)](#), cet indice permet de résumer l'état de la qualité de l'eau en comparant divers paramètres aux normes préconisées. [L'OMS \(2008\)](#) indique que le WQI permet de cerner l'impact de chaque paramètre sur la qualité globale de l'eau potable. Le WQI est un outil très utilisé ces dernières années pour la surveillance de la qualité de l'eau, tenant compte des facteurs environnementaux importants liés à la pollution ([Lalaoui, 2021](#)). La méthode implique trois étapes suivantes :

1- Chaque paramètre est pondéré en fonction de son impact potentiel sur la santé, l'environnement et les êtres humains ([Khadri, 2024](#)).

Les étapes pour calculer cet indice sont:

- 1- Attribuer un poids (W_i) de 1 à 5 pour chacun des paramètres suivants : pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et TDS. Ces poids représentent l'importance relative de chaque paramètre dans la qualité de l'eau ([Khadri, 2024](#)).
- 2- Le poids relatif (RW) d'un paramètre peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$RW_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{Eq. II. 11}$$

Où : RW_i est le poids relatif du paramètre i.

W_i est le poids attribué au paramètre i (compris entre 1 et 5).

$\Sigma(W_i)$ est la somme des poids de tous les paramètres.

n : le nombre de paramètres.

CHAPITRE II: MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre a été calculée en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par sa norme respective établie par l'OMS (2017) et en multipliant les résultats par 100.

$$q_i = \left(\frac{c_i}{s_i}\right) \cdot 100 \quad \text{Eq. II. 12}$$

q_i : échelle de notation de la qualité

C_i : la concentration de chaque paramètre en mg.L^{-1} .

S_i : la norme de l'OMS de chaque paramètre en mg.L^{-1} .

- 3- Ensuite, pour obtenir la valeur de l'indice de qualité de l'eau (WQI), le sous-indice de qualité de l'eau (SI_i) est calculé pour chaque paramètre en utilisant l'équation suivante :

$$SI_i = R w_i \times q_i \quad \text{Eq. II. 13}$$

- 4- En dernier lieu, le calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI) est réalisé en utilisant des sous-indices de qualité de l'eau (SI_i).

$$WQI = \sum SI_i \quad \text{Eq. II. 14}$$

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) sont classées en cinq catégories pour différents types d'eau :

Tableau II.3 : Classification des eaux basée sur les valeurs WQI (Brown et al., 1970)

| Valeurs QWI | Qualité des eaux |
|-------------|--------------------|
| < 50 | Excellente qualité |
| 50 – 100 | Bonne qualité |
| 100 – 200 | Qualité médiocre |
| 200 – 300 | Qualité mauvaise |
| > 300 | Eau non potable |

II.5. Présentation des logiciels

Le traitement des données hydrochimiques, statistiques et nécessite un recours systématique à des outils informatiques. Le logiciel DIAGRAMMES a été utilisé pour mener l'étude hydrochimique. Concernant l'analyse statistique, deux approches ont été utilisées : la première pour le traitement monovarié et la deuxième pour le traitement multivarié. Pour le traitement des données statistiques, nous avons utilisé le logiciel STATISTICA 8.

II.5.1 Logiciel DIAGRAMMES

Afin d'identifier les faciès hydrochimiques et d'obtenir des précisions sur la qualité des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses est un outil essentielle. Pour répondre à cet objectif, nous avons utilisé le logiciel « Diagrammes » (version 6.59) conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, université d'Avignon) (Simler, 2013). Ce logiciel nous permettra de calculer la balance ionique, de classer les eaux (faciès chimique, classe d'irrigation) et de construire les différents diagrammes (Piper, de Riverside et de Wilcox) (figures II.7).

II.5.2 Logiciel STATISTICA

Le logiciel STATISTICA 8 (StatSoft, Inc, 2011) est utilisé pour réaliser des analyses statistiques descriptives. Il se distingue par sa vitesse d'exécution et ses différents modules. Il permet de calculer les paramètres de base, tels que le maximum, la moyenne, l'écart-type, le coefficient de variation, etc. Il permet entre autres de représenter des histogrammes de fréquence avec des courbes normales. L'analyse statistique multivariée (ACP et CAH) est réalisée par ce logiciel, qui fournit des résultats complets. Il permet également de calculer la matrice de corrélation, d'étudier les variables et les individus, ainsi que d'établir des cercles de corrélation.

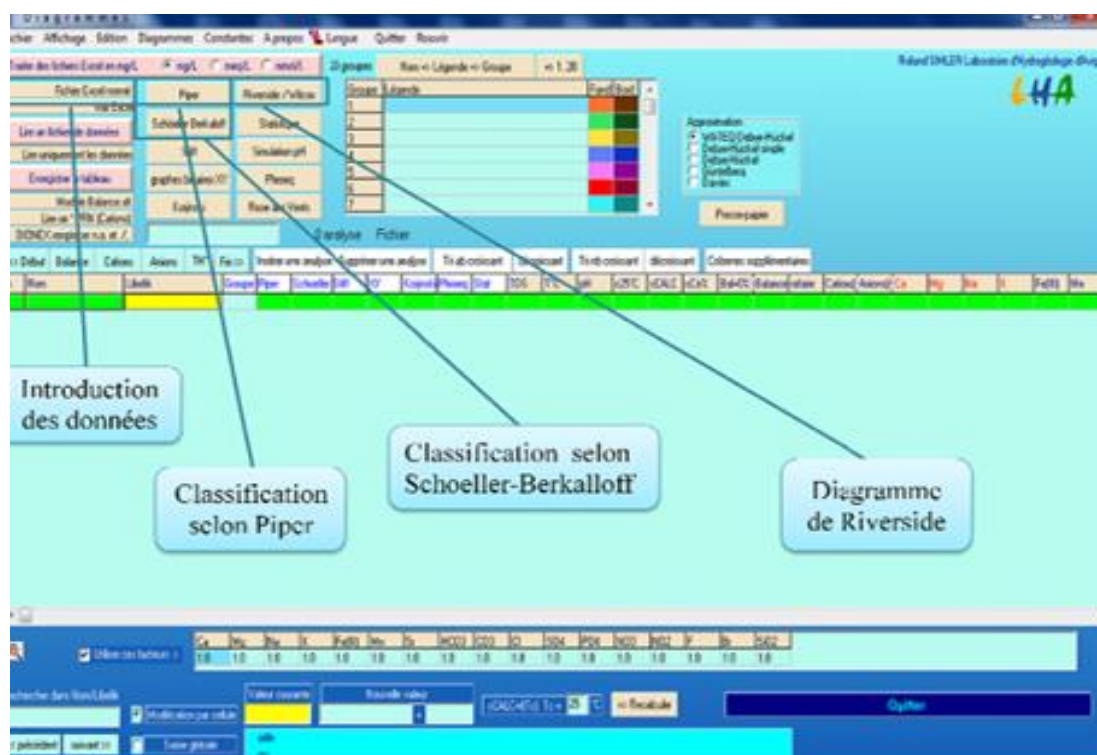


Figure II.7: Représentation de l'interface du logiciel Diagrammes

II.6. Conclusion

Ce chapitre présente les différentes méthodes hydrochimiques et statistiques nécessaires à la réalisation de ce mémoire. Les diagrammes hydrogéochimiques (Piper, Schoeller-Berkaloff, Stiff, Stabler) permettront d'identifier les facies hydrogéochimiques des eaux. L'approche statistique est basée sur l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces techniques statistiques permettent de classer les échantillons selon leurs caractéristiques hydrochimiques, ce qui facilite leur interprétation pour mieux comprendre les facteurs naturels et anthropiques influençant la minéralisation des eaux souterraines. En outre, l'utilisation de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) est considérée comme un outil efficace pour évaluer la qualité des eaux, puisque son approche intègre l'influence de divers paramètres physico-chimiques.

CHAPITRE III :
ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES
PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX
SOUTERRAINES

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

III.1. Introduction

L'étude hydrochimique des eaux souterraines basée sur l'interprétation des processus hydrogéochimiques régissant l'acquisition de la minéralisation en utilisant les méthodes graphiques à savoir les diagrammes de Piper (Piper, 1944), diagramme de Stiff (Stiff, 1951), le diagramme de Schoeller (Schoeller, 1965) et les diagrammes binaires. Cependant, ces méthodes présentent certaines limites lorsqu'il s'agit d'interpréter des jeux de données complexes. Ainsi, l'approche statistique, fondée sur l'utilisation de techniques d'analyse multivariée, visent à compléter les méthodes hydrochimiques classiques. Elle permet une meilleure compréhension des processus hydrogéochimiques à travers l'exploitation approfondie des données hydrochimiques en fournissant des informations pertinentes sur la qualité des eaux (Lalaoui, 2021). Au cours des dernières décennies, l'utilisation des techniques statistiques multivariées à l'étude des données hydrochimiques a permis d'aboutir à des résultats significatifs (Lalaoui, 2021). Ces méthodes facilitent la visualisation des données, mettent en évidence leur structure sous-jacente et permettent d'identifier les variables les plus influentes (Lalaoui, 2021). L'analyse statistique des données utilise des méthodes pour simplifier leur représentation, de révéler leur structure fondamentale et identifier les variables les plus significatives. Les outils examinés comprennent des graphiques, des histogrammes, et également des techniques sophistiquées telles que l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse des correspondances et la classification ascendante hiérarchique (CAH). La classification ascendante hiérarchique (CAH) est un outil aussi puissant pour analyser des données de la chimie d'eau et pour la formulation de modèles géochimiques (Yidana et al, 2008; Madene, 2021). L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse statistique de données multidimensionnelles. Cette méthode a été utilisée en Algérie par plusieurs chercheurs dans le domaine d'hydrogéologie pour le traitement des données hydrochimiques (Ghodbane, 2018; Madene, 2021; Lalaoui, 2021 et Khadri, 2024)

Dans le cadre de cette étude, une analyse statistique multivariée a été appliquée aux données hydrochimiques des eaux souterraines des forages d'Oued Seddeur. Ce chapitre porte sur l'analyse statistique multivariée de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la zone d'étude, en utilisant des outils tels que l'analyse en composantes principales et la classification hiérarchique ascendante. Cette approche permet de structurer les données sous forme de matrice de corrélation et de représentations graphiques, facilitant ainsi la comparaison entre différents échantillons et la mise en évidence des relations entre variables et de regrouper les individus selon leurs similitudes.

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

III.2. Matrice de corrélation

Les variables montrent un coefficient de corrélation $r > 0,7$ sont considéré être fortement corrélé tandis que celles avec un coefficient 'r' compris entre 0.5 et 0.7, et $r < 0,5$ montre des corrélations modérées et faibles respectivement (Adams et al, 2001°). La matrice de corrélation (Tableau III.1) a révélé l'existence d'une forte corrélation entre la minéralisation total (TDS) et les éléments chimiques majeurs : Ca^{2+} ($r=0,90$), Cl^- ($r=0,87$), SO_4^{2-} ($r=0,83$) et la dureté totale (TH) ($r=0,97$). La conductivité électrique (CE) est fortement corrélée aux paramètres chimiques : TDS ($r=0,99$), Ca^{2+} ($r=0,91$), Cl^- ($r=0,85$), SO_4^{2-} ($r=0,84$) et (TH) ($r=0,96$). Il est à noter que la forte corrélation entre la TDS, CE et Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et la dureté totale (TH) implique la contribution de ces ions à l'acquisition de la minéralisation totale des eaux souterraines de la zone d'étude (Ghodbane, 2018).

- Le Ca^{2+} est bien corrélé aux Cl^- ($r=0,81$), SO_4^{2-} ($r=0,76$) et (TH) ($r=0,84$) et de moindre mesure avec le K^+ .
- Les Cl^- sont fortement corrélé au TH ($r=0,86$) et de moindre mesure avec les SO_4^{2-} ($r=0,54$)
- Les SO_4^{2-} sont bien corrélé positivement avec la dureté totale TH ($r=0,80$).
- Le Na^+ montre une bonne corrélation positive avec NO_3^- ($r=0,79$).
- Une corrélation modérée est observé entre le pH est Mg^{2+} ($r=0,55$)

Les bonnes corrélations montrent une origine commune de ces éléments chimiques.

Tableau III.1 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques :

| | T°C | pH | CE | TDS | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | K^+ | NH4 | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | NO_3^- | TH |
|--------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------------|------------------|---------------|--------------|-------|------------------|---------------|--------------------|-----------------|----|
| T°C | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| pH | <u>-0.52</u> | 1 | | | | | | | | | | | | |
| CE | -0.06 | 0.05 | 1 | | | | | | | | | | | |
| TDS | -0.07 | 0.08 | 0.99 | 1 | | | | | | | | | | |
| Ca^{2+} | 0.15 | -0.14 | 0.91 | 0.90 | 1 | | | | | | | | | |
| Mg^{2+} | -0.50 | <u>0.55</u> | 0.07 | 0.11 | -0.29 | 1 | | | | | | | | |
| Na^+ | 0.91 | -0.50 | -0.15 | -0.15 | 0.00 | -0.41 | 1 | | | | | | | |
| K^+ | 0.21 | -0.05 | 0.37 | 0.32 | 0.50 | <u>-0.56</u> | 0.13 | 1 | | | | | | |
| NH4 | -0.31 | 0.00 | 0.10 | 0.09 | 0.04 | 0.14 | -0.22 | 0.28 | 1 | | | | | |
| HCO_3^- | -0.04 | 0.05 | 0.14 | 0.16 | 0.04 | 0.40 | -0.13 | -0.34 | -0.13 | 1 | | | | |
| Cl^- | 0.04 | 0.00 | 0.85 | 0.87 | 0.81 | 0.09 | -0.02 | 0.35 | 0.36 | 0.19 | 1 | | | |
| SO_4^{2-} | -0.04 | 0.04 | 0.84 | 0.83 | 0.76 | 0.06 | -0.10 | 0.26 | -0.05 | -0.14 | 0.54 | 1 | | |
| NO_3^- | 0.82 | -0.41 | -0.05 | -0.06 | 0.16 | -0.42 | 0.79 | 0.31 | 0.09 | 0.03 | 0.13 | -0.05 | 1 | |
| TH | -0.13 | 0.18 | 0.96 | 0.97 | 0.84 | 0.27 | -0.23 | 0.19 | 0.12 | 0.27 | 0.86 | 0.80 | -0.08 | 1 |

Les résultats montrent que l'essentiel de la minéralisation provient des minéraux évaporitiques liées au gypse et/ou l'anhydrite et le chlorure de calcium (CaCl_2) comme suggère les bonnes relations positivement existant entre la minéralisation totale TDS et les éléments majeures (Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-) des eaux souterraines de la zone d'étude.

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

III.3. Analyse en composantes principales « ACP »

Le critère de Kaiser (Kaiser, 1960) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de composantes principales significatifs. Selon ce critère, seulement les composantes ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptées comme sources possibles de variance dans les données. Dans cette étude, l'analyse en composante principale a été portée sur 12 variables (T, pH, CE, TH, Ca²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, NO₃⁻) et 15 forages d'eau (individus). Les quatre principaux axes factoriels (F1, F2, F3 et F4) sont représentés dans le [Tableau. III.2](#). Ces quatre axes représentent 83.09% de la variabilité totale ([Figure III.1](#)).

Le premier facteur (F1) exprime 31,31% de la variance totale, il est déterminé par la majeure partie des éléments chimiques (CE, Ca²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) est représenté donc un axe de minéralisation évaporitiques et salifère ([Figure III.2](#) et [Tableau. III.3](#)).

Le facteur (F2) représente 28,80% de la variance totale et montre des charges (loading) positives et élevées en EC, positives et modérées en Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et pH ([Tableau. III.3](#)). En outre le F2 présente des charges négatives fortes en T et Na⁺ et négatives modérées en NO₃⁻. La corrélation de NO₃⁻ avec ce facteur reflète la contribution des activités agricoles (utilisation des engrais chimiques) ([Figure III.2](#)).

Le facteur (F3) décrit 12,93% de la variance totale, et présente des charges positives et élevées en HCO₃⁻ et négatives modérées en K⁺ ([Tableau. III.3](#)). La corrélation de HCO₃⁻ avec le facteur F3 s'explique par la contribution des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) au chimisme des eaux souterraines par dissolution ([Figure III.3](#)).

Le facteur (F4) présent 10.05% de la variance totale et présente des charges négatives et élevées en NH₄⁺ ([Tableau. III.3](#)). La corrélation de NH₄⁺ avec F4 indiquerait la l'impact des activités humaines dans la zone d'études ([Figure III.4](#)).

Tableau. III.2: valeurs propres des composantes principales.

| | Valeurpropre | % variabilité | Valeur propre cumulée | % variabilité cumulée |
|-----------|--------------|---------------|-----------------------|-----------------------|
| F1 | 3.76 | 31.31 | 3.76 | 31.31 |
| F2 | 3.46 | 28.80 | 7.21 | 60.11 |
| F3 | 1.55 | 12.93 | 8.76 | 73.04 |
| F4 | 1.21 | 10.05 | 9.97 | 83.09 |

**CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES
PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES**

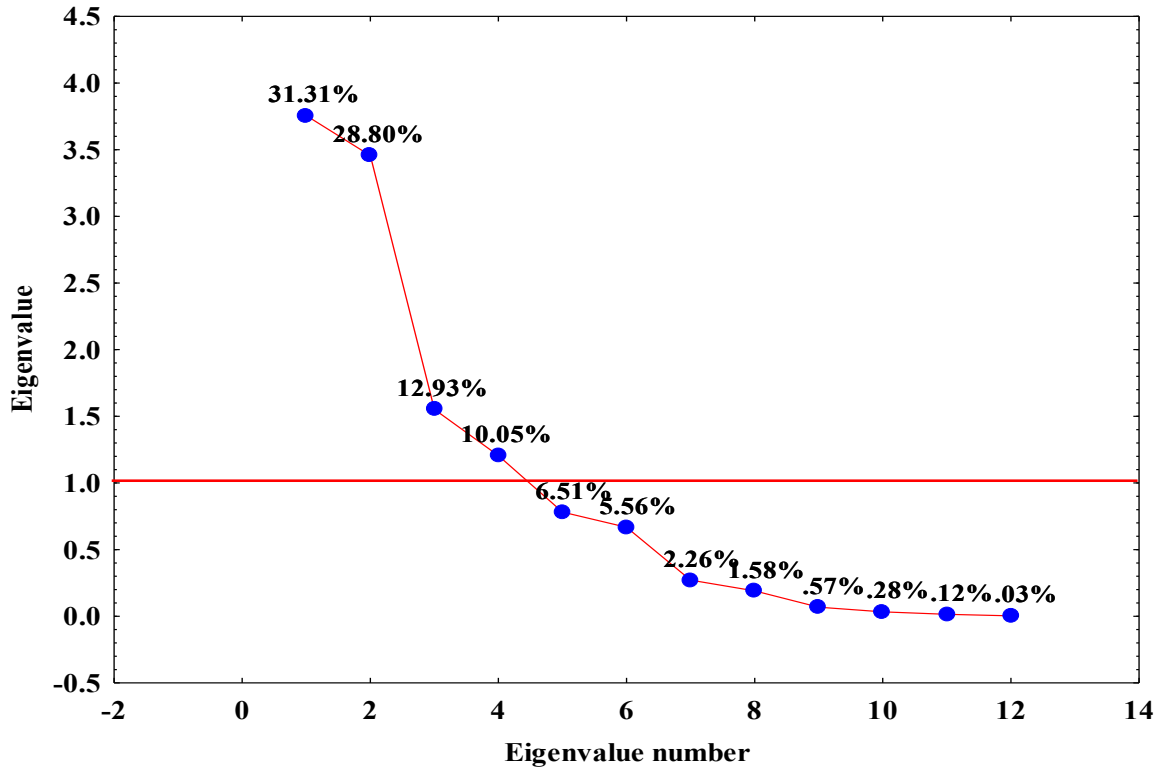


Figure III.1 : Valeurs propres de la matrice de corrélation (Kaiser, 1960)

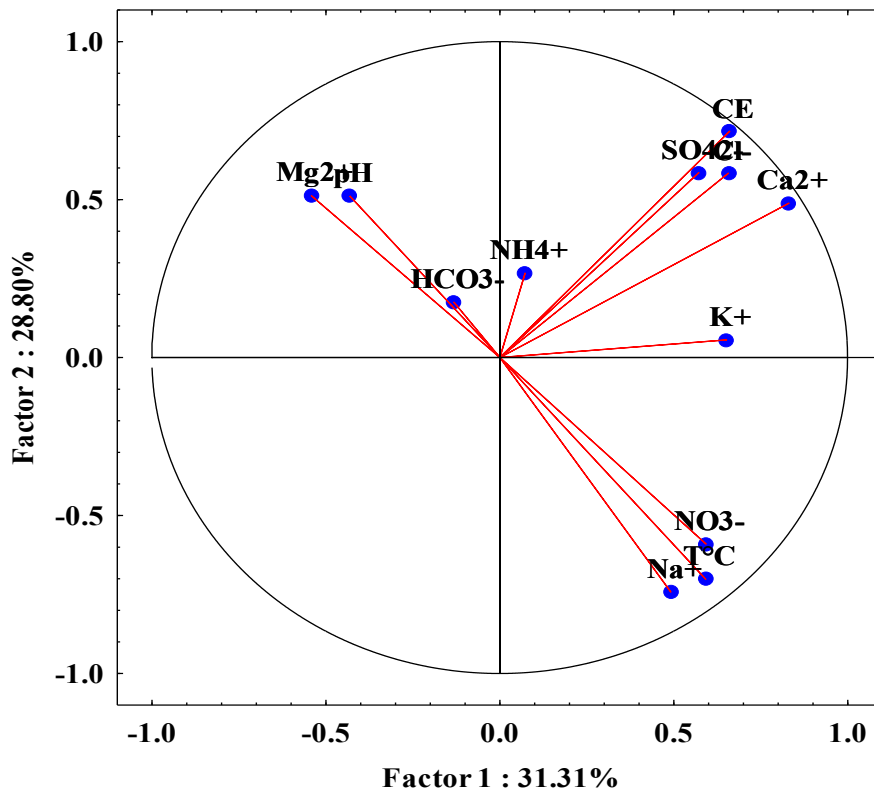


Figure III.2 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.

**CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES
PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES**

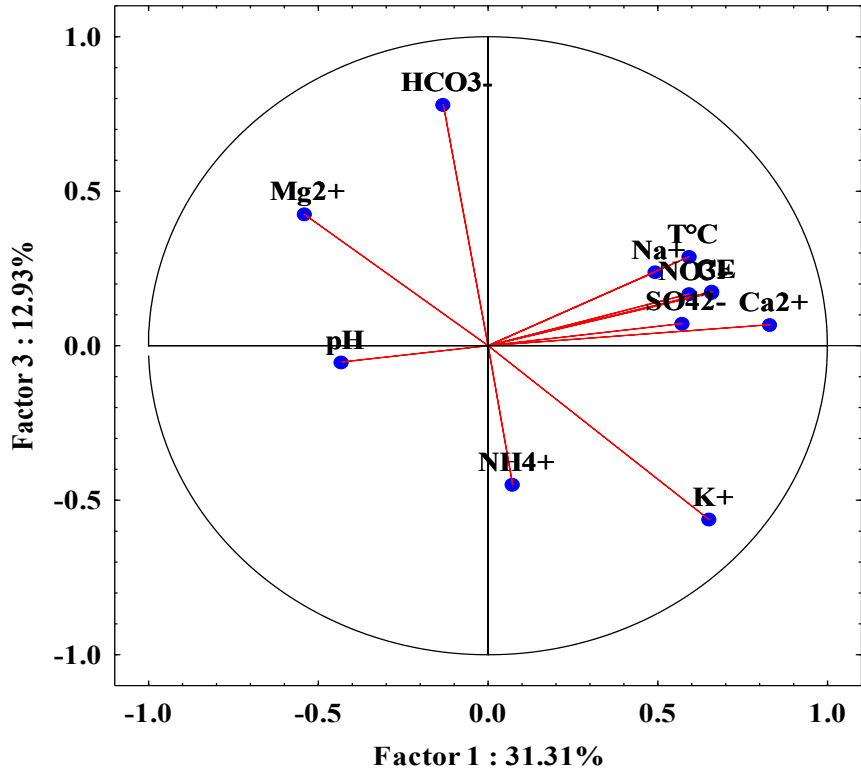


Figure III.3 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F3.

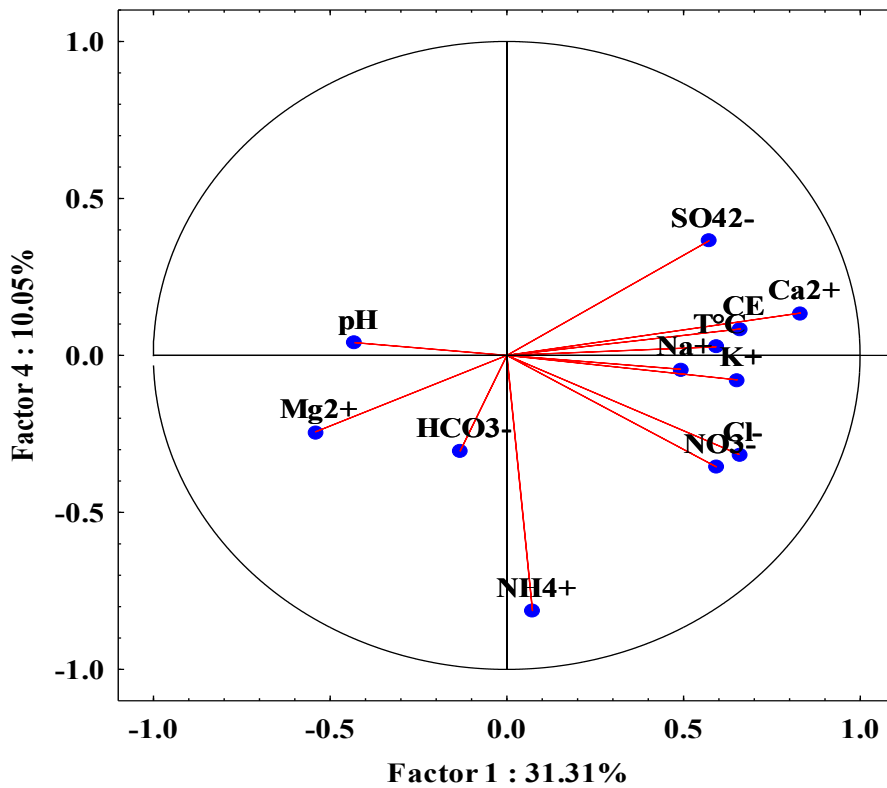


Figure III.4 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F4.

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

Tableau. III.3 : Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1, F2, F3 et F4

| | Factor 1 | Factor 2 | Factor 3 | Factor 4 |
|-------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| T°C | <u>0.59</u> | <u>-0.70</u> | 0.29 | 0.03 |
| Ph | -0.43 | 0.51 | -0.05 | 0.04 |
| CE | <u>0.66</u> | <u>0.72</u> | 0.17 | 0.08 |
| Ca | <u>0.83</u> | 0.49 | 0.07 | 0.13 |
| Mg | -0.54 | 0.51 | 0.43 | -0.24 |
| Na | 0.49 | <u>-0.74</u> | 0.24 | -0.04 |
| K | <u>0.65</u> | 0.06 | <u>-0.56</u> | -0.08 |
| NH4 | 0.07 | 0.27 | -0.45 | <u>-0.81</u> |
| HCO3- | -0.13 | 0.18 | <u>0.78</u> | -0.30 |
| Cl | <u>0.66</u> | <u>0.58</u> | 0.17 | -0.31 |
| SO4 | <u>0.57</u> | <u>0.59</u> | 0.07 | 0.37 |
| NO3 | <u>0.59</u> | <u>-0.59</u> | 0.17 | -0.35 |

III.4. Projection des individus sur les plans factoriels

La représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques (Figures III.5 et III.6) montre la répartition des forages d'eau en fonction des différents facteurs F1-F2. L'analyse de ce graphe a montré trois principaux groupes des points d'eau :

- **Groupe 1:** situé positivement par rapport à l'axe F1-F2, il est constitué par les forages (FOS22, FOS11), et concerne 13,33% des forages d'eau. Les eaux de ce groupe sont caractérisées par une eau fortement minéralisée, avec une valeur moyenne de TDS d'environ 1064 mg/l.
- **Groupe 2:** situé du côté positive de l'axe F1-F2 et constitué par les forages: (FOS16AP et FOS7) correspond à 13,33% des points d'eau. Ce groupe est caractérisé par des eaux modérément minéralisées, avec une valeur moyenne de TDS d'environ 435 mg/l.
- **Groupe 3:** situé du côté négatif de l'axe F1-F2 et constitué par la majorité des forages d'eau (FOS1, FOS2, FOS3, FOS4, FOS5, FOS9, FOS10, FOS14, FOS16, FOS17, et FOS19), ce qui représente 73,33% des points d'eau. Il est à signaler que les eaux de ce groupe sont caractérisées par une faible minéralisation, avec une valeur de TDS de 369 mg/l.

**CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES
PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES**

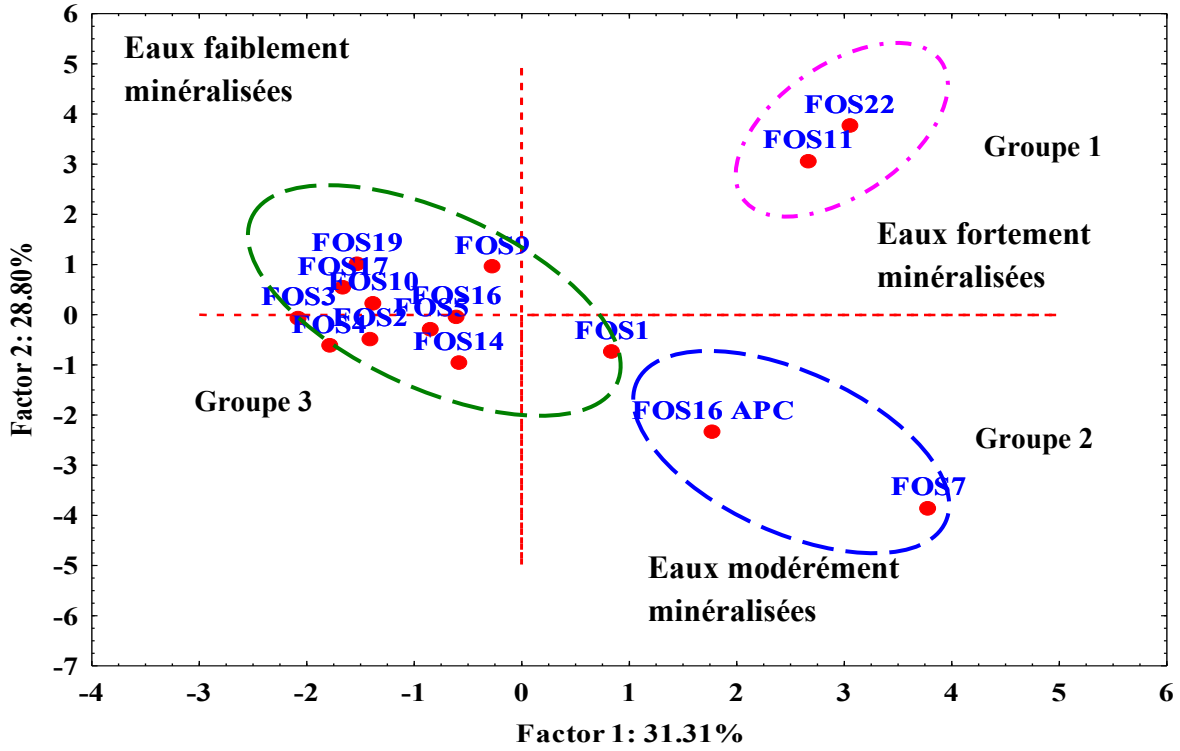


Figure III.5 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2.

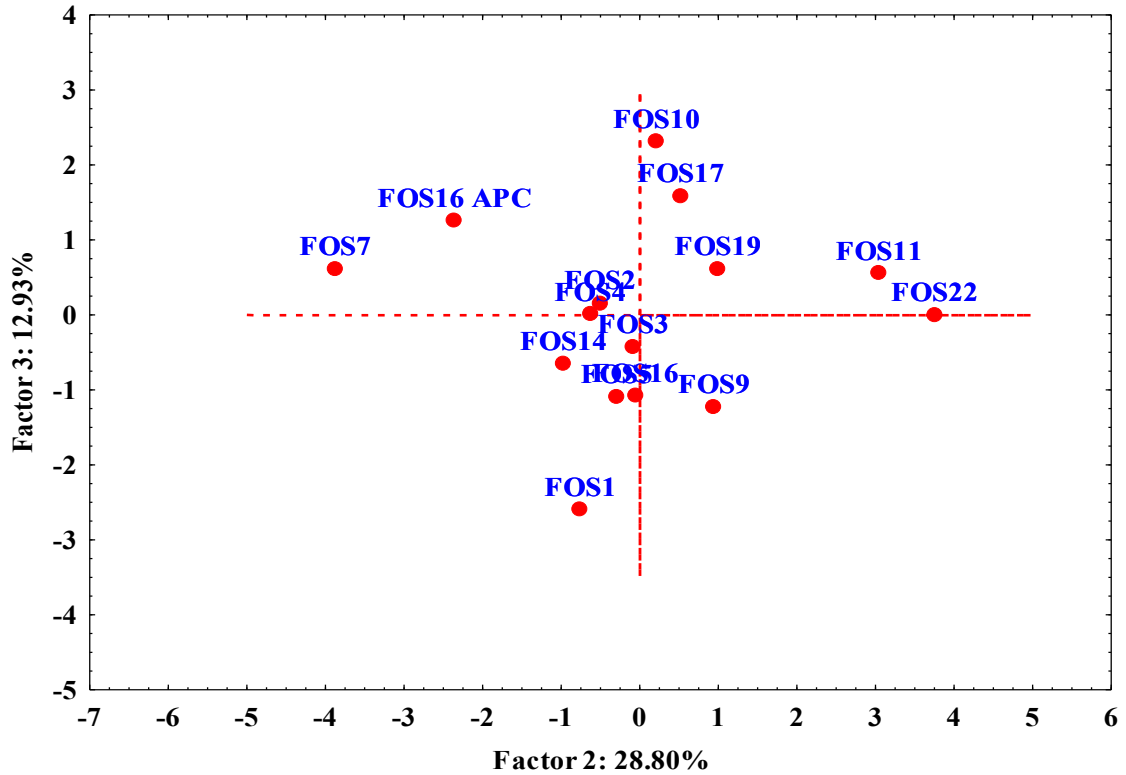


Figure III.6 : Projection des individus sur le plan factoriel F2-F3.

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

III.5. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

III.5.1. Le dendrogramme des variables

Dans l'analyse (CAH) des variables ont été utilisées 12 variables physico-chimiques (T, Na⁺, NO₃⁻, pH, Mg²⁺, HCO₃⁻, CE, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺, NH₄⁺). Le dendrogramme des variables est illustrée à la [Figure III. 7](#).

- Le **cluster 1** est déterminé par la température (T), Na⁺ et NO₃⁻. Ce cluster met en évidence l'impact de l'activité agricole (utilisation des engrais chimiques).
- Le **cluster 2** est déterminé par pH, Mg²⁺, HCO₃⁻. Ce cluster reflète l'influence de processus de dissolution des minéraux carbonatés (dolomite) sur la composition chimique des eaux souterraines de la zone d'étude.
- Le **cluster 3** est déterminé par CE, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺ et NH₄⁺. Ce cluster traduit l'impact de processus de dissolution des minéraux évaporitiques (gypse/ou anhydrite, sylvite (KCl), ainsi que l'influence des activités humaines (rejets des eaux usées sans traitements préalable) sur la qualité chimique des eaux souterraines de la zone d'étude.

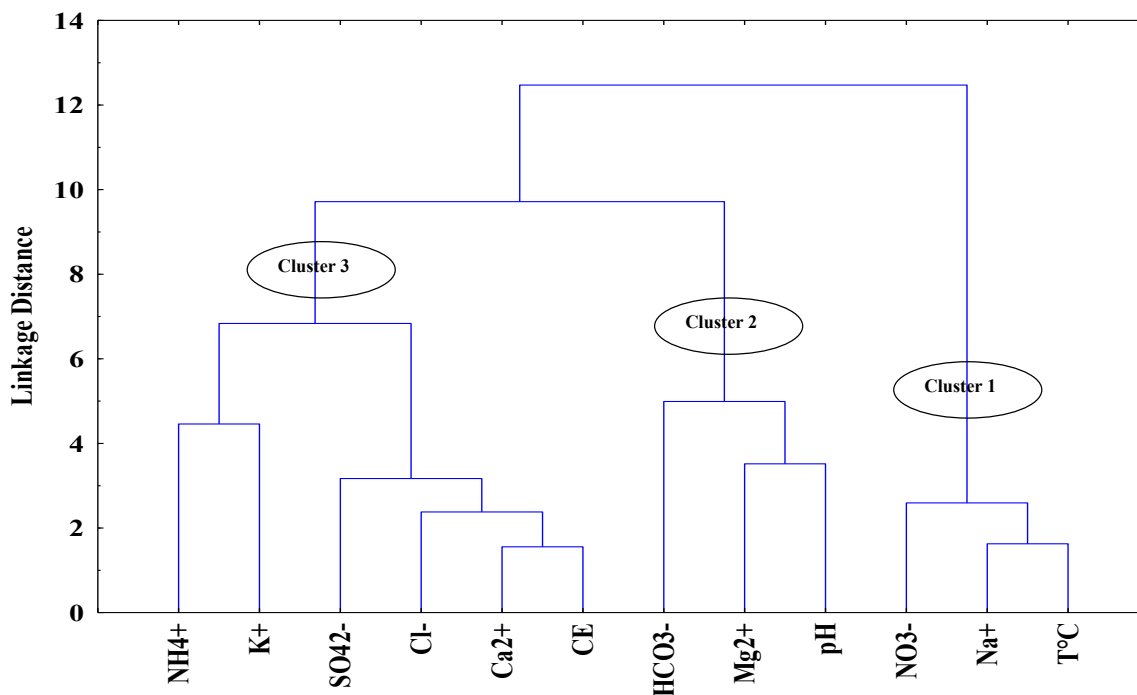


Figure III.7 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux souterraines (Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025))

III.5.2. Le dendrogramme des individus

L'application de la méthode de classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur l'ensemble de 15 forages est illustrée à la [Figure III. 8](#). Le dendrogramme des individus montre trois clusters avec des caractéristiques distinctes. De plus, les compositions élémentaires des échantillons d'eau par cluster ont été moyennées et résumées dans le [Tableau III. 4](#).

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

- **Clusters 1** : est composé de 2 forages (FOS11 et FOS22) (13,3%), il est caractérisé par une minéralisation moyenne relativement élevée (TDS=1064 mg/l) et une valeur moyenne de la conductivité électrique d'environ 2123 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de ce cluster sont caractérisées par des concentrations en Ca^{2+} (moyenne : 158.8 mg/l), Na^+ (moyenne : 62 mg/l), SO_4^{2-} (moyenne : 222,9 mg/l), Cl^- (moyenne : 127,8 mg/l), HCO_3^- (moyenne : 216,6 mg/l). Le principale faciès hydrochimique de ce cluster est sulfaté calcique (Ca-SO_4^{2-}) (Figures III.9 et III.10). Ces eaux montrent bien l'influence des processus d'interaction eau-roche et temps de résidence sur l'augmentation de la minéralisation de ces eaux (Hchaichi, 2016).
- **Clusters 2** : comprend 2 forages (FOS7 et FOS16 APC) et représente 13,3%. Ce cluster qui caractérise les eaux faiblement minéralisées (TDS : moyenne de 435 mg/l), avec une conductivité électrique moyenne de 871,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le cation dominant est Na^+ (moyenne: 91,4 mg/l) et Ca^{2+} (moyenne : 89,7 mg/l) tandis que HCO_3^- (moyenne : 210,5 mg/l), et SO_4^{2-} (moyenne : 125 mg/l) sont les anions dominants. Le faciès hydrochimique de ce cluster est type bicarbonaté calcique (Ca-HCO_3^-) (Figures III.9 et III.10).

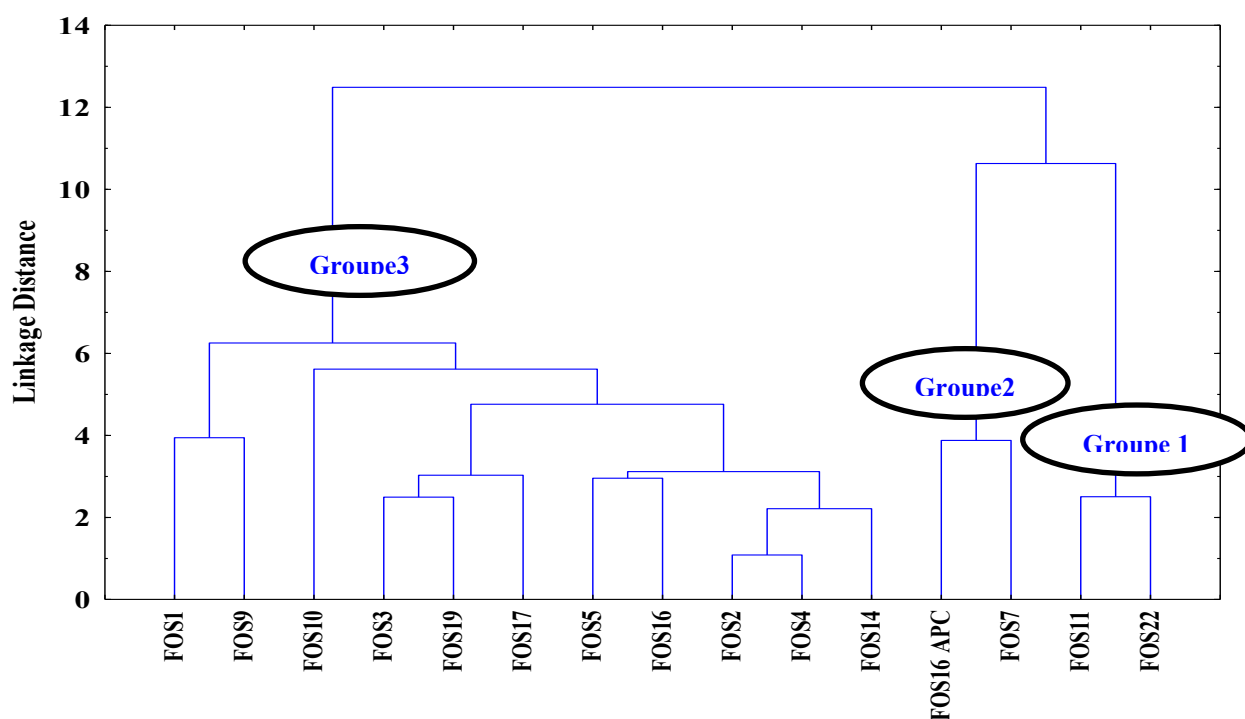


Figure III.8 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des échantillons d'eau souterraine (Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025))

Clusters 3 : contient 11 forages (FOS1, FOS2, FOS3, FOS4, FOS5, FOS9, FOS10, FOS14, FOS16, FOS17, et FOS19) et représente 73,3%. Il est caractérisé par des eaux faiblement minéralisées (TDS : moyenne de 369 mg/l), avec une conductivité électrique moyenne de 720,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de ces clusters sont caractérisées par des concentrations en Na^+ (moyenne : 65,5 mg/L) et Ca^{2+} (moyenne : 54,9 mg/l), HCO_3^-

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

(moyenne : 211,7 mg/L). Ce cluster est caractérisé par un faciès hydrochimique bicarbonaté magnésien (Mg-HCO₃) (Figures III.9 et III.10). En outre ce cluster enregistre des valeurs très basses dans tous les paramètres contrôlés et correspond à des eaux de bonne qualité.

Tableau III.4. Statistique descriptive des paramètres hydrochimiques majeurs pour les principaux groupes (Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)).

| Variables | Group 1(N=2) | | | Groupe 2(N=2) | | | Group 3(N=11) | | |
|--------------------------------------|--------------|---------|---------|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Minimum | Maximum | Moyenne | Minimum | Maximum | Moyenne | Minimum | Maximum | Moyenne |
| T°C | 17.1 | 17.2 | 17.2 | 24.2 | 26.3 | 25.3 | 17.1 | 17.4 | 17.3 |
| Ph | 7.1 | 7.4 | 7.3 | 6.9 | 7.1 | 7.0 | 7.1 | 7.6 | 7.3 |
| CE (µS/cm) | 1986.0 | 2260.0 | 2123.0 | 844.0 | 899.0 | 871.5 | 574.0 | 892.0 | 720.3 |
| TDS (mg/L) | 997.0 | 1131.0 | 1064.0 | 422.0 | 448.0 | 435.0 | 287.0 | 498.0 | 369.0 |
| Ca ²⁺ (mg/L) | 151.7 | 166.0 | 158.8 | 89.4 | 90.0 | 89.7 | 35.1 | 83.0 | 54.9 |
| Mg ²⁺ (mg/L) | 40.8 | 48.0 | 44.4 | 23.0 | 28.8 | 25.9 | 16.1 | 61.4 | 45.2 |
| Na ⁺ (mg/L) | 60.0 | 64.0 | 62.0 | 82.8 | 100.0 | 91.4 | 60.0 | 72.0 | 65.5 |
| K ⁺ (mg/L) | 6.0 | 7.0 | 6.5 | 5.0 | 7.0 | 6.0 | 4.0 | 7.0 | 5.4 |
| NH ₄ ⁺ (mg/L) | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.6 | 0.2 |
| HCO ₃ ⁻ (mg/L) | 213.5 | 219.6 | 216.6 | 207.4 | 213.5 | 210.5 | 195.2 | 274.5 | 211.7 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 127.8 | 127.8 | 127.8 | 85.2 | 88.8 | 87.0 | 49.7 | 102.2 | 75.5 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 216.0 | 229.9 | 222.9 | 120.0 | 129.9 | 125.0 | 62.4 | 163.2 | 111.1 |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 0.7 | 9.1 | 4.9 | 12.8 | 31.6 | 22.2 | 0.1 | 12.4 | 5.1 |
| TH(mg/L) | 576.0 | 582.3 | 579.2 | 318.0 | 343.1 | 330.5 | 273.5 | 395.9 | 322.5 |

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

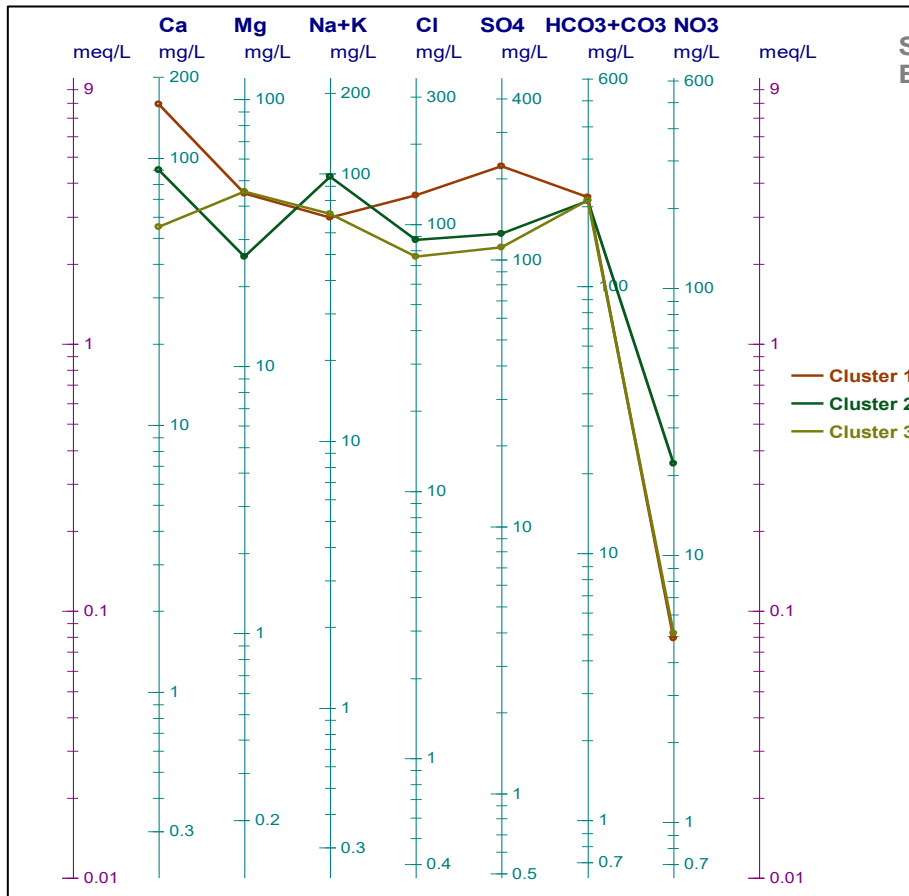


Figure III.9: Représentation des trois groupes d'eaux (CAH) sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff.

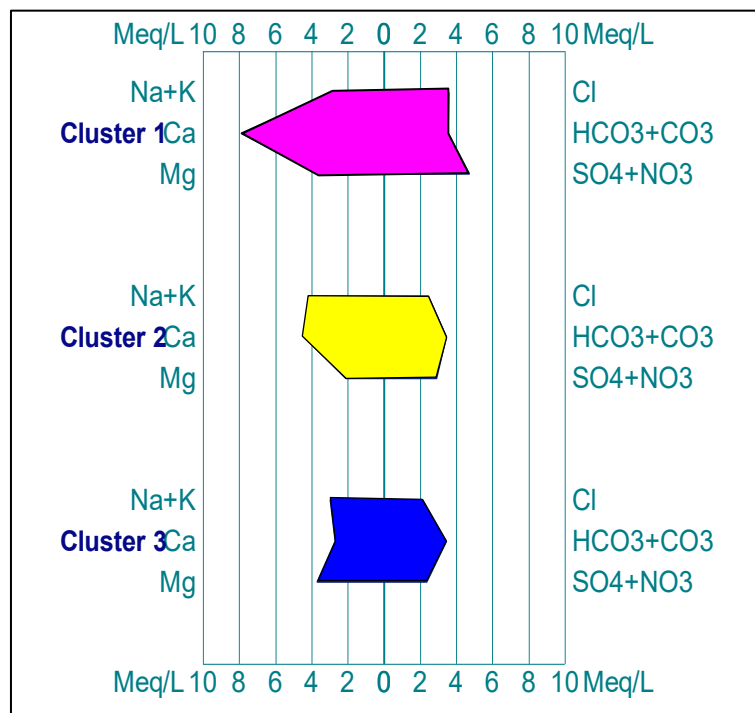


Figure III.10 : Représentation des trois groupes d'eaux (CAH) sur le diagramme de Stiff.

CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

III.6. Conclusion

L'application de l'ACP (espace des variables) a permis l'identification de quatre facteurs: (1) le processus de dissolution des minéraux évaporitiques (gypse/ et ou l'anhydrite, la sylvite et chlorure de calcium) régissant l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude; (2) L'impact des activités agricoles (utilisation des engrais chimiques) sur le chimisme des eaux souterraines; (3) le processus de dissolution des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) (interaction eau-roche); (4) l'impact des activités humaines (rejets des eaux usées urbaines sans épuration) dans la zone d'études. En outre L'application de l'ACP (espace des individus) nous a permis de classer les échantillons en trois groupes, en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisée. L'analyse en clusters hiérarchiques a regroupé les forages de la zone d'étude en trois groupes principaux présentant des caractéristiques hydrochimiques similaires sur la base des paramètres physicochimiques et a permis d'élucider la composition et les origines communes. Il est à signaler que l'approche statistique multivariée a permis de confirmer et compléter les résultats de l'étude hydrogéochimique qui a mis en évidence les processus de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines, qui est due à la dissolution des minéraux évaporitiques et carbonatés.

CHAPITRE IV :
CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET
ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX
SOUTERRAINES

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV. 1. Introduction

La compréhension de comportement hydrochimique des eaux souterraines constitue une approche fondamentale dans la prospection hydrogéologique, permettant de caractériser les aquifères (Dakoure, 2003). Les méthodes hydrochimiques ont pour but de mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle des éléments physico-chimiques de l'eau (pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) qui sont intimement liées à la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux dans l'environnement géologique de l'aquifère (Madene, 2021). Les activités humaines ont également un impact significatif sur la qualité des eaux souterraines.

Dans cette étude, les méthodes graphiques utilisés sont les diagrammes de Piper (Piper, 1944), diagramme de Stiff (Stiff, 1951), le diagramme de Schoeller (Schoeller, 1965) et les diagrammes binaires. Le diagramme de Piper est l'un des outils les plus couramment utilisés et les plus fiables dans la détermination des faciès hydrochimique des eaux. Le couplage de ces méthodes permet de déterminer les faciès chimiques ainsi que la classification des eaux, ce qui est essentiel pour évaluer la qualité de l'eau pour la consommation humaine, l'irrigation et l'industrie et identifier les sources potentielles de pollution afin de prendre les mesures appropriées pour la protection des ressources en eau et de l'environnement (Khadri, 2024).

Ce chapitre est consacré à la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines de champ de captage d'Oued Seddeur dans la wilaya de Djelfa à partir de l'ensemble des paramètres physico-chimiques mesurés in situ ou analysés au laboratoire, qui sont au nombre de 12 paramètres (T, pH, CE, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^-) et 15 forages d'eau. En outre, l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines de la zone d'étude s'est basée sur le calcul des indices de qualité de l'eau (WQI). L'application de l'WQI constitue un outil important pour évaluer l'adéquation des eaux à des fins de consommation. Les résultats obtenus seront comparés aux normes de potabilité fixés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ainsi que les normes nationales recommandées par l'Algérie (JORA, 2011).

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.2. Étude hydrochimique des eaux souterraines

Tableau IV.1: Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

| Paramètres | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart type | Coef de variation (%) | Norme Algérienne | Norme OMS |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|------------|-----------------------|------------------|-----------|
| pH | 6.86 | 7.63 | 7.25 | 0.21 | 2.90 | 9 | 9.5 |
| T (°C) | 17.10 | 26.30 | 18.31 | 2.85 | 15.57 | 25 | 25 |
| CE (µS/cm) | 574.0 | 2260.0 | 927.47 | 500.69 | 53.98 | 2800 | 1500 |
| TDS (mg/L) | 287.00 | 1131.00 | 470.47 | 250.65 | 53.28 | 1500 | 1000 |
| Ca ²⁺ (mg/L) | 35.13 | 166.00 | 73.43 | 39.61 | 53.94 | 200 | 200 |
| Mg ²⁺ (mg/L) | 16.08 | 61.43 | 42.49 | 13.46 | 31.68 | 150 | 50 |
| Na ⁺ (mg/L) | 60.00 | 100.00 | 68.52 | 10.62 | 15.50 | 200 | 200 |
| K ⁺ (mg/L) | 3.99 | 6.98 | 5.65 | 0.90 | 15.93 | 12 | 12 |
| NH ₄ ⁺ (mg/L) | 0.00 | 0.62 | 0.16 | 0.18 | 112.50 | 0,5 | 0,5 |
| SO ₄ ²⁻ (mg/L) | 62.40 | 229.86 | 127.87 | 45.76 | 35.79 | 400 | 250 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 49.70 | 127.80 | 83.99 | 22.70 | 27.03 | 500.00 | 250 |
| HCO ₃ ⁻ (mg/L) | 195.20 | 274.50 | 212.22 | 19.36 | 9.12 | - | - |
| NO ₃ ⁻ (mg/L) | 0.13 | 31.56 | 7.37 | 7.88 | 106.92 | 50 | 50 |
| TH (mg/L CaCO ₃) | 273.51 | 582.28 | 357.79 | 98.33 | 274.74 | 500.00 | 300.00 |

IV.2.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux

IV.2.1.1. Résultats des analyses physiques

La température (°C)

Les valeurs de la température de l'eau varient de 17,10 et 26,30°C, avec une moyenne de 18,31°C, un écart type de 2,85 et un coefficient de variation de 15,54% (Figure IV.1). Il est à signaler que 93,33% des échantillons d'eau sont conformes ou normes de potabilité recommandées par l'OMS et l'Algérie (25°C) (Tableau IV.1).

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

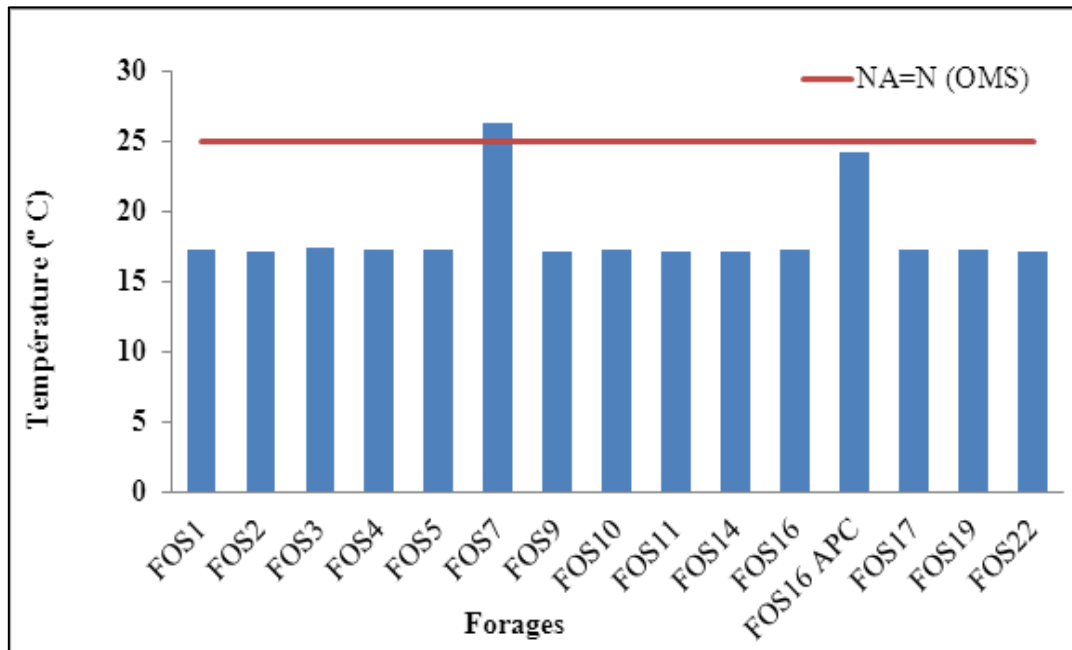


Figure IV.1 : Variation de la température des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

Le potentiel hydrogène (pH)

La zone d’étude est caractérisée par des eaux alcalines. En effet les valeurs de leur pH sont comprises entre 6,86 et 7,63 avec une moyenne de 7,25 (Figure IV.2). Les valeurs du pH (Tableau IV.1) montrent que tous les points d’eau se trouvent dans l’intervalle de la norme Algérienne (6,5 à 9) et OMS (6,5 à 8,5) de la potabilité.

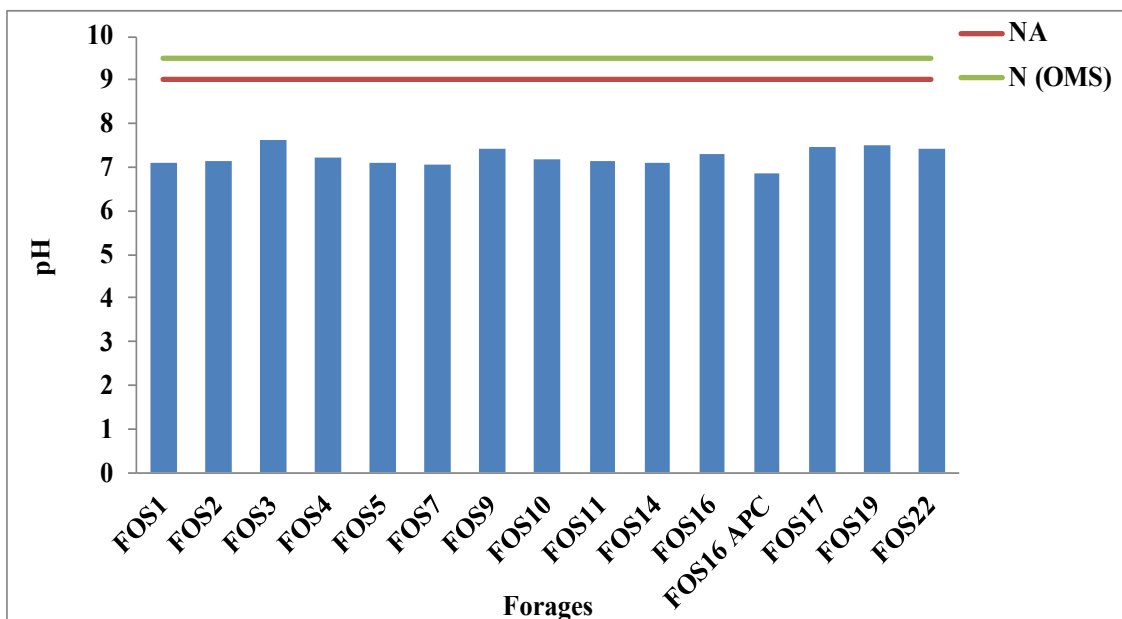


Figure IV.2 : Variation du pH des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

La conductivité électrique (CE)

Les valeurs de la CE sont comprises entre 574 μ S/cm et 2260 μ S/cm avec une moyenne 927,47 μ S/cm (Tableau IV.1 et Figure IV.3). Les valeurs de CE enregistrées au niveau des forages (FOS11, FOS22) (13, 33%) dépassent la norme de l’OMS (1500 μ S/cm). Il est à noter que la totalité des eaux des forages respectent les normes algériennes (2800 μ S/cm).

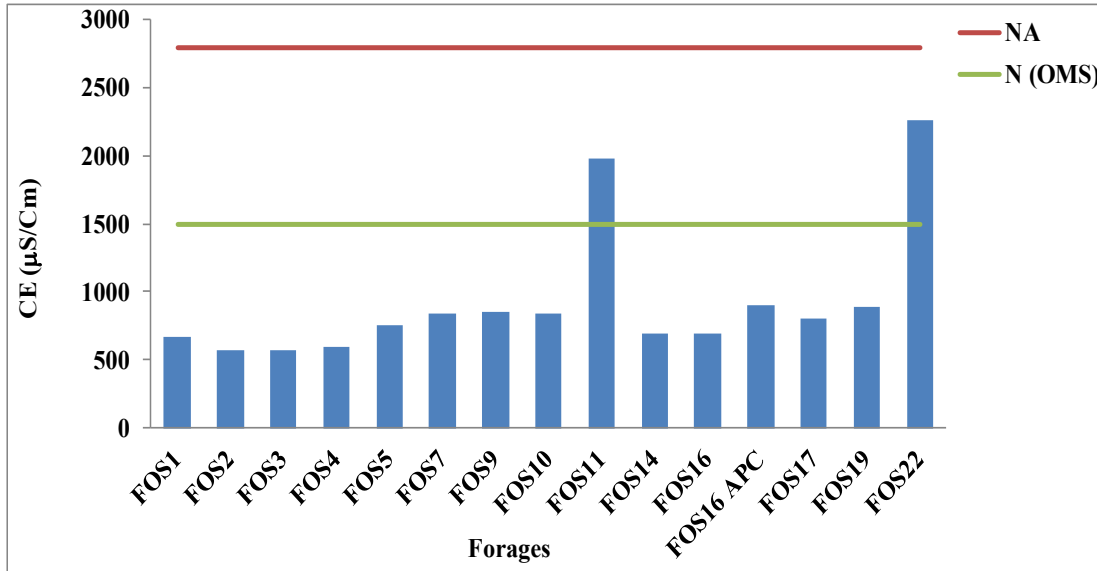


Figure IV.3: Variation de la conductivité électrique (CE) des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

Total Dissolved Solid (TDS)

La concentration de TDS dans les échantillons analysés varie entre 287mg/L et 1131 mg/L, avec une moyenne d'environ 470,47 mg/l, un écart type 250,65 de mg/l et un coefficient de variation d'environ 53,28 % (Figure IV.4).

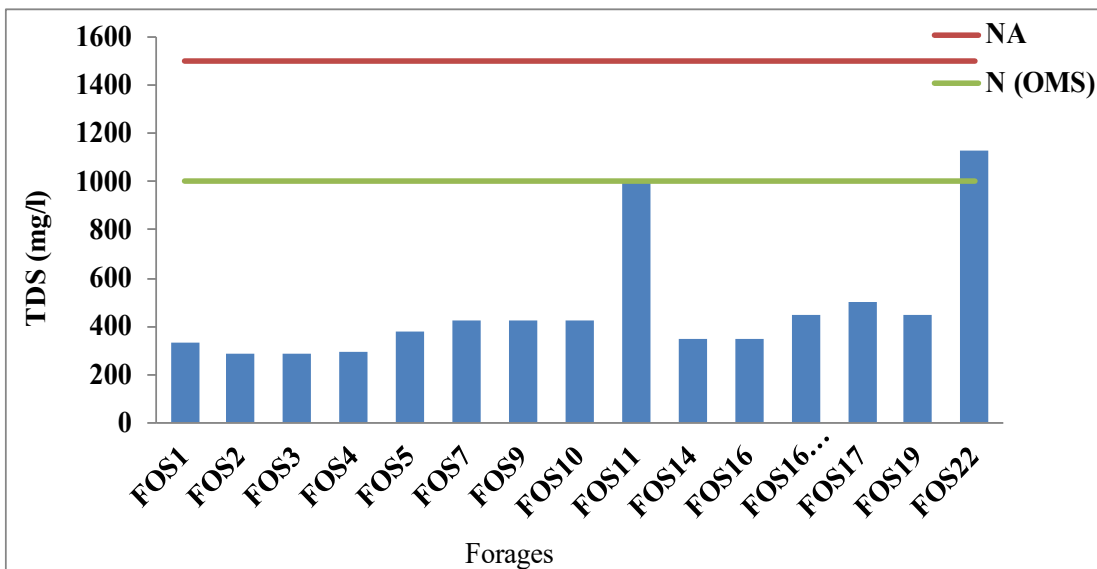


Figure IV.4 : Variation de TDS (Total Dissolved Solid) des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Les concentrations de TDS respectent les limites recommandées par les directives Algériennes (1500 mg/L) (Benadela, 2023). Cependant, les teneurs en TDS des eaux de forage FOS22 dépassent la norme de l'OMS (1000mg/L).

Dureté totale (TH)

Les valeurs de la dureté (TH) sont comprises entre 273,51 mg/L et 582,28mg/L mg/L de CaCO₃, avec une moyenne de 357,79 mg/L de CaCO₃, un écart type de 98,33mg/l et un coefficient de variation égal à 27,48% (Figure IV.5). Il est à noter que les concentrations élevées de TH sont observées au niveau des forages (FOS7, FOS9, FOS10, FOS11, FOS16, FOS16APC, FOS17, FOS19 et FOS22) et dépassant la norme de l'OMS (300 mg/L de CaCO₃). En outre les concentrations en TH des forages (FOS11 et FOS22) dépassent la norme Algérienne estimée à 500mg/L.

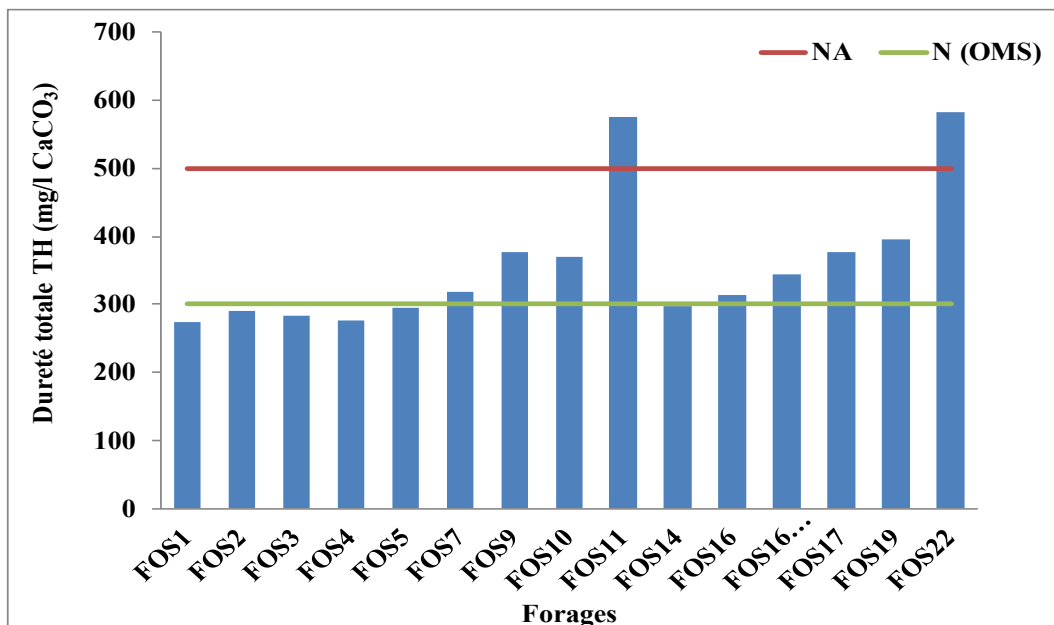


Figure IV.5 : Variation de la dureté totale (TH)des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

IV.2.1.2. Résultats des analyses chimiques

Le calcium (Ca²⁺)

La concentration en calcium dans l'eau souterraine de la zone d'étude se situe entre 35,13mg/L et 166mg/L, avec une moyenne de 73,43 mg/L, un écart type de 39.61 mg/l et un coefficient de variation égal 53.94 % (Figure IV.6). Toutefois, toutes les valeurs mesurées demeurent en dessous des normes Algérienne et de l'OMS (200 mg/L).

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

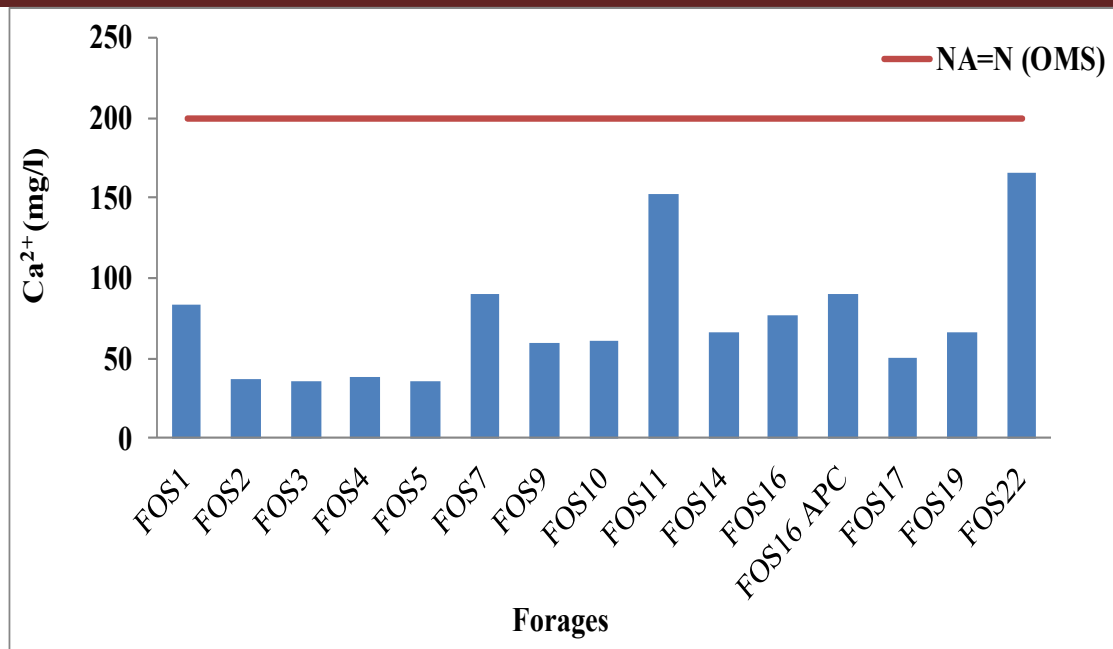


Figure IV. 6 : Variation des concentrations de Ca²⁺ des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

Le Magnésium (Mg²⁺)

Les teneurs en Mg²⁺ dans les eaux souterraines de la zone d’étude oscillent entre 16.08 mg/L et 61.43 mg/L, avec une moyenne de 42.49mg/L, un écart type de 13,46 mg/l et un coefficient de variation égal 31,68% (Figure IV.7). Ces valeurs restent en dessous des normes Algérienne. En revanche les concentrations de Mg²⁺ des forages (FOS9, FOS10, FOS17, et FOS19) dépassent la norme préconisée par l’OMS (50mg/L).

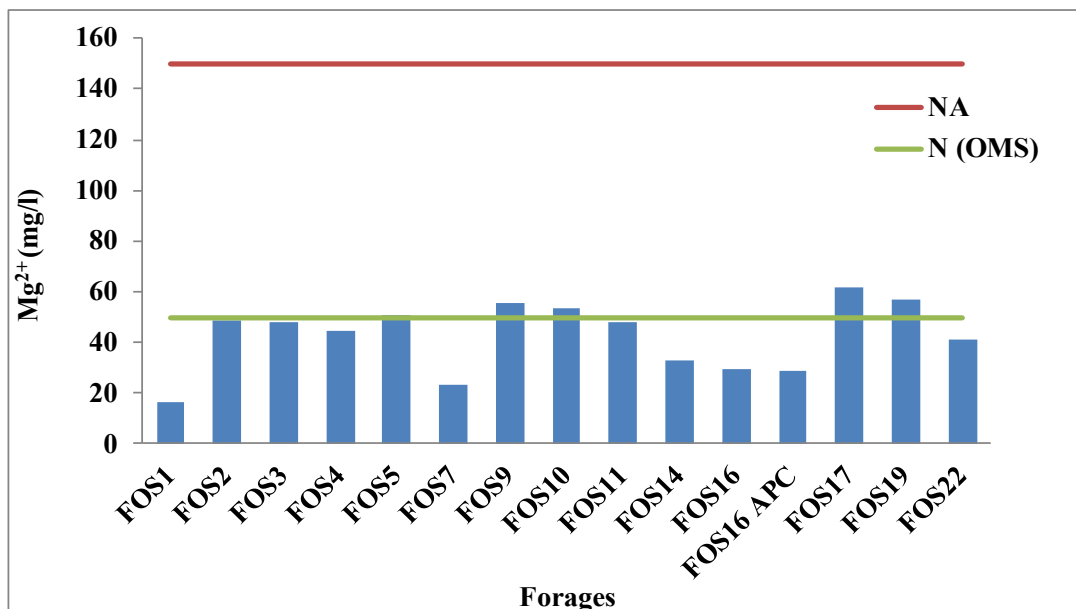


Figure IV.7 : Variation des concentrations de Mg²⁺ des eaux souterraines du champ captant d’Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Le sodium Na^+

La concentration de Na^+ dans les eaux souterraines de la zone d'étude varie entre 60 mg/L et 100mg/L, avec une moyenne de 68,52mg/L, un écart type de 10,62 mg/l et un coefficient de variation égal à 15,5% (Figure IV.8). Cependant, les valeurs de Na^+ ne dépassent pas la norme Algérienne et la norme de l'OMS (200 mg/l).

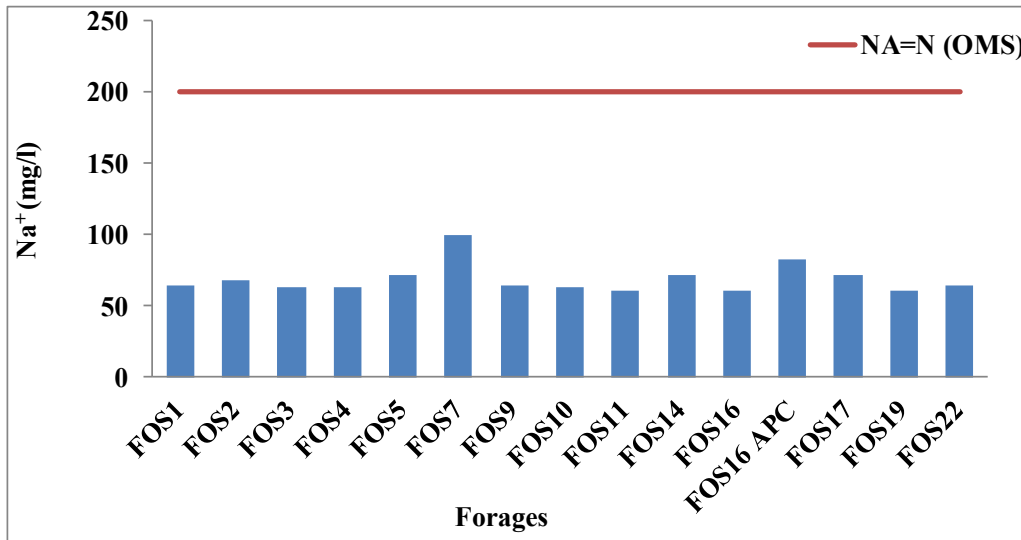


Figure IV.8 : Variation des concentrations de Na^+ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

Le potassium K^+ :

Les teneurs en K^+ varient de 3,99mg/L à 6,98mg/L, avec une moyenne de 5,56mg/L, un écart type de 0,90 mg/l et un coefficient de variation égal à 15,88% (Figure IV.9). Les valeurs mesurées demeurent inférieures aux normes établies par les réglementations Algérienne ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (12mg/L).

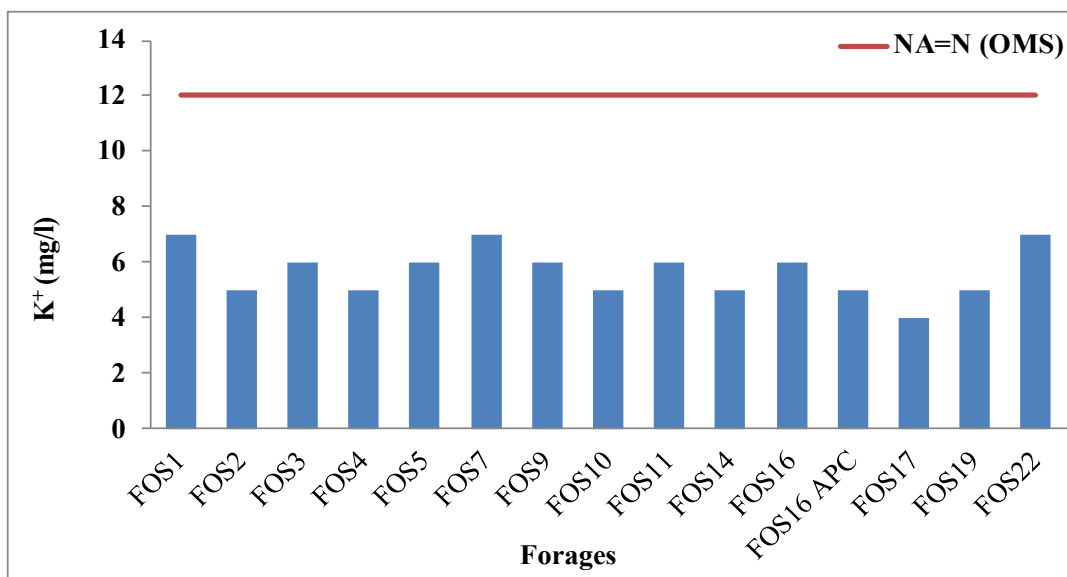


Figure IV.9 : Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Ammonium (NH_4^+)

Les concentrations en NH_4^+ varient entre 0 mg/L et 0,62mg/L, avec une moyenne de 0.16mg/L, un écart type de 0,18 mg/l et un coefficient de variation égal à 111,92% (Figure IV.10). Il est à signaler que la quasi-totalité des points d'eaux (93, 33%) sont conformes aux normes de potabilité fixées par la réglementation Algérienne ainsi que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (0,5 mg/L).

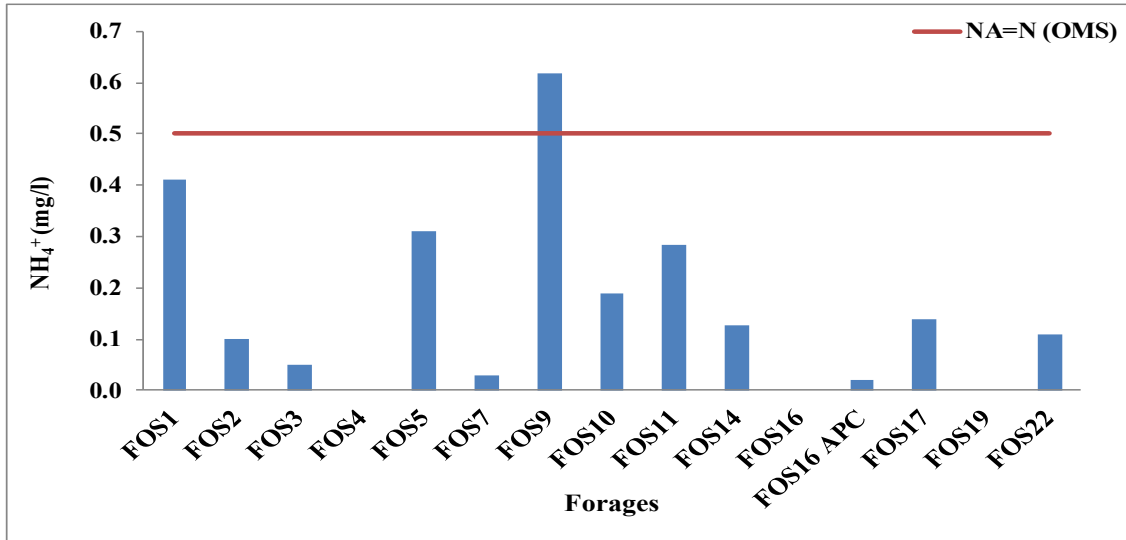


Figure IV.10 : Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

Sulfate (SO_4^{2-})

Les concentrations de SO_4^{2-} sont comprises entre 62.40mg/L et 229.86mg/L, avec une moyenne de 127.87mg/L, un écart type de 45,76mg/l et un coefficient de variation égal à 35,78% (Figure IV.11). Les résultats des analyses révèlent une conformité aux normes Algérienne de 400 mg/L et aux normes de l'OMS de 250 mg/L.

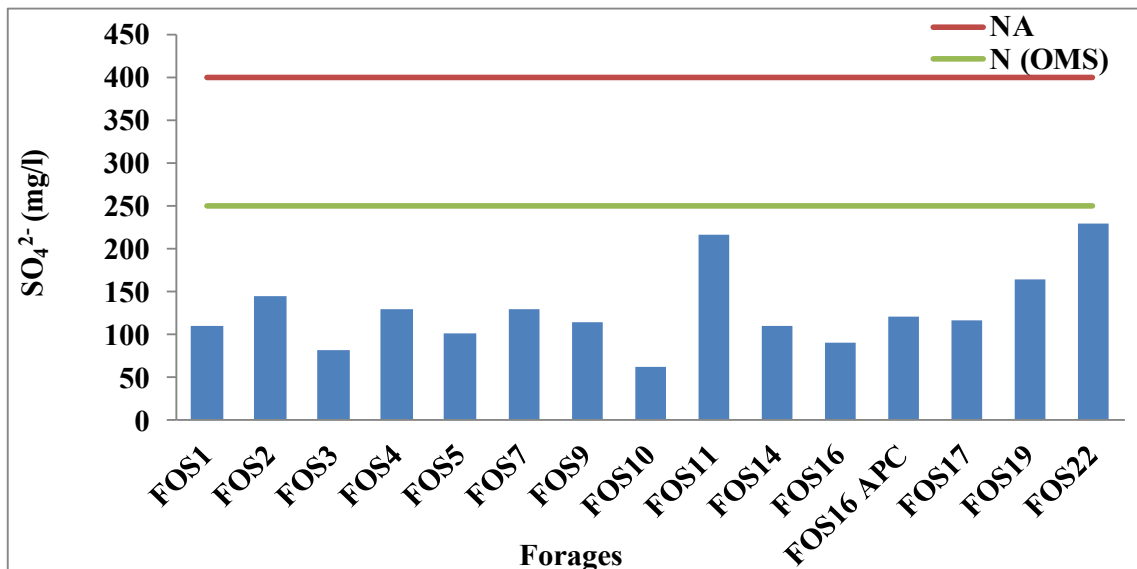


Figure IV.11 : Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Chlorures (Cl⁻)

Les analyses des eaux souterraines de la zone d'étude montrent une concentration moyenne des chlorures de 93,99 mg/L, avec un minimum 49,70 mg/L, un maximum de 127,80 mg/L, un écart type de 22,70 mg/l et un coefficient de variation égal à 27,02% (Figure IV.12). Les résultats des analyses physico-chimiques montrent que les teneurs en Cl⁻ sont conformes aux normes Algérienne de 500 mg/L ainsi qu'aux normes de l'OMS Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui fixent une limite de 250 mg/L.

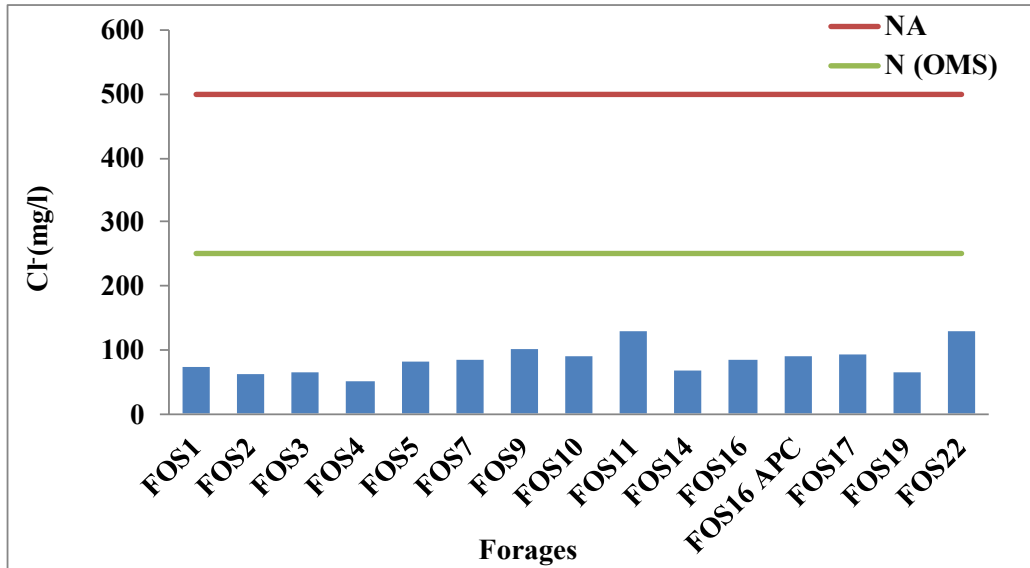


Figure IV.12 : Variation des concentrations de Cl⁻ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

Bicarbonate (HCO₃⁻)

Les teneurs en HCO₃⁻ dans les eaux souterraines varient de 195.20 mg/l à 274.50 mg/l, avec une moyenne de 212,22 mg/L, un écart type de 19.36 mg/l et un coefficient de variation égal à 9.12 % (Figure IV.13).

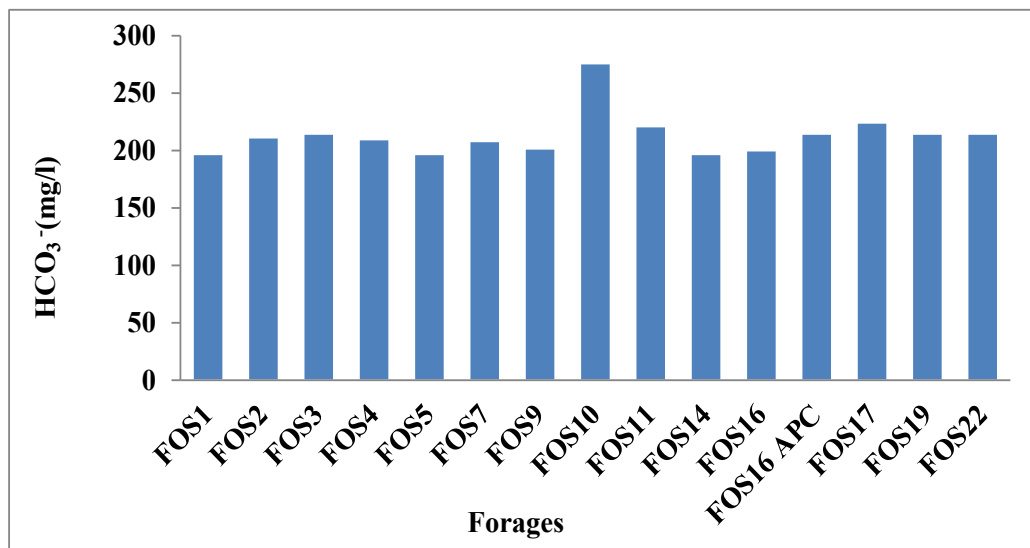


Figure IV.13 : Variation des concentrations de HCO₃⁻ des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Nitrate (NO_3^-)

Les teneurs en NO_3^- dans les eaux souterraines oscillent entre 0,13mg/L et 31.56mg/L, avec une moyenne de 7,37mg/L, un écart type de 7,88 mg/l et un coefficient de variation égal à 106.80% (Figure IV.14). Il est à signaler que la totalité des échantillons d'eau de forage sont conformes aux normes établies par les réglementations Algériennes ainsi qu'aux recommandations de l'OMS (50mg/L).

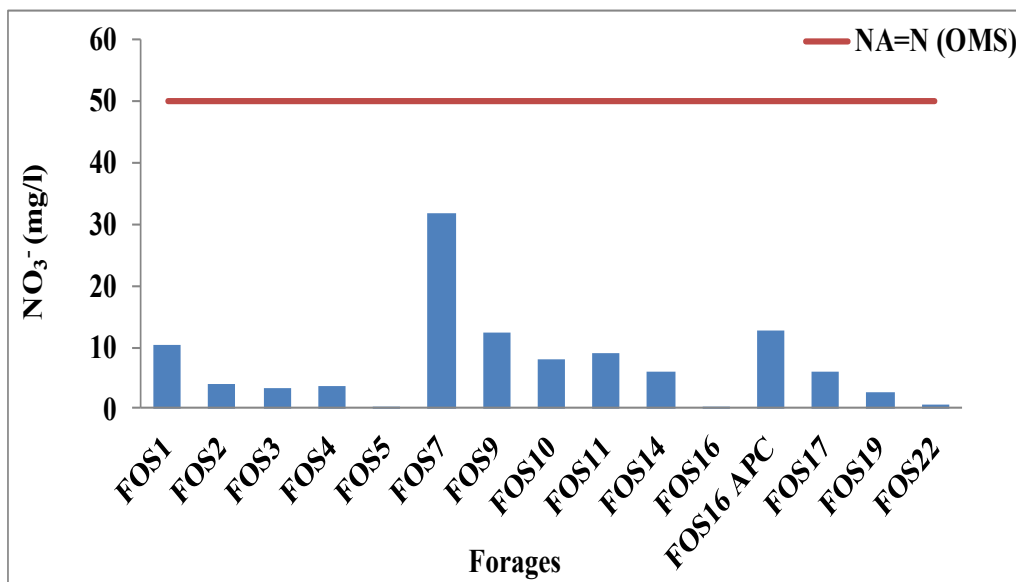


Figure IV.14 : Variation des concentrations de NO_3^- des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

IV.3. Étude des paramètres chimiques (éléments majeurs)

L'abondance des cations est dans l'ordre suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, tandis que l'ordre des anions est $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ (Figure IV.15). Les ions HCO_3^- et SO_4^{2-} sont les principaux anions dans les eaux avec des concentrations moyennes respectives de 212,22 mg/L et 83,99 mg/L (Tableau IV.1).

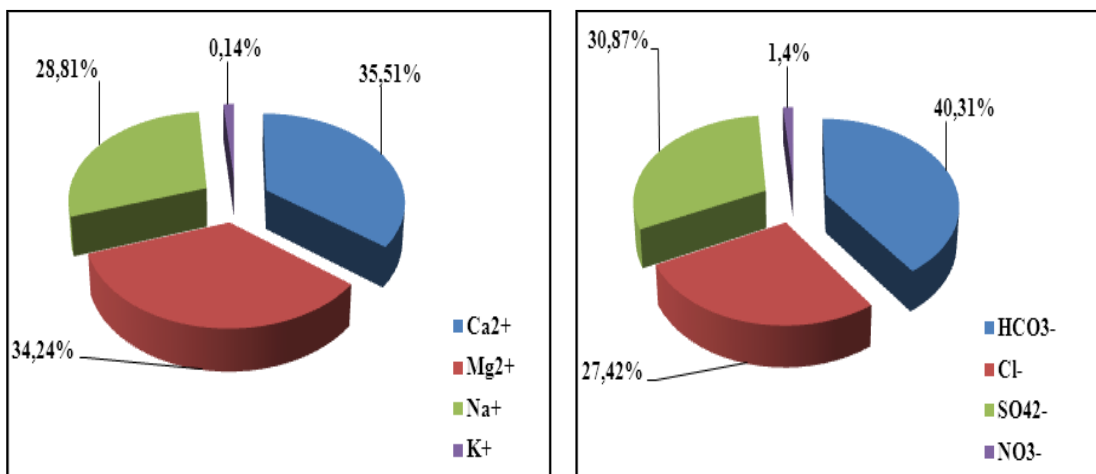


Figure IV.15 : Distribution statistique des anions et cations des eaux souterraines (Oued Seddeur, Octobre 2025)

Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont les principaux cations dans les eaux souterraines avec des teneurs moyennes de 73,43 mg/L pour Ca^{2+} et 42,49mg/L pour le Mg^{2+} .

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.4 Classification des eaux souterraines des eaux souterraines d'Oued Seddeur

IV.4.1. Classification des eaux selon la conductivité électrique (C.E)

Les résultats obtenus montrent que quatre classes d'eau ont été identifiées (Tableau IV.2), environ 86,60% des échantillons d'eau souterraine sont classés dans la « eau très faiblement minéralisée catégorie », 6,70% des échantillons appartiennent à la « eau faiblement minéralisée catégorie » et 6,70% sont de type « eau légèrement minéralisée catégorie ».

Tableau IV.2: Classification des eaux souterraines d'Oued Seddeur selon CE (Detay and Carpenter 1997).

| CE (µS/cm) | Minéralisation | % d'échantillons |
|------------|---------------------------------|------------------|
| < 1000 | Eau très faiblement minéralisée | 86,60 |
| 1000-2000 | Eau faiblement minéralisée | 6,70 |
| 2000-4000 | Eau légèrement minéralisée | 6,70 |
| 4000-6000 | Eau moyennement minéralisée | 0 |
| 6000-10000 | Eau fortement minéralisée | 0 |
| > 10000 | Eau trop minéralisée | 0 |

IV.4.2. Classification des eaux selon les solides totaux dissous (TDS)

Freeze et Cherry (1979) classifient les eaux sur la base de la concentration TDS en quatre catégories : fraîche (TDS < 1000 mg/l), saumâtre (> 1000 mg/l), saline (> 10000 mg/l) et saumure (100000 mg/l). Selon cette classification (Tableau IV.3), 93,3% des eaux souterraines de la zone d'étude appartiennent à l'eausaumâtre et les 6,7% restants à la catégorie d'eau fraîche.

Tableau IV.3: Classification des eaux souterraines d'Oued Seddeur (solides dissous totaux (TDS) (Freeze et Cherry (1979))

| TDS (mg/l) | Classe d'eau | % d'échantillons |
|--------------|--------------|------------------|
| < 1000 | fraîche | 6,7 |
| 1000-10000 | saumâtre | 93,3 |
| 10000-100000 | saline | 0 |
| 100000 | saumure | 0 |

IV.4.3. Classification des eaux selon la dureté totale (TH)

La dureté TH est habituellement exprimée en équivalent de carbonate de calcium (Todd, 1980).

$$TH = Ca^{2+} \times \frac{CaCO_3}{Ca^{2+}} + Mg^{2+} \times \frac{CaCO_3}{Mg^{2+}} \quad (\text{Eq. IV. 1})$$

Où : TH, Ca²⁺ et Mg²⁺ sont mesurés en milligrammes par litre et le rapport en poids équivalent.

$$L'equation peut être réduite à TH = 2,5[Ca^{2+}] + 4,1[Mg^{2+}] \quad (\text{Eq. IV. 2})$$

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Sawyer et McCarty (1967) ont classé l'eau contenant moins de 75 mg/l (CaCO_3) sous forme de solution douce, 75-150 mg/l CaCO_3 est une eau moyennement dure, 150-300 mg/l CaCO_3 eau dure et > 300 mg/l CaCO_3 eau très dure. La dureté totale des eaux souterraines de la zone d'étude, varie entre 273,51 et 582,28 mg/L CaCO_3 avec une moyenne de 357,79 mg/L CaCO_3 . Les résultats obtenus montrent que tous les échantillons étudiés sont classés comme durs (40%) à très durs (60%) (Tableau IV.4). Il est à signaler que l'augmentation des concentrations du calcium et magnésium est due dans la plupart des cas à la présence de la calcite et dolomite dans les formations géologiques encaissantes (Adimalla et Qian, 2019; Sharma et al., 2017).

Tableau IV.4: Classification des eaux souterraines d'Oued Seddeur (Dureté Totale) (Sawyer et McCarty, 1967)

| TH (mg/L CaCO_3) | Classe d'eau | % d'échantillons |
|----------------------------|----------------------|------------------|
| 0 – 75 | Eau douce | 0 |
| 75 – 150 | Eau moyennement dure | 0 |
| 150 - 300 | Eau dure | 40 |
| > 300 | Eau très dure | 60 |

IV.5. Représentation graphique des faciès chimiques :

IV.5.1. Diagramme de Piper :

Le diagramme de Piper est une composante graphique qui permet de visualiser, de manière relative les concentrations en éléments majeurs (Hachaichi, 2016). La représentation des résultats des analyses chimiques des eaux de la zone d'étude sur le diagramme de Piper (Figure IV.16) fait apparaître que la quasi-totalité des points d'eau sont caractérisés par la dominance d'un faciès chlorurée et/ou sulfatée et/ou calcique et/ou magnésienne (Ca-Mg-Cl-SO_4). Les eaux chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne ont une dureté permanente (Hachaichi, 2016). Par ailleurs, les échantillons restants présentent un faciès de type bicarbonaté calcique et magnésienne (Ca-Mg-HCO_3). Par ailleurs concernant le triangle de cation des eaux, la quasi-totalité des points se situent dans la zone de non dominance d'aucun cation, néanmoins on observe une évolution vers le pôle calcique de deux points d'eau. Concernant le triangle des anions, il apparaît que la quasi-totalité des points d'eau se trouve également dans la zone de non dominance d'aucun anion, à l'exception de deux points d'eau.

IV.5.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure III.17) est composé de plusieurs demi-droites verticales sur une échelle logarithmique qui sont réparties de manière équidistante, et sur chacune d'elles un ion est représenté au moyen d'un segment proportionnel à sa concentration en mg/l (Belkendil, 2021). Ce diagramme montre que les cations dominants dans les eaux sont le calcium et le magnésium, tandis que les bicarbonates et les sulfates sont les anions dominants, indiquant un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Les concentrations de chlorures et de sulfates sont modérées, ce qui pointe vers une

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

influence limitée des processus de salinisation. De plus, les faibles niveaux de nitrates signalent l'absence de pollution anthropique importante. Ces observations révèlent que la composition des eaux étudiées est principalement déterminée par la dissolution des formations carbonatées et évaporites

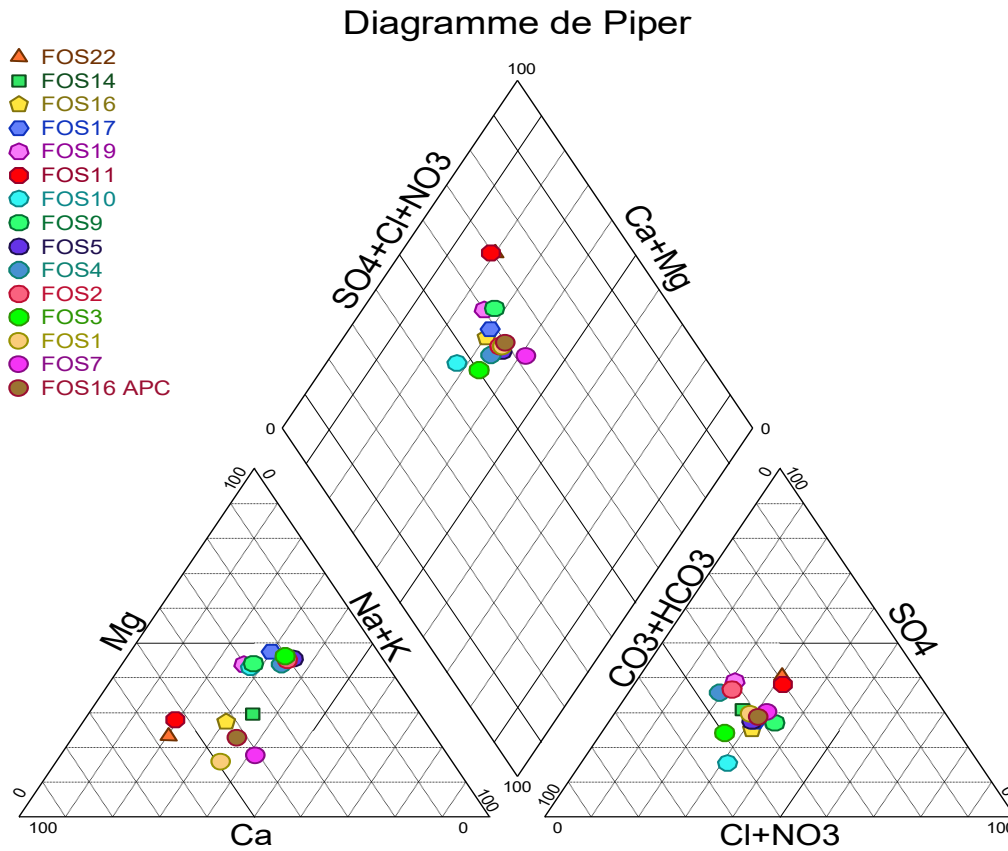


Figure IV.16. Diagramme de Piper des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

IV.5.3. Diagramme de Stabler :

Pour la classification chimique des eaux souterraines, la méthode de Stabler est couramment utilisée. Elle calcule le pourcentage molaire de chaque ion par rapport à la concentration totale des ions de l'eau, en utilisant la formule :

$$r\% = \left(\frac{100}{c}\right) \times r \quad \text{Eq. IV. 3}$$

où r est la quantité de l'ion en még.l^{-1} et c la concentration totale.

Les ions sont classés par ordre décroissant, permettant ainsi de définir les faciès chimiques des eaux analysées (Baaziz; 2025). Le diagramme de Stabler (Figure IV.18 et Tableau IV.5) révèle la prédominance des cations alcalino-terreux (calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+})), ainsi que les anions bicarbonatés (HCO_3^-) et sulfatés (SO_4^{2-}). Les eaux examinées affichent que la majorité des eaux sont caractérisées par un faciès hydrochimique de type bicarbonaté calcique et bicarbonaté magnésien, ce qui indique l'impact de la dissolution des formations carbonatées, tels que les calcaires et les dolomies.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

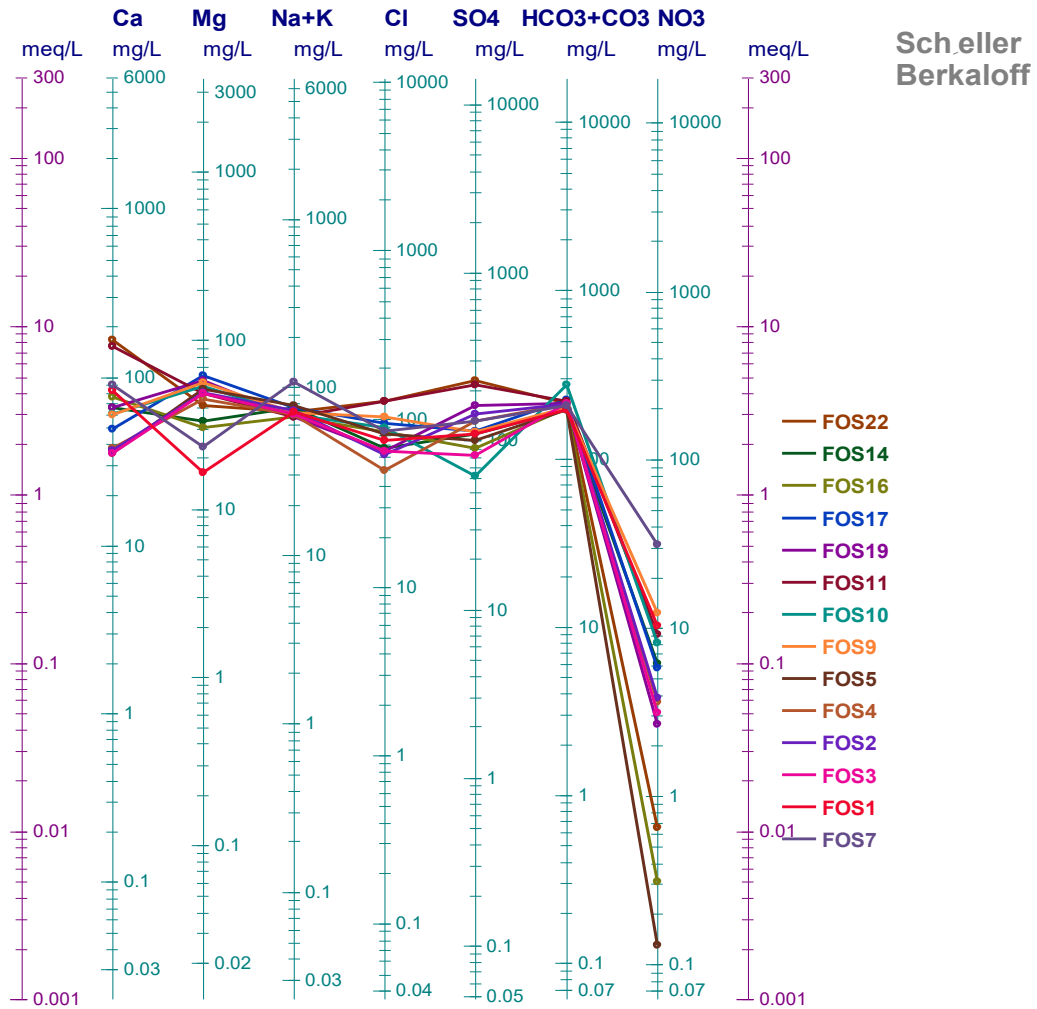
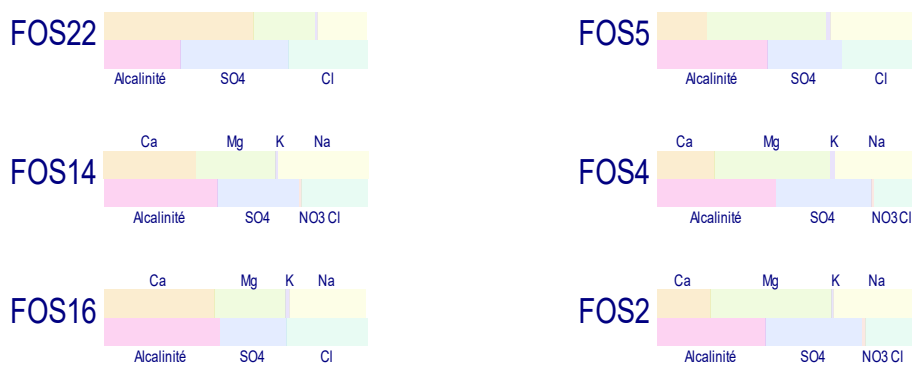


Figure IV.17 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff pour les eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)



CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

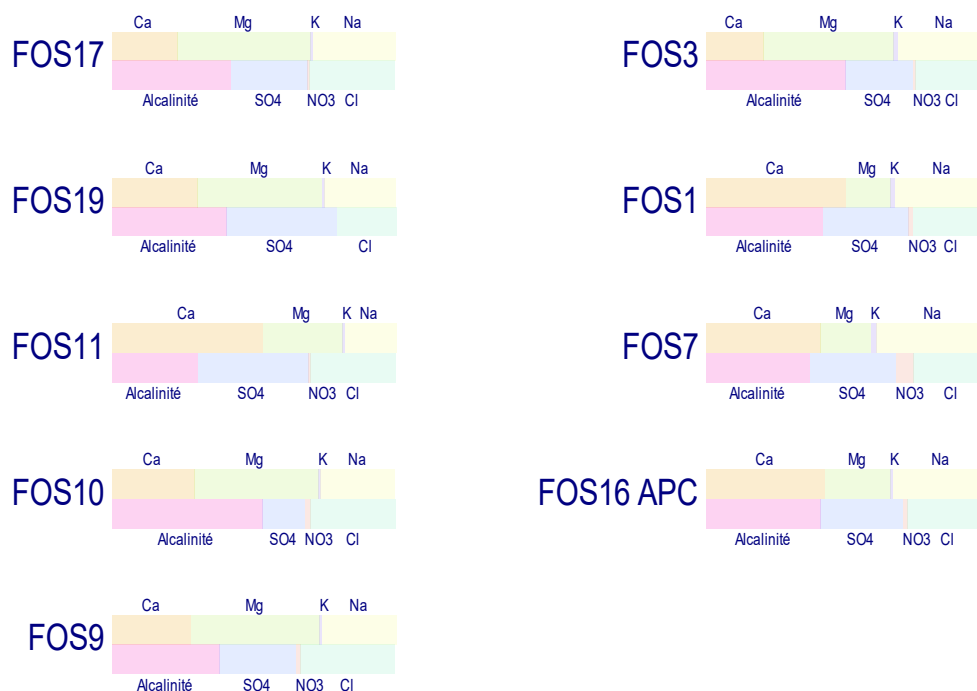


Figure IV.18 : Classification des eaux selon le diagramme de Stabler

Tableau IV.5 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER

| Forage | r% cations | r% anions | Faciès chimiques |
|-----------|--|---|--------------------------|
| FOS1 | $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée calcique |
| FOS2 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS3 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS4 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS5 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS7 | $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée calcique |
| FOS9 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS10 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS11 | $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ | $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- = \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Sulfaté calcique |
| FOS14 | $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée calcique |
| FOS16 | $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée calcique |
| FOS16 APC | $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- = \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée calcique |
| FOS17 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS19 | $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ | Bicarbonatée Magnésienne |
| FOS22 | $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ | $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ | Sulfaté calcique |

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.2.4. Diagramme de Stiff :

La représentation de Stiff (Stiff, 1951) (Figure IV. 19) est une méthode graphique qui permet de visualiser les résultats des analyses chimiques des eaux. Chaque échantillon est représenté par polygone, dont la forme géométrique varie en fonction des concentrations des éléments chimiques spécifiques analysés. Cette méthode facilite l'interprétation des variations chimiques et permet de comparer les profils des différents échantillons de manière visuelle et concrète (Saihi; 2024). Le diagramme de Stiff constitue un outil efficace pour la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines étudiées, et permettant d'analyser la répartition des principaux ions et d'identifier les différents faciès chimiques (Bourjila, 2023). L'analyse des formes obtenues permet de distinguer plusieurs groupes homogènes. Le premier groupe est caractérisé par une dominance des ions calcium (Ca^{2+}) et bicarbonate (HCO_3^-), traduisant un faciès de type Ca-HCO_3 (33,33%). Le deuxième groupe correspond à des eaux de transition de type Mg-HCO_3 (53,33%). En outre, troisième groupe (13,33%) présente faciès hydrochimique de type (Sulfaté calcique).

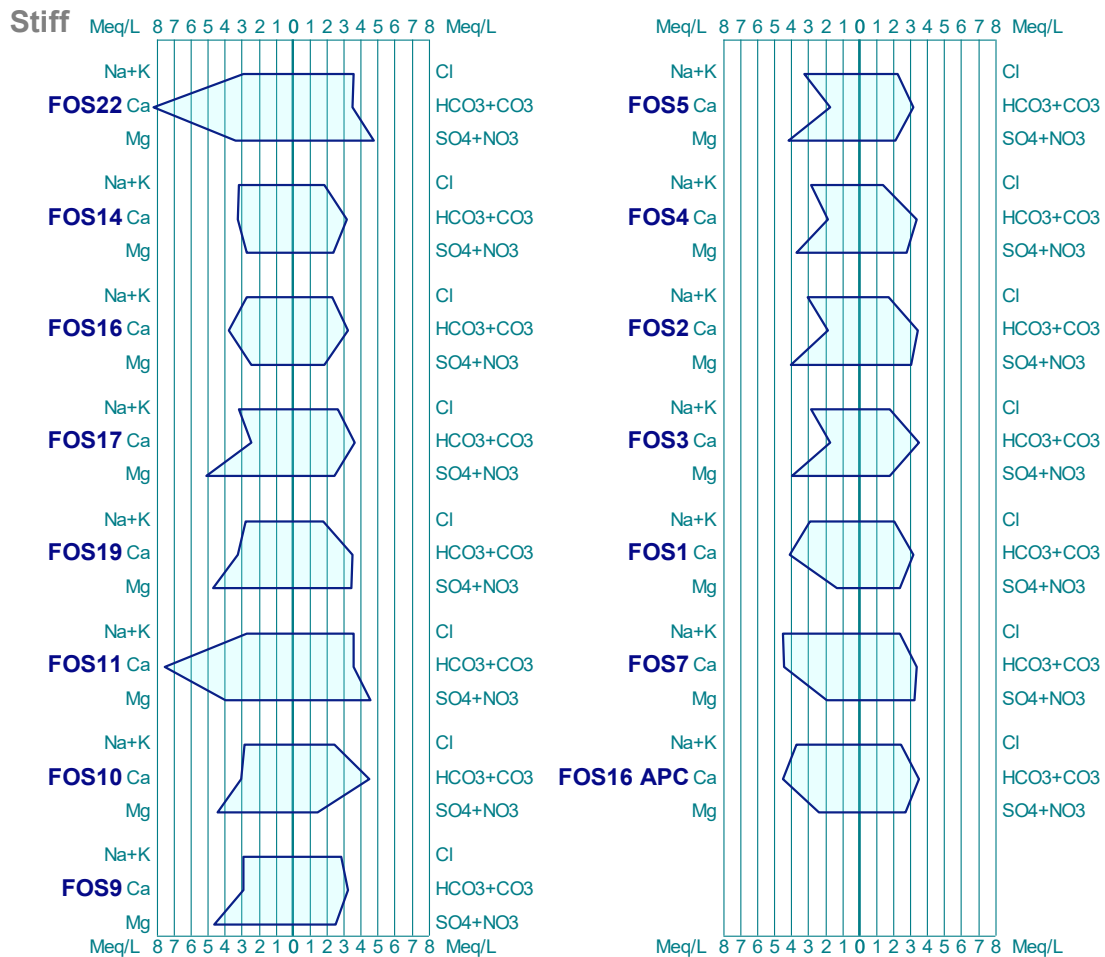


Figure IV.19 : Classification des eaux souterraines du champ captant d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) selon le diagramme de Stiff

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.5.5. Le diagramme de Chadha

La projection des résultats sur le diagramme de Chadha (Figure IV. 20), montre que la majorité des points d'eau de la zone d'étude (86,70%), appartient au sous-groupe 1, indiquant une eau de type Ca-Mg-Cl. Ce type d'eau est caractérisée par la dominance des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et les acides forts (SO_4^{2-} et Cl^-). Par ailleurs les échantillons restants (13,30%) sont caractérisés par une eau de type Ca-Mg- HCO_3 (eau de recharge).

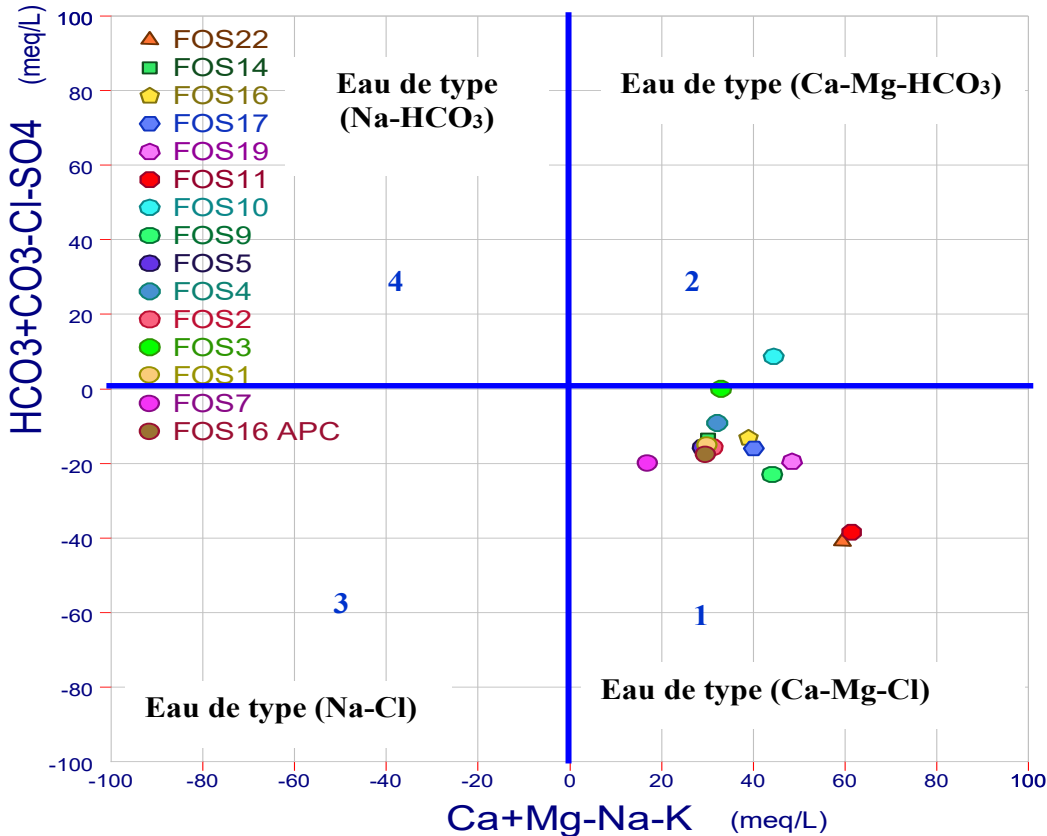


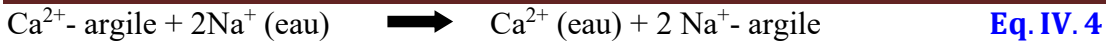
Figure IV. 20 : Le diagramme de Chadha :

IV.6. Diagrammes binaires

IV.6.1. Relation entre les ions Na^+ vs Cl^-

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure (Saihi, 2024). Le diagramme binaire Na^+ vs Cl^- (Figure IV.21) montre que la majorité des échantillons ne s'alignent pas parfaitement sur la droite de dissolution de l'halite (NaCl). La plupart des points présentent un excès en Na^+ par rapport à Cl^- . Le déficit en Na^+ caractérisant certains points (FOS22 et FOS11) est probablement attribué aux mécanismes d'échange de bases inverse par lesquels les ions Na^+ sont absorbés à la surface des minéraux argileux suivant la réaction 1

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES



En outre, un fort enrichissement en sodium des eaux (FOS7, FOS4, FOS16APC, FOS5, FOS14) peut être dû aux échanges avec le Ca^{2+} et Mg^{2+} (réaction 2) ou bien à la présence d'une autre source de Na^+ , comme la dissolution des minéraux argileux (Madene, 2021).

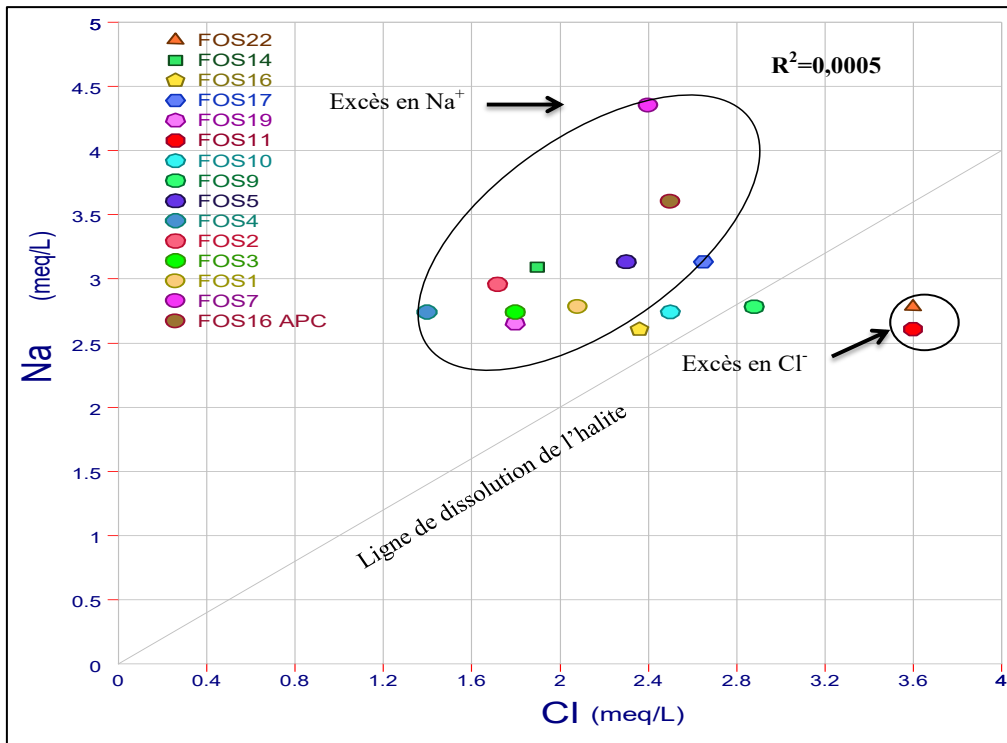
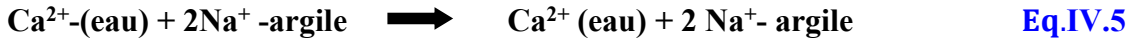


Figure IV.21: Relation entre les ions Na^+ vs Cl^- .

IV.6.2. Relation entre les ions Ca^{2+} vs SO_4^{2-}

La représentation graphique de la relation Ca^{2+} vs SO_4^{2-} (Figure IV.22) montre une corrélation modérée, suggérant que la dissolution de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et ou l'anhydrite (CaSO_4) peut être une source commune de Ca^{2+} et de SO_4^{2-} . Les points des échantillons (FOS19, FOS3, FOS17) s'alignent parfaitement sur la droite de dissolution de gypse. Par ailleurs, la majorité des échantillons présentent un excès de Ca^{2+} , indiquant que l'origine de Ca^{2+} n'est pas seulement la dissolution de gypse ou de l'anhydrite. En outre, les points des échantillons (FOS2, FOS4) sont caractérisés par un déficit de Ca^{2+} par rapport à SO_4^{2-} . Ce déficit peut s'expliquer au processus d'échange cationique.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

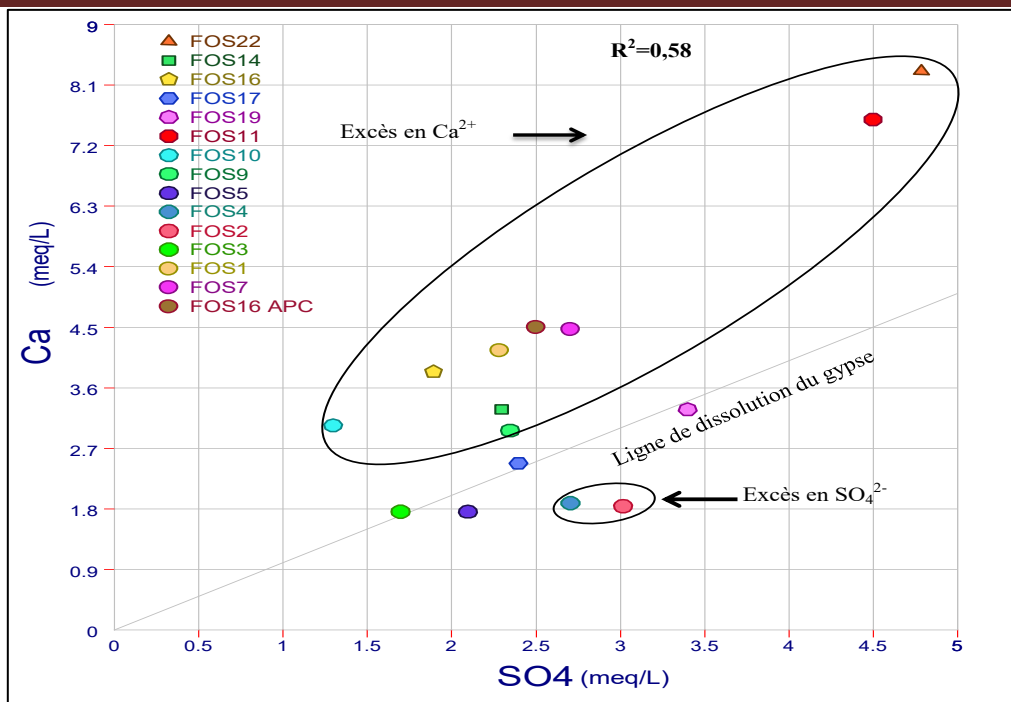
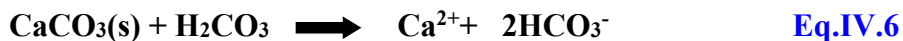


Figure IV.22: Relation entre les ions Ca^{2+} vs SO_4^{2-} .

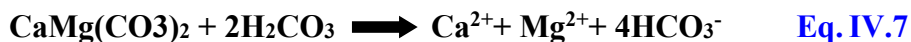
IV.6.3. Relation entre les ions Ca^{2+} vs HCO_3^-

Les bicarbonates peuvent avoir deux origines qui sont la dissolution de la calcite (CaCO_3) ou de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Karroum, 2021). Les tracés de Ca^{2+} en fonction de HCO_3^- révèlent que les points des échantillons (FOS7, FOS9 et FOS14) se positionnent sur la droite de dissolution de la calcite (Figure IV.23). Par ailleurs, 40% des points se situent au-dessus de la droite 1:1, ce qui suggère un excès de Ca^{2+} par rapport à HCO_3^- . Cet excès de calcium s'explique par la dissolution des minéraux évaporitiques (gypse et l'anhydrite) combinés avec le phénomène d'échange des bases (Kraiem, 2015). En outre, environ 40% des points se positionnent en dessous de la droite 1:1, indiquant un déficit de Ca^{2+} par rapport à HCO_3^- . Ce déficit est dû au phénomène d'échange des bases.

La dissolution de la dolomite se fait selon deux réactions (Edmunds et al, 1982) :



Une dissolution congruente:



Une dissolution incongruente:



CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

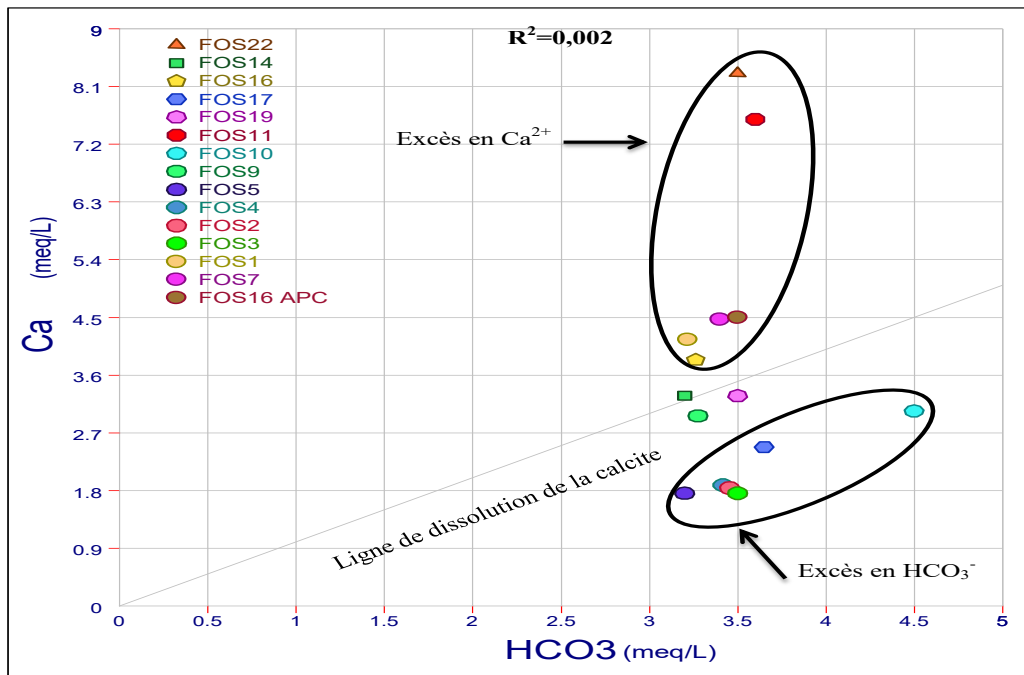


Figure IV.23: Relation entre les ions Ca²⁺ vs HCO₃⁻.

IV.6.4. Relation entre les ions Ca²⁺+Mg²⁺ vs HCO₃⁻ :

La représentation des résultats analytiques de Ca²⁺+Mg²⁺ en fonction de HCO₃⁻, fait apparaître que tous les points se positionnent au-dessus de la droite de dissolution de la dolomite, indiquant un excès de Ca²⁺+Mg²⁺ par rapport à HCO₃⁻. Cet excès est probablement attribué à la dissolution de gypse et/ou le processus d'échange de base.

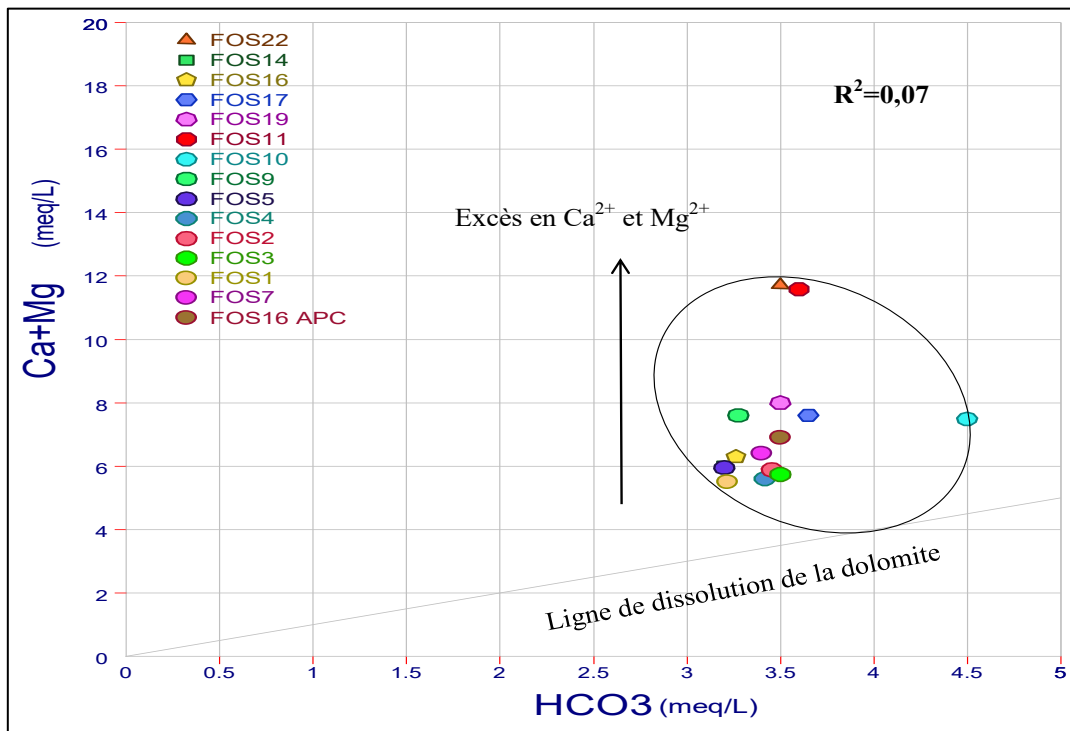


Figure IV.24: Relation entre les ions Ca²⁺+ Mg²⁺ vs HCO₃⁻.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.6.5. Relation entre les ions $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$

Le diagramme $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ (Figure III. 25) montre que la plupart des points analytiques se positionnent au-dessus ou près de la droite de pente 1 (dissolution des minéraux évaporitiques et carbonatés). Cela suggère que ces ions résultent de la dissolution de la calcite, de la dolomie et du gypse (Cerling et al, 1989 ; Fisher et Mulican, 1997). Si l'échange ionique inverse est le processus dominant, les points se déplaceront vers la gauche en raison d'un excès de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ par rapport au $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$. L'échange ionique tend à déplacer les points vers la droite due à un excès de $(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ (Cerling et al, 1989 ; Fisher et Mulican, 1997). Il est à signaler que la relation $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ (Figure IV.25) montre une forte corrélation avec un coefficient de détermination ($R^2=0,77$), suggérant que la dissolution de la Calcite, dolomite, gypse et l'anhydrite peut être une source commune de Ca^{2+} , Mg^{2+} ; SO_4^{2-} et HCO_3^- .

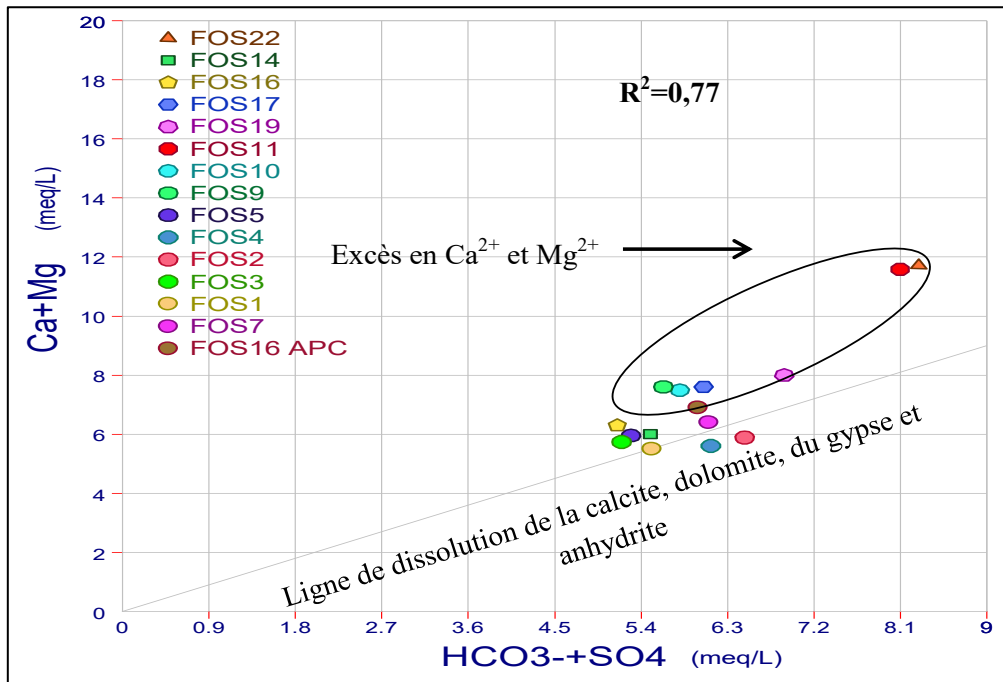
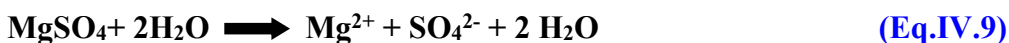


Figure IV.25 : Relation entre les ions $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$.

IV.6.6. Relation entre les ions Mg^{2+} vs SO_4^{2-}

Le Diagramme Mg^{2+} vs SO_4^{2-} (Figure IV.26) montre que la majorité des points (53,3%) présentent un excès de Mg^{2+} par rapport à SO_4^{2-} . Cet excès est probablement dû au processus d'échange cationique ou/et la dissolution de la dolomite. En outre les points (FOS22, FOS19 et FOS1) sont caractérisés par déficit en Mg^{2+} qui s'explique par le phénomène d'échange cationique. Les points (FOS16 APC, FOS11 et FOS14)



CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

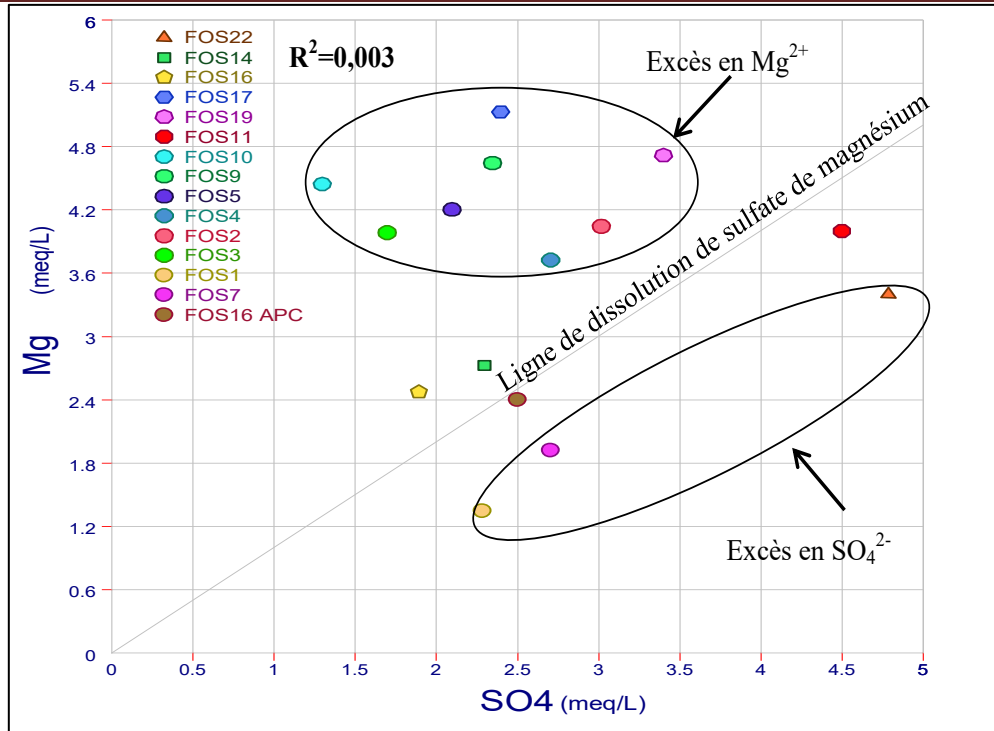


Figure IV.26 : Relation entre les ions Mg^{2+} vs SO_4^{2-} .

IV.6.7. Relation entre les ions Ca^{2+} vs Mg^{2+}

Les teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} (Figures IV.27) présentent des concentrations très variables, car ces ions sont impliqués dans différents processus de dissolution/précipitation du gypse, de la calcite et de la dolomite et encore le phénomène d'échange de base (Madene, 2021).

Le diagramme binaire Ca^{2+} vs Mg^{2+} montre que 53,3% des points présentent un déficit de Ca^{2+} par rapport à Mg^{2+} . Ce déficit s'explique par le phénomène d'échange de base ainsi que la précipitation de la calcite. D'autre part les points (FOS11, FOS16 APC, FOS7) se positionnent sur la droite 1:2, indiquant la dissolution de la calcite. Il est à signaler que les points (FOS22 et FOS1) sont caractérisés par un excès de Ca^{2+} par rapport à Mg^{2+} . Cet excès s'explique par le processus d'échange cationique. Car les argiles de l'aquifère peuvent libérer des ions de Ca^{2+} après avoir fixé le Na^+ , cela indique que l'origine de Ca^{2+} n'est pas seulement la dissolution de la calcite et la dolomite confirme ainsi l'hypothèse d'une contribution de Ca^{2+} par échange d'ions (Madene, 2021).

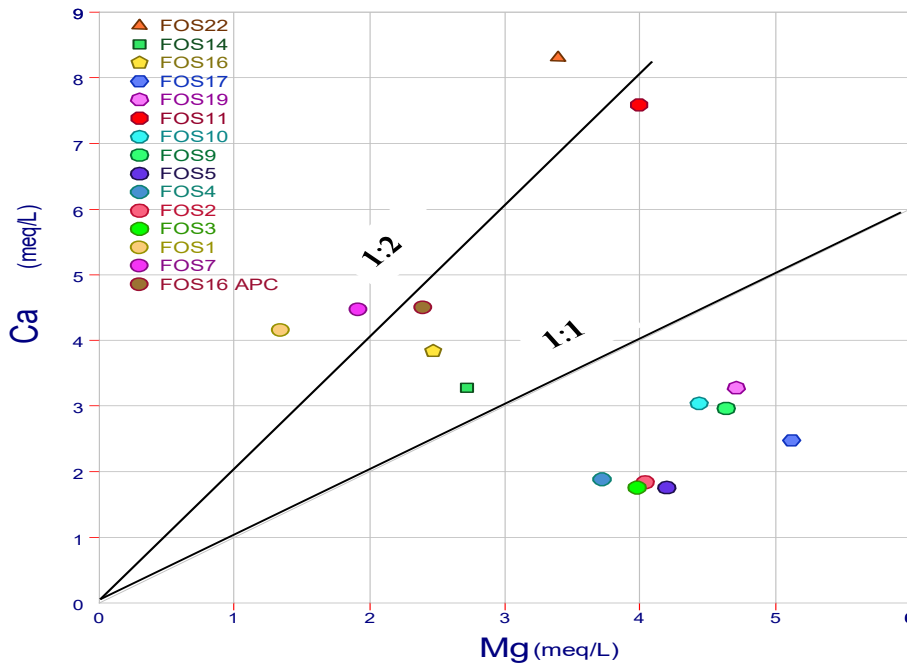


Figure IV.27: Relation entre les ions Ca^{2+} vs Mg^{2+}

IV.6.8. Relation entre les ions Ca^{2+} vs Cl^-

La Figure IV.28 montre corrélation positive modérée entre Ca^{2+} et Cl^- , avec un coefficient de détermination égal à 0,65. Les points (FOS3 et FOS9, FOS17 et FOS2) s’alignent sur la droite de dissolution de CaCl_2 . Par ailleurs, environ 60% des points se positionnent au-dessus de la droite 1:1, indiquant un excès de Ca^{2+} par rapport à Cl^- . Cet excès s’explique par la dissolution des minéraux (calcite, dolomite, gypse, anhydrite) et/ ou le phénomène d’échange cationique.

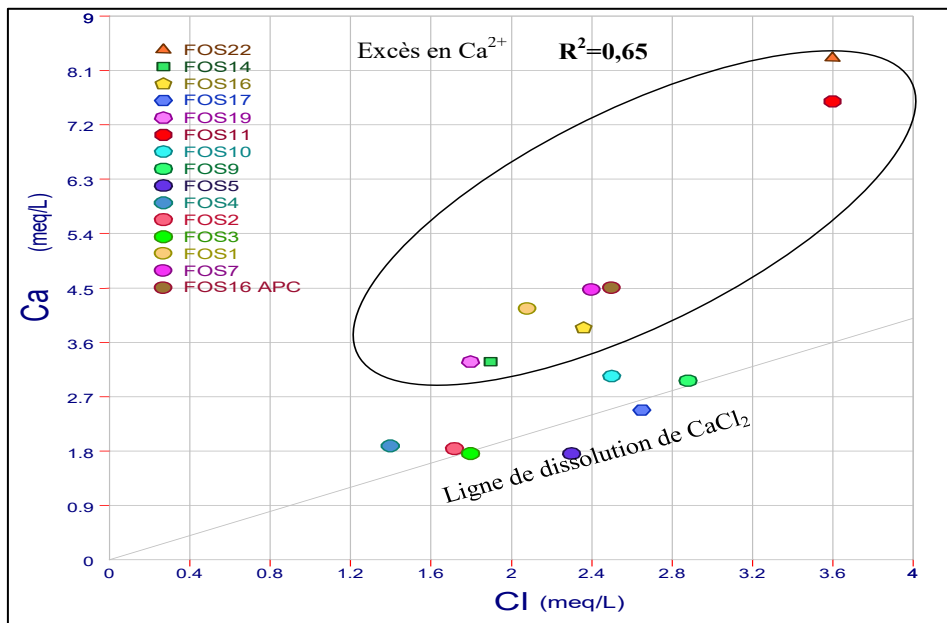


Figure IV.28 : Relation entre les ions Ca^{2+} vs Cl^- .

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.7. Indice de saturation des eaux (IS)

L'état d'équilibre chimique entre l'eau et les minéraux de l'aquifère est évalué par l'équilibre thermodynamique, qui détermine l'équilibre chimique des eaux souterraines (Reghais, 2023). Ceci est considéré comme une mesure de la dissolution et/ou la précipitation dans l'interaction eau-roche. Les indices de saturation (IS) de minéraux sont calculés en utilisant les concentrations des principaux ions dans le système. L'IS est calculé en utilisant l'équation (Drever, 1997 ; Najib et al, 2016):

$$IS = \log\left(\frac{PIA}{K_s}\right) \quad (\text{Eq. IV.10})$$

où **PAI** est le produit d'activité ionique et **Ks** le produit de solubilité du minéral.

- Si **IS < 0**, l'eau est en état de sous saturation (dissolution du minéral),
- Si **IS = 0**, l'eau est à l'équilibre avec le minéral,
- Et si **IS > 0**, l'eau est en état de sursaturation (précipitation du minéral).

PHREEQC a été utilisé pour calculer les indices de saturation des minéraux de l'eau suivants : calcite (CaCO_3), dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhydrite (CaSO_4) et halite (NaCl). Le calcul des indices de saturation des minéraux (Figures IV.29, IV.30 et IV.31) montre que tous les échantillons des eaux souterraines de la zone d'étude sont sous-saturés ($IS < 0$) vis-à-vis des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite, halite). : ($-7,08 \leq IS \text{ halite} \leq -6,67$, $-2,27 \leq IS \text{ anhydrite} \leq -1,30$ et $-2,03 \leq IS \text{ gypse} \leq -1,06$) (Tableau IV.6). Cela implique que ces minéraux peuvent encore se dissoudre dans l'eau. La Figure IV.30 (a et b), illustrant les étroites corrélations entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de l'halite ($R^2 = 0,96$) et du gypse ($R^2 = 0,93$) en fonction de $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ et de $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ respectivement, renforce l'hypothèse de la dissolution de ces évaporites (Kamel et al., 2006).

Par ailleurs, ces indices font apparaître que la majorité des échantillons d'eau sont sous-saturés ($IS < 0$) par rapport aux minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite). Les indices de saturation positifs vis-à-vis des minéraux carbonatés traduisent une légère sursaturation des eaux vis-à-vis ces minéraux. L'évolution de l'état de sous-saturation vers l'état de sursaturation indique la contribution des minéraux carbonatés à la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude. L'absence de corrélation de l'indice de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite en fonction de $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ (Figure IV.32) confirme le phénomène d'échange entre le calcium de l'aquifère et l'eau de la nappe (Nadjib et al., 2016).

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

Tableau IV.6 : statistique descriptive des indices de saturation

| | Carbonates | | | Évaporites | | |
|-------------------|------------|----------|-----------|------------|--------|-----------|
| | Calcite | Dolomite | Aragonite | Gypse | Halite | Anhydrite |
| Minimum | -0.69 | -1.05 | -0.84 | -2.03 | -7.08 | -2.27 |
| Maximum | 0.26 | 0.19 | 0.11 | -1.06 | -6.67 | -1.30 |
| Moyenne | -0.24 | -0.44 | -0.39 | -1.64 | -6.84 | -1.87 |
| Écart-type | 0.25 | 0.46 | 0.25 | 0.28 | 0.12 | 0.28 |

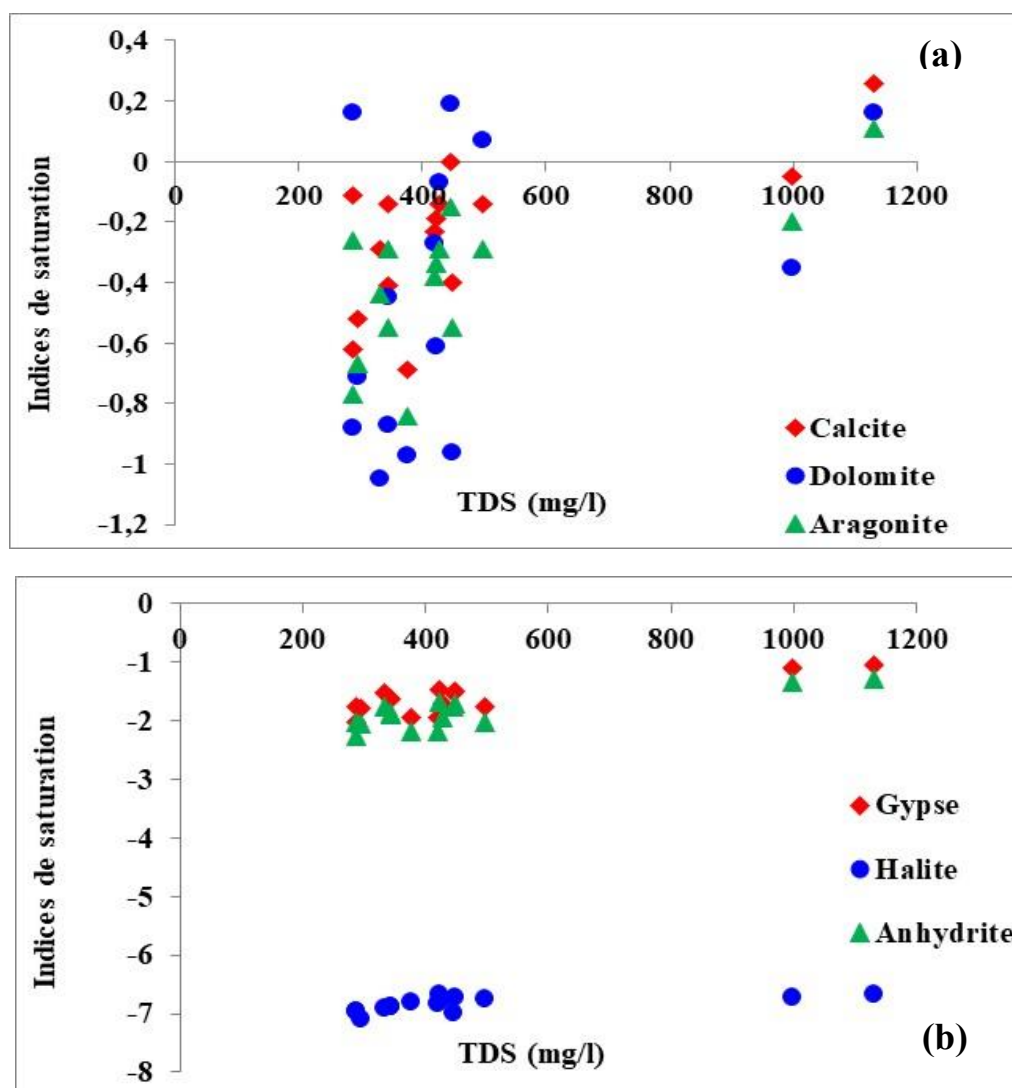


Figure IV.29 : Relations entre Indices de saturation des minéraux (IS) et la TDS (en mg/l).

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

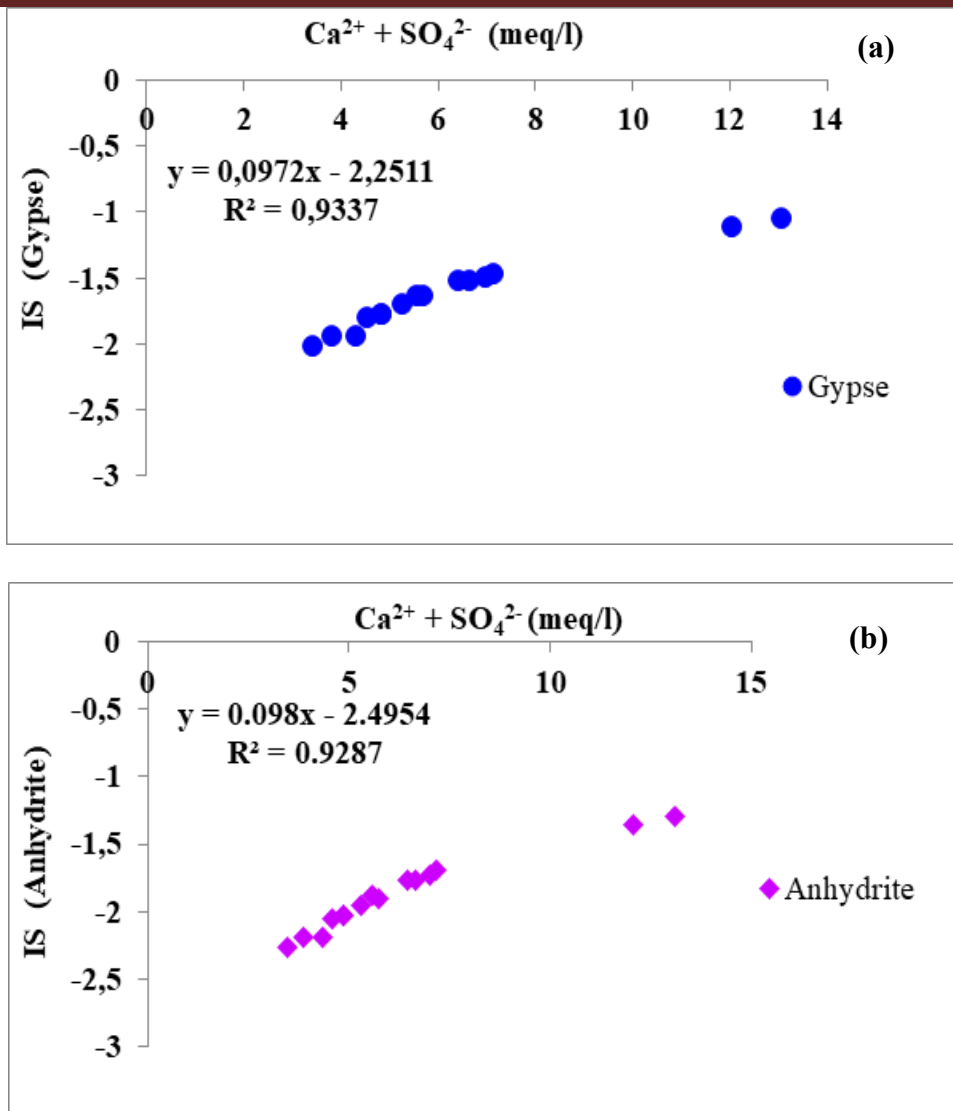


Figure IV.30 : Indices de saturation de (a et b) anhydrite et gypse Vs ($Ca^{2+} + SO_4^{2-}$),

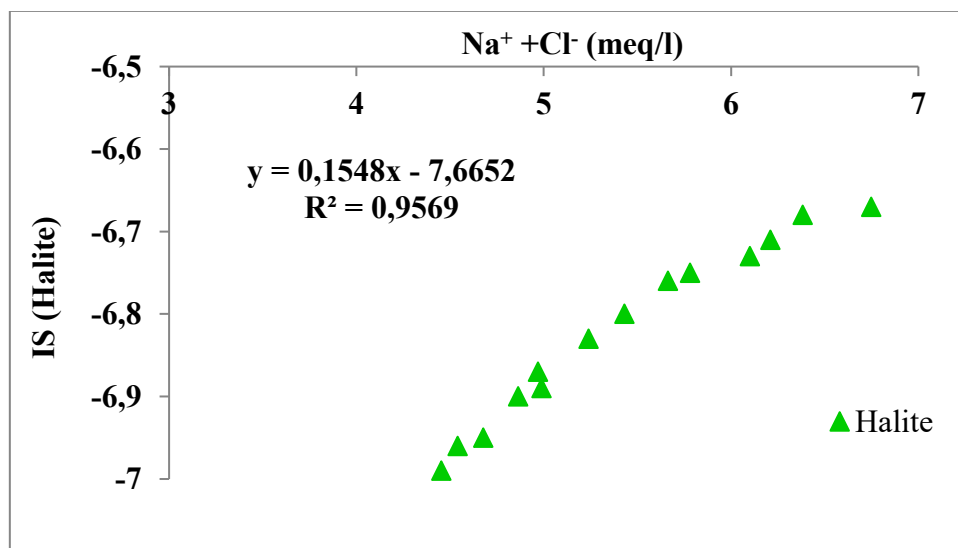


Figure IV.31: Indices de saturation de l'halite Vs ($Na^+ + Cl^-$)

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

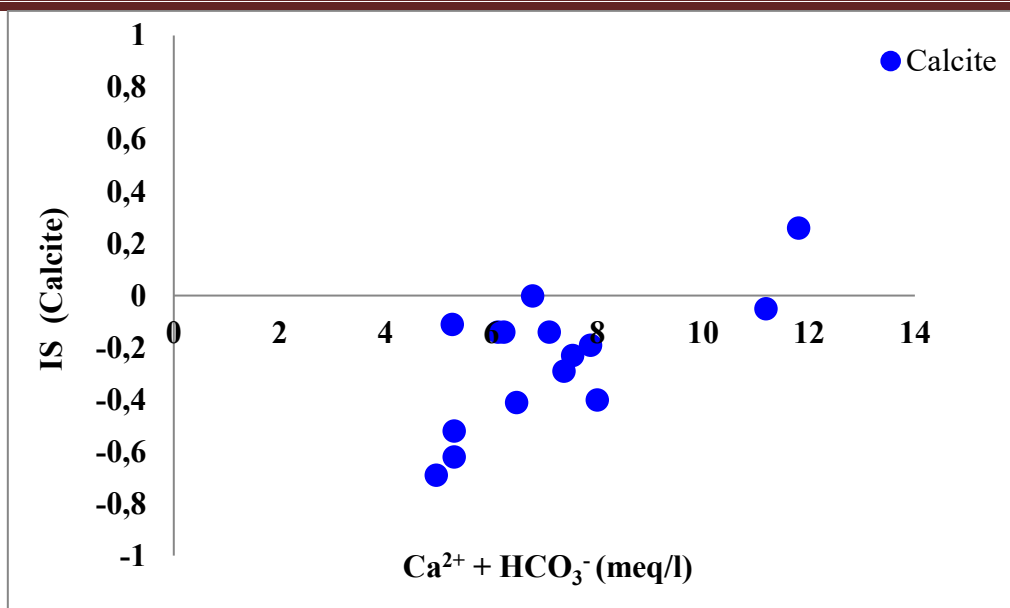


Figure IV.32 : Indices de saturation de la calcite Vs Ca²⁺ + HCO₃⁻,

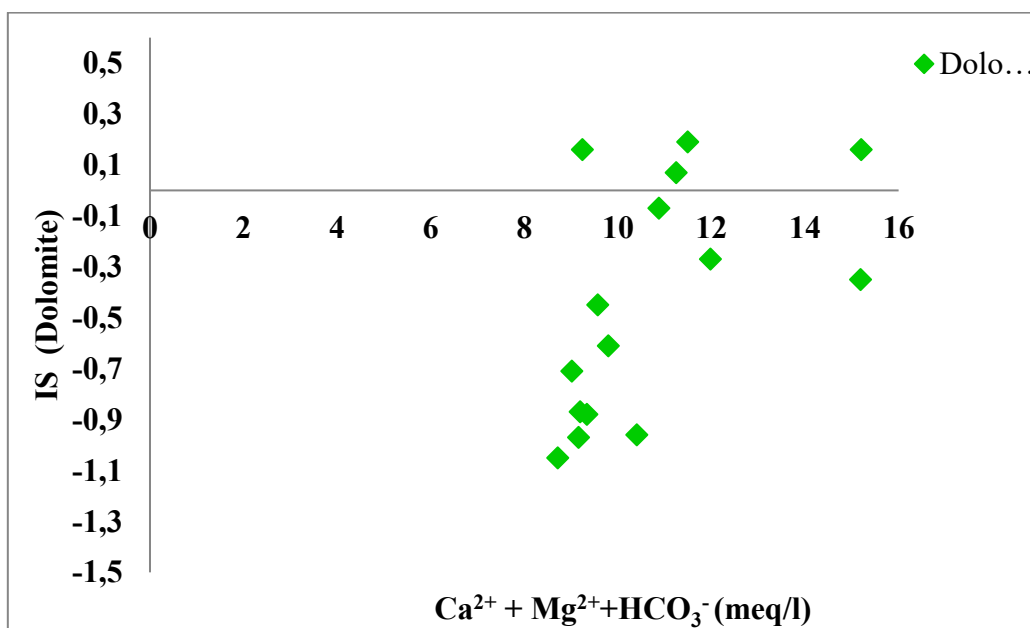


Figure IV.33 : Indices de saturation de la dolomite Vs Ca²⁺ + Mg²⁺ + HCO₃⁻,

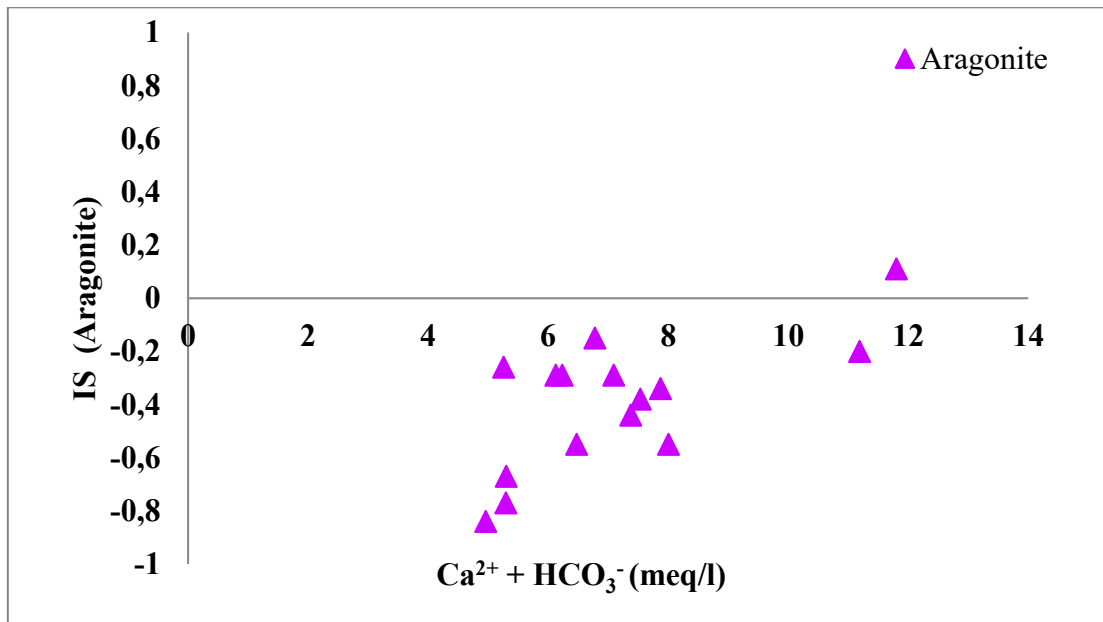


Figure IV.34 : Indices de saturation de (a et b) calcite et aragonite Vs ($\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$)

IV.8. Mise en évidence des échanges de base

IV.8.1 Indices chloro-alkalins (CA-1 et CA-2)

Les indices chloro-alkalins sont fréquemment utilisés dans les études de qualité des eaux souterraines pour identifier le type d'échange d'ions (Zaidi et al., 2016 ; Ghalit 2019). Ils donnent une idée du type de réaction d'échange de cations (Wang et al., 2015). Ces deux indices sont déterminés par les formules (Schoeller, 1965):

$$\text{CAI} - 1 = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{Cl}^-} \quad \text{Eq. IV. 11}$$

$$\text{CAI} - 2 = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-)} \quad \text{Eq. IV. 12}$$

Où la concentration des ions est en méq/l. Si :

- **CAI = 0**, il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et de l'aquifère.
- **CAI < 0**, l'aquifère libère le calcium et le magnésium et fixe le sodium et le potassium, échange direct.
- **CAI > 0**, l'aquifère libère le sodium et le potassium et fixe le calcium et le magnésium, échange indirect.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

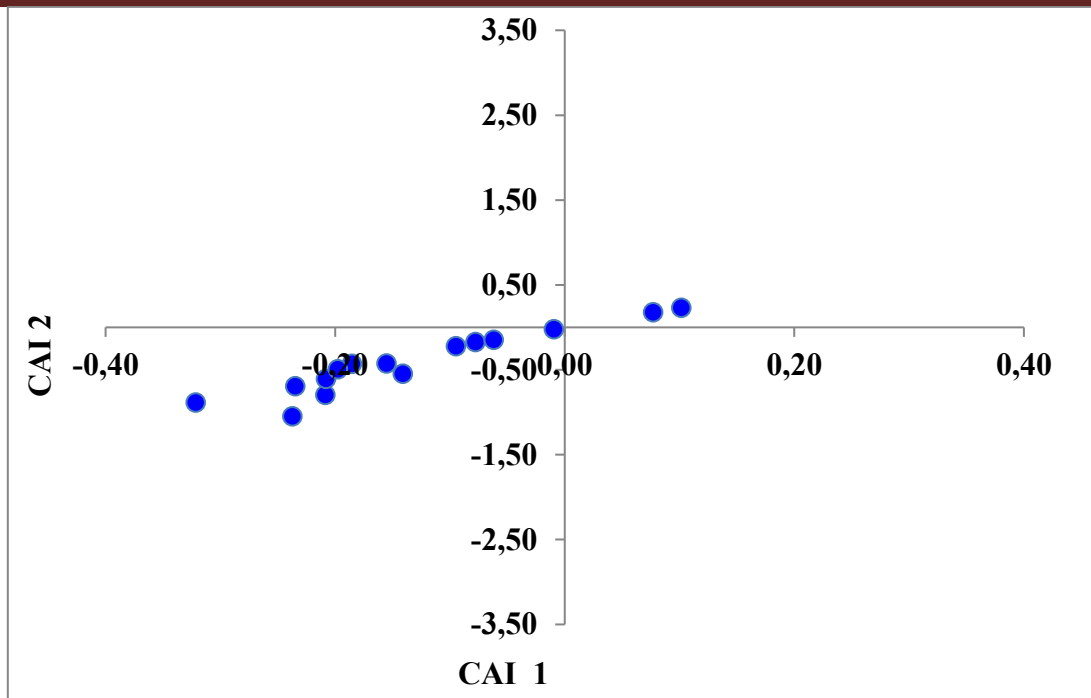


Figure IV.35 : Diagrammes montrant l'échange d'ions dans les eaux souterraines : indices Chloro-Alcalins 1 et 2 (CAI-1 et CAI-2)

Les valeurs de CAI-1 et CAI-2 sont toutes deux négatives dans 86,66 % des échantillons et sont toutes deux positives dans 13,33 % des échantillons (Figure IV.35), indiquant que 86,66 % des échantillons d'eau échangent les d'ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} avec les ions de Na^+ et K^+ des matériaux de l'aquifère, alors que 13,33 % des échantillons d'eau échangent les d'ions de Na^+ et K^+ avec les ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} des matériaux de l'aquifère.

III.8.2 La relation $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$ vs $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})]$

Le diagramme $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$ vs $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ a été utilisé pour mettre en évidence les processus d'échange cationiques (Garcia et al, 2001). Un rapport équivalent de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$ vs $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$ qui est proche de -1 indique que l'échange de cations contribue de manière significative à l'évolution de chimisme des eaux souterraines (Garcia et al, 2001). Comme le montre la Figure IV. 36, les échantillons d'eaux souterraines ont été principalement tracés le long de la ligne $Y = -1,38.X + 2,11$, indiquant que l'échange cationique a influencé les eaux souterraines de la zone d'étude.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

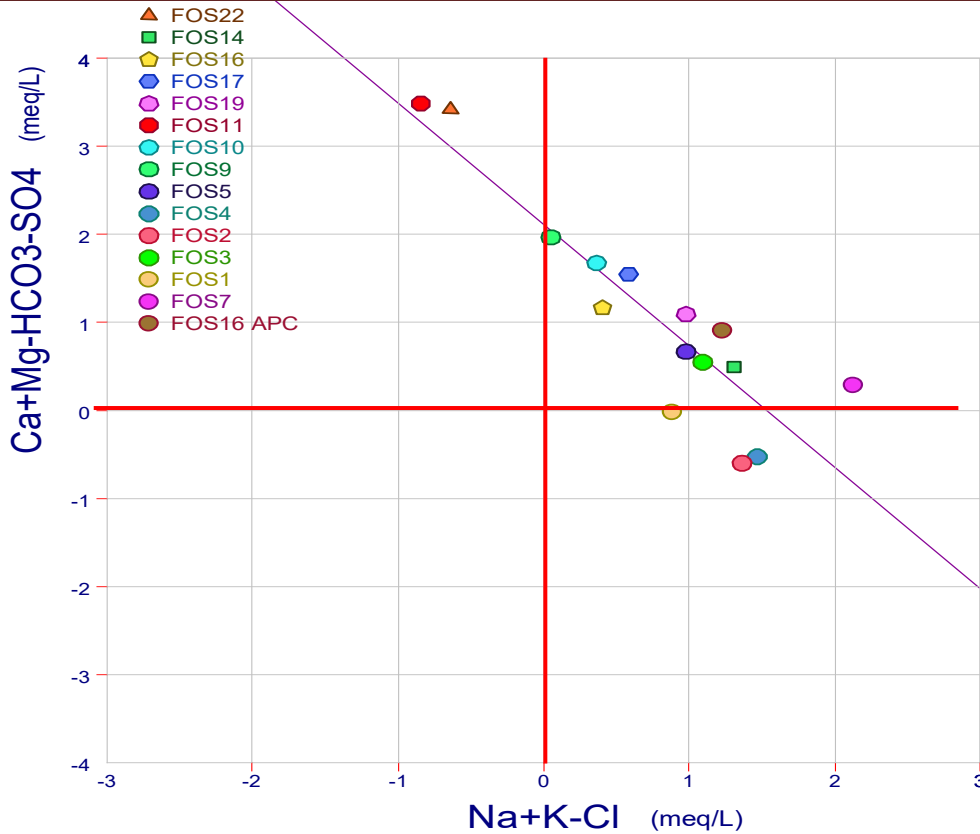


Figure IV.36 : Diagrammes montrant l'échange d'ions dans les eaux souterraines : $[(Na^++K^++Cl^-)]$ en fonction de $[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]$

IV.9. Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité des eaux souterraines

IV.9.1 Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré)

IV.9.1.1 Normes nationales de l'Algérie

Les valeurs calculées de l'indice de la qualité de l'eau (WQI) varient de 20,93(FOS4) à 51,58 (FOS11) avec une moyenne de 31,73, un écart type de 9,66 et un coefficient de variation de 30,44% (Tableau IV.7 et Figure IV.37). D'après la classification de l'WQI, la quasi-totalité des échantillons d'eau (93,33%) sont classés comme eau d'excellente qualité pour l'eau potable ($WQI \leq 50$). En outre, environ 6,66 % (FOS11) des échantillons appartiennent à la catégorie des eaux de bonne qualité ($50 < WQI \leq 100$) pour la consommation humaine.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

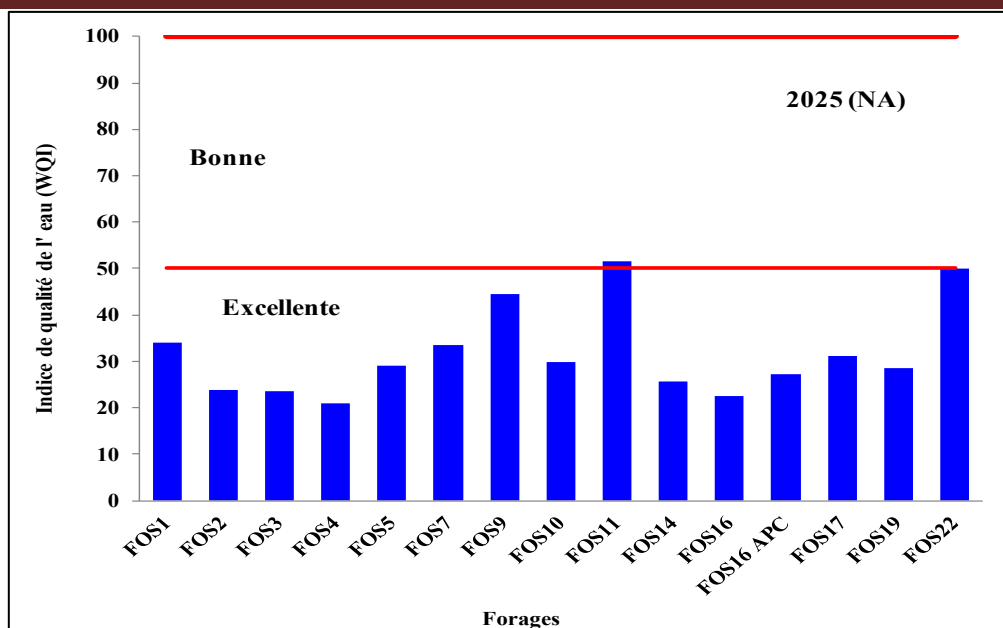


Figure IV.37: Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes Algérienne).

IV.9.1.2 Normes internationales de l'OMS

Les résultats de calculs de l'WQI selon les normes de l'OMS ont révélé que les valeurs de WQI oscillent de 31,39 (FOS4) à 75,59 (FOS11), avec une moyenne de 45,34, un écart type de 13,88, et un coefficient de variation de 30,61%. La classification des eaux de la zone d'étude montre que la majorité des échantillons d'eau (80%) appartiennent à la catégorie « Excellente », tandis que les échantillons (FOS9, FOS11 FOS22) sont caractérisés par une de bonne qualité (Tableau IV.7 et Figure IV.38).

Tableau IV.7 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Variance | Ecart type | Coef de variation CV(%) |
|-------------------|--------------|---------------|---------|----------|------------|-------------------------|
| 2025 (NA) | 20,93 (FOS4) | 51,58 (FOS11) | 31,73 | 93,27 | 9,66 | 30,44 |
| 2025 (OMS) | 31,39 (FOS4) | 75,59 (FOS11) | 45,34 | 192,63 | 13,88 | 30,61 |

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

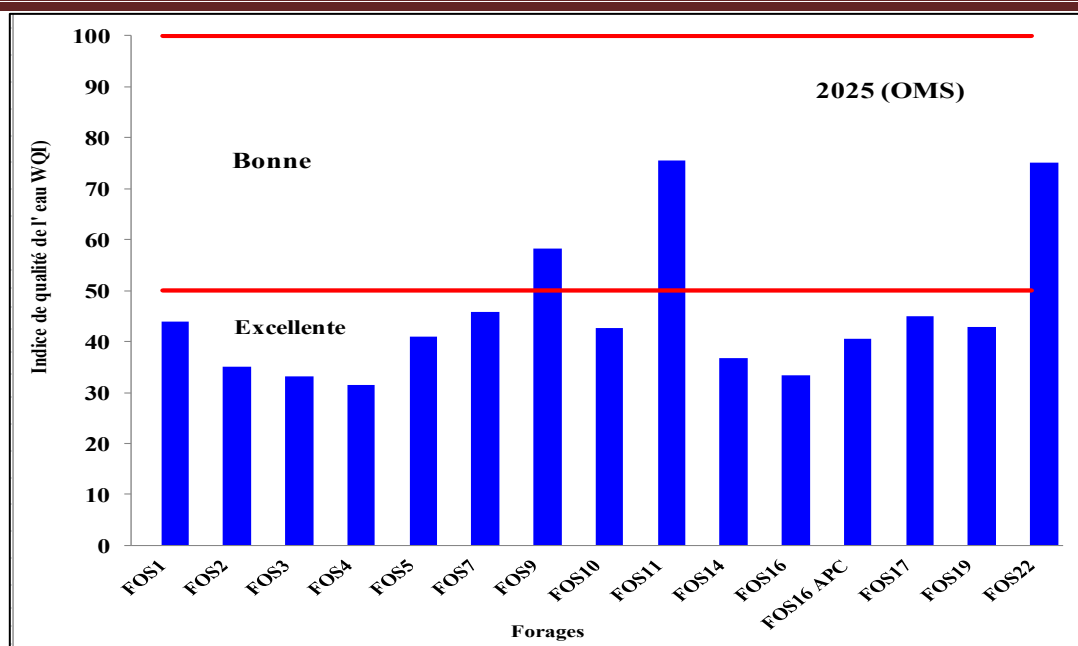


Figure IV.38: Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes OMS).

IV.9.2 Indice arithmétique de qualité de l'eau (WAWQI)

IV.9.2.1 Normes nationales de l'Algérie

Les valeurs calculées de l'indice arithmétique de qualité de l'eau (WAWQI) varient de 2,46 (FOS4) à 114,06 (FOS9), avec une moyenne de 31,37, un écart type de 32 et un coefficient de variation de 102,01% (Tableau IV.8 et Figure IV.39). D'après la classification de WQI, environ 53,33% des échantillons d'eau sont classés comme eau d'excellente qualité pour la consommation humaine, tandis que 20% (FOS10, FOS14 et FOS17) des eaux de forages appartiennent à la classe bonne qualité. Par ailleurs, environ 13,33% (FOS5 et FOS11) et 6,66% (FOS1) des eaux sont de qualité mauvaise et très mauvaise, respectivement et ne peuvent pas être utilisés comme eau de boisson qu'après traitement. En outre l'eau de forage FOS9 est classée comme eau non potable.

Tableau IV.8: Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025)

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Variance | Écart type | Coef de variation (CV) (%) |
|------------|-------------|---------------|---------|----------|------------|----------------------------|
| 2025 (NA) | 2,46 (FOS4) | 114,06 (FOS9) | 31,37 | 1024,04 | 32 | 102,01 |
| 2025 (OMS) | 3,33 (FOS4) | 115,13 (FOS9) | 32,25 | 1026,51 | 32,04 | 99,34 |

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

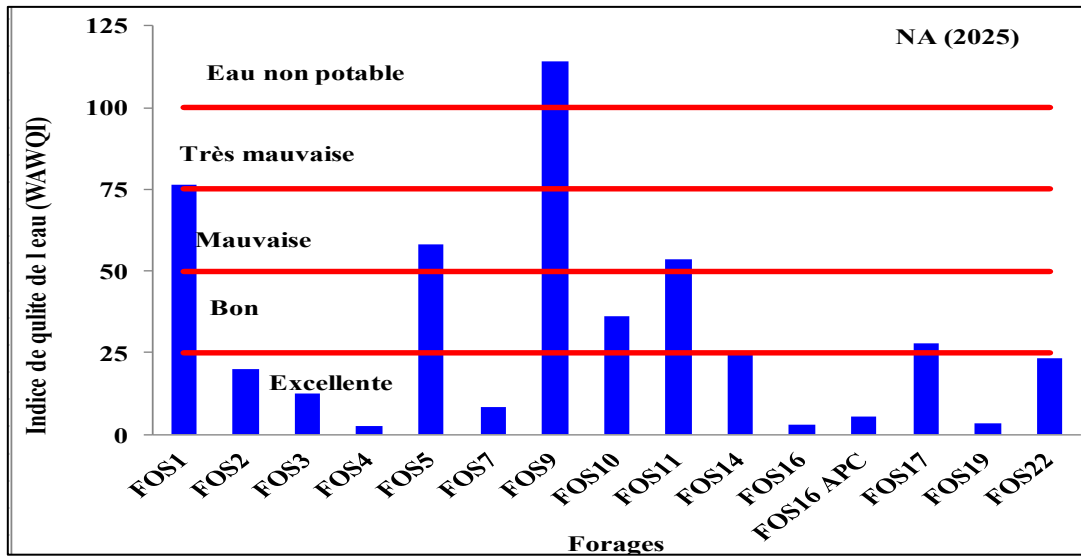


Figure IV.39 : Indice arithmétique de qualité de l'eau(WAWQI) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes Algérienne

IV.9.2.2 Normes internationales de l'OMS

Les valeurs calculées de WAWQI de forages variaient de 3,33(FOS4) à 115,13 (FOS9), avec une moyenne de 32,25, un écart type de 32,04 et un coefficient de variation de 99,34% (Tableau IV.8 et Figure IV.40). L'indice WAWQI a montré que la majorité des forages avec 53,33% étaient dans la catégorie de l'eau excellente, environ 20% des forages se caractérisent par une eau de bonne qualité pour la consommation humaine. En outre, environ 13,33% (FOS5 et FOS11) et 6,66% (FOS1) des eaux de forages appartiennent aux catégories mauvaise et très mauvaise, respectivement et ne peuvent pas être utilisés comme eau de boisson qu'après traitement. Le forage FOS9 est classé dans la catégorie non potable

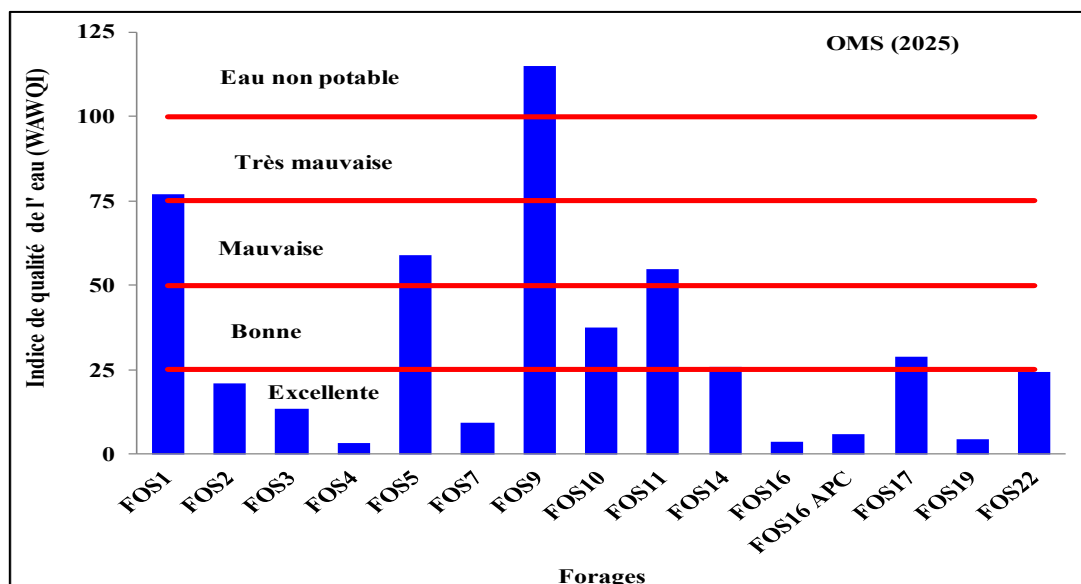


Figure IV.40 : Indice arithmétique de qualité de l'eau (WAWQI) des forages d'Oued Seddeur, Djelfa (Octobre, 2025) (Normes OMS

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

IV.10. Conclusion

Les résultats obtenus ont montré que l'abondance relative des principaux ions dans les eaux souterraines d'Oued Sddeur est $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ pour les cations et $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ pour les anions. La représentation graphique des résultats des analyses chimiques des eaux souterraines sur le diagramme de Piper, nous a permis de ressortir trois principaux faciès :

- Un faciès de type (Ca-Mg-Cl-SO₄) (86, 66%)
- Un faciès de type (Ca-Mg-HCO₃) (13, 33%)

L'étude des indices de saturation de certains minéraux a révélé que tous les échantillons d'eau souterraine sont sous saturés vis-à-vis de des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite, halite). En outre, les indices de saturation IS indiquent que les minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) sont en état de sous-saturation, traduisant la contribution de ces minéraux à la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude. Les valeurs de CAI-1 et CAI-2 sont négatives dans 86,66 % des échantillons d'eau, suggérant un processus d'échange d'ions direct entre Ca^{2+} et Mg^{2+} et Na^+ et K^+ . En outre, 13,33 % des échantillons étudiés, sont caractérisés par un processus d'échange inverse, indiquant un échange entre le sodium (Na^+), le potassium (K^+) et le calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}).

La comparaison des résultats des analyses chimiques avec les normes de l'OMS et de l'Algérie indique que la quasi-totalité des échantillons d'eau souterraine d'Oued Seddeur répond aux normes de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine. En outre, le calcul des indices de qualité de l'eau (WQI) des eaux souterraines, basé sur les normes OMS et Algérienne, a permis de mettre en évidence que la majorité des forages sont caractérisés par une eau de qualité excellente à bonne pour la consommation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La région de Djelfa se caractérise par la prédominance de grandes unités hydrogéologiques, y compris le bassin de Zahrez, la plaine d'Ain Oussera, le Synclinal de Djelfa, le Synclinal d'Ain El bel et plateau de Messad et la vallée de l'Oued Touil. Le flanc sud du synclinal de Djelfa présente une structure monoclinale avec des pendages de 12° à 30° et un décrochement dextre avec plus de 5 km de rejet horizontal. Ce flanc est divisé en deux parties distinctes : le Djebel Djellal Gharbi à l'ouest et le Djebel Djellal Chergui à l'est de la route Djelfa-Laghouat. Les eaux souterraines d'Oued Seddeur sont essentielles pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Djelfa, située à 25 kilomètres au sud de cette dernière, sur le flanc sud du synclinal de Djelfa.

La présente étude, qui a porté sur la qualité des eaux souterraines d'Oued Seddeur, a abouti aux conclusions suivantes :

- L'évaluation de la qualité des eaux souterraines par approche hydrochimique a permis de mettre en évidence des informations très importantes sur leur composition chimique. L'utilisation de diagramme de Piper a révélé deux types de faciès hydrochimiques distincts ont été identifiés à savoir le (Ca-Mg-Cl-SO₄) (86, 66%) et (Ca-Mg-HCO₃) (13, 33%).
- En outre, l'étude hydrochimique a permis d'identifier les processus hydrogéochimiques régissant l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans la zone d'étude. Parmi les processus hydrogéochimiques contrôlant le chimisme des eaux, on distingue la dissolution des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite), ainsi que des minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite et halite). Par ailleurs, l'utilisation des indices chloro-alcalins (CA-1 et CA-2) a permis de mettre en évidence l'influence de processus d'échange d'ions (direct et inverse) sur la composition chimique des souterraines d'Oued Seddeur.
- Les valeurs calculées de WQI (pondéré) des eaux de forages ont indiquées que la majorité de ces forages sont caractérisés par une eau d'excellente qualité selon les normes de l'OMS de l'Algérie.
- L'indice WAWQI (arithmétique) indique que qu'environ 73,33% des échantillons étudiés appartiennent aux catégories excellente et bonne selon les normes de l'OMS de l'Algérie.
- L'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a révélé l'existence de quatre facteurs principaux influençant le processus de minéralisation des eaux souterraines. Dans la présente étude, nous nous limiterons à quatre facteurs principaux : **(1)** la dissolution des

CONCLUSION GENERALE

minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite, sylvite, chlorure de calcium) ; (2) l'impact des engrais chimiques des activités agricoles ; (3) la dissolution des minéraux carbonatés (calcite, dolomite) ; et (4) les rejets d'eaux usées urbaines.

- En outre, l'analyse en composantes principales (ACP) a permis de classer les échantillons en trois groupes distincts en se basant sur leur minéralisation. En outre, l'analyse en clusters a classé les eaux de forages en tenant compte de leurs caractéristiques hydrochimiques similaires, permettant ainsi de mieux comprendre leur composition et leurs origines. Cette approche statistique multivariée a permis de corroborer les résultats de l'étude hydrogéochemique, en mettant en évidence l'importance des processus de dissolution minérale dans le processus de minéralisation des eaux souterraines.

Recommandations et Perspectives

- Un réseau de surveillance plus étoffé doit être installé pour que la fluctuation du niveau piézométrique des nappes de l'Albien et de Barrémien de Oued seddeur.
- La réalisation des campagnes d'analyse physico-chimiques périodiques pour le suivi de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude.
- L'utilisation rationnelle des engrais chimiques et des pesticides dans l'agriculture pour éviter la contamination des eaux souterraines.
- La mise en place des périmètres de protection réglementaires autour des ouvrages de captage des eaux souterraines.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux, G. & Harris, C., (2001).** Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology* 241 (2001) : 91–103.
- AFNOR (1997).** Qualité de l'Eau (Tome 1) : Terminologie, échantillonnage et évaluation des Méthodes (3e éd.). Afnor : Paris (France), 34 p.
- A.N.R.H. (2010).** Inventaire des forages et pluviométrie de la Wilaya de Djelfa Agence Nationale des Ressource Hydraulique. Djelfa. Algérie, 2010.
- ANRH. (2018).** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Djelfa.
- ANAT. (2003).** Etude des programmes de développement impliqués par l'option hauts plateaux. Phase I : bilan diagnostic I, II et III. Agence Nationale de l'Aménagement du Territoire, Algérie 12 p.
- Azlaoui M. 2013.** Contribution à l'étude hydrogéologique et modélisation, du synclinal d'AIN BEL Wilaya DE DJELFA. Mémoire de Magister. Université KasdiMerbah Ouargla, 94 p. <http://hdl.handle.net/123456789/570>.
- Adimalla, N., & Qian, H. (2019).** Hydrogeochemistry and fluoride contamination in the hard rock terrain of central Telangana, India: analyses of its spatial distribution and health risk. *SN Applied Sciences*, 1(3), 202.
- ADE. (2026).** Algérienne des Eaux de Djelfa. (Méthodes des analyses physico-chimiques des eaux (rapport interne)
- Baaziz S. (2025).** Caractérisation hydrogéochimique des nappes d'eaux souterraines de la région d'El-Menia. Mémoire De Master Académique. Université Ouargla. P72.
- Backman B, Bodiš D, Lahermo P, Rapant S, and Tarvainen T (1998).** Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environ Geol* 36, 55–64p. doi : 10.1007/s002540050320
- Belkendil A. (2021).** Les Ressources Hydriques Dans Les Zones Arides, Caractérisation, Dynamique Et Durabilité (Cas Du Sud – Ouest Algérien). Thèse De Doctorat. Université Tlemcen. P 225
- Benadela L. (2023).** Apport des outils géochimiques et isotopiques à l'étude du fonctionnement de l'aquifère Karstique du Bassin d'Oued Fékan. Université de Mascara, 224 p.
- Bentchich, R.S; Mellouk, S. (2021).** Synthèse de travaux sur l'inventaire des pucerons et de leurs ennemis naturels sur culture de pomme de terre dans la région de Djelfa. Mémoire de master. Université Ziane Achour de Djelfa, 71 p.
- Bagnouls, F. & H.Gaussen .1953.** Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat.de Toulouse*, 88, 193 – 240.
- BEREGH. E.U.R.L. (2001).** Etude Géophysique Par Prospection Electrique Dans La Zone De Ain El-Bel, Algérie.
- Boudiaf, Z et Kamel, H.F (2018).** Vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la pollution, cas de la nappe du Mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa. Mémoire de Master. Université Ziane Achour -Djelfa, 129 p
- Bourjila, A (2023).** Modélisation hydrochimique de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier de Ghiss Nekor et caractérisation des zones potentielles en eaux souterraines dans les bassins versants de Ghiss et Nekor (Maroc) à l'aide des méthodes géospatiales. Thèse de Doctorat Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 182p

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

- Bouteldjaoui, F (2020)**, Hydrogéologie, modélisation et gestion des ressources hydriques en zone semi-aride (Cas de la région de Djelfa), thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, 237p.
- Brown RM, McClelland NI, Deininger RA, Tozer RG (1970)**. A water quality index- do we dare 339–43
- Brown, R.M., McClelland, N.J., Deininger, R.A. and O'Connor, M.F. (1972)** A Water Quality Index—Crossing the Psychological Barrier. Proceedings of the International Conference on Water Pollution Research, Jerusalem, 18-24 June 1972, 787-797.
- Chadha, D.K. (1999)**. A Proposed New Diagram for Geochemical Classification of Natural Waters and Interpretation of Chemical Data. Hydrogeology Journal, 7, 431-439. <http://dx.doi.org/10.1007/s100400050216>
- Cerling TE, Pederson BL, Damm KLV (1989)**. Sodium-Calcium ion exchange in the weathering of shales: implications for global weathering budgets. Geology 17: pp 552–554.
- Chevalier F, Le Bellac J (2013)**. La classification. University de Renne France, p :1-44.
- Chibane, B., A. Boutaleb, M. Lacroix (2010)** Etude hydrochimique et Approche Isotopique en Région semi-aride : cas du Synclinal de Djelfa (Algérie). European Journal of Scientific Research. 45 (2): 270-290.
- Drever, J.I. (1997)**, Geochemistry of natural waters. 2nded. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Davis J C (1986)**. Statistics and Data Analysis in Geology. John Wiley & Sons, New York.
- Dakoure, D (2003)** Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina-Faso – Mali) – Essai de modélisation. Thèse Doctorat, Université. Paris 6, 255pp.
- Detay, M., & Carpenter, M. (1997)**. Water wells: implementation, maintenance and restoration: Wiley London.
- Djenba S, Boudoukha A, Bencer S. (2015)**. Approche hydrochimique de l'aquifere superficiel d'Ain Djacer. Est Algerien. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°24, pp. 281-299
- DRE. (2018)**. Direction des Ressources en Eau, Djelfa.
- Edmunds W. M., Cook Darling J.M., Kinniburgh D.G., Bath A. H. Morgan-Jones M., Andrews J. N. (1987)**: Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, UK: a basis for groundwater quality management. Applied Geochemistry
- Elguizi T.A et Zeddouri A (2019)**. Caractérisation hydrogéologique et qualité des eaux du champ captant d'Oued Seddeur el Djelfa, pp136-141. Université Kasdi Merbah Ouargla. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/24311>
- Fisher RS, Mulican WF. (1997)** Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodiumchloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas,USA. Hydrogeol J 10: pp 455-474.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979)**. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

- Garcia M.G., De Hidalgo M., Blesa M.A. (2001)**, Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina. *Journal of Hydrology*, 9, 597–610.
- Ghalit, M (2019)**. Hydrochimie et Qualité des eaux embouteillées au Maroc, Valorisation des eaux souterraines de Bassin de Nekor, Rif- central, Nord-Est Maroc. Thèse de Doctorat. Université Mohammed Premier Faculté des Sciences Oujda, 225 p.
- Ghodbane M ;(2018)**. Estimation des potentialités des eaux souterraines et estimation de la pollution par les nitrates : Cas de la région de Chemora-Est algérien-. Thèse de Doctorat . Université BATNA 2.P192.
- Hachaichi. Z (2016)**, Quantification de la recharge naturelle et artificielle d'un système aquifère soumis à des contraintes climatiques et anthropiques en zone semi –aride (bassin de Foussana) Tunisie centrale, thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université D'Avignon, 261p.
- Hassane Saley, A (2018)**. Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques, Thèse de doctorat, Université Paris Sud / Université Abdou Moumouni, 296p.
- JORA. (2011)**. « journal officiel de la république algérienne ». N °18. P7-9.
- Karroum A .(2021)** . Evaluation De La Qualité Des Eaux De Surface Et Des Sédiments : Hydrogéochimie, Processus De Minéralisation Et Eléments Traces Métalliques. Cas Des Bassins Versants : Oued El Abid, Oued Ahançal Et Oued Srou (Haut Et Moyen Atlas, Maroc) . Thèse De Doctorat . Université Sultan Moulay Slimane Béni-Mellal .P 185 .
- Kamel S, Dassi L & Zouari; K (2006)** Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie, *Hydrological Sciences Journal*, 51:4, 713-730. DOI: 10.1623/hysj.51.4.713
- Kaiser H. F., (1960)**. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151.
- Khadri R ;(2024)**. Géométrie et caractérisation hydrochimique d'un système aquifère en zone semi-aride. Application à l'aquifère de Hammam Bradaa, région de Guelma, Algérie nord orientale. Thèse de Doctorat . Université Batna 2 . P 263 .
- Kraiem. Z (2015)**, les nappes phréatiques du chott Djérid (Sud-Ouest tunisien) : Caractérisation, mécanisme de minéralisation et étude de vaporisation, thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 269p
- Khaouani B. (2020)**. Monitoring de la dynamique du reboisement de Moudjbara (W. Djelfa) par télédétection spatiale. Université des Sciences et de la Technologie «HouariBoumediene», 160 p.
- Kamenan Y.M (2021)**. Elaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : cas des aquifères fissurés du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Jean Lorougnon Gued. Cote D'ivoire, 194 p.
- Lalaoui, M. (2021)**. Contribution à l'Etude Biogéochimique des Eaux du Barrage Hammam Grouz. thèse de Doctorat. Centre Universitaire de Mila. 227P.
- Madene, E. (2021)**. Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion des nappes du Haut et du Moyen Chélif. Thèse de doctorat. ENSH, 221 p.

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

- Najib.S, Mehdi.K, Riss.J, Fadili.A, Pulido-Bosch. A&Guessir. H (2016)**, Salinisation de l'aquifère libre de la Chaouia côtière (AzemmourTnineChtouka), Maroc, Hydrological Sciences Journal, DOI : 10.1080/02626667.2016.1162906.
- Ouanouki. B., (2012)**. Modélisation de la demande en eau dans une région aride. Cas de la Wilaya de Djelfa. Revue Nature &Technologie. N° 06. PP 93-105.
- OMS. (2008)**. Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization, Geneva.
- O.M.S. (2017)**. Directives de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson. Recommandations. Organisation mondiale de la Santé.
- Piper, AM. (1944)**.A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans AmGeophys union 25:914-923.
- Pouget. (1977)**. Cartographie des zones arides : géomorphologie, pédologie, groupements végétaux et aptitudes du milieu à la mise en valeur, éch.1/100.000 ème. Région de Messaad, Ain-El-ibel. Ed ; ORSTOM. Notice, n°67, Algérie
- Reghais A (2023)**. Etude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe du Complexe Terminal de la région de Biskra (Sud-est Algérien). . Thèse de Doctorat. UNIVERSITE Jijel. P148 .
- Rahmani B.(2016)** Approche hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines dans une zone semi-aride. Cas de la nappe mio-plio-quadernaire du Synclinal de Djelfa. Mémoire de Magister.Université Larbi Tebessi,Tebessa. 108 p.
- Rodier j., Legube B., Merlet N., (2009)**. L'analyse de l'eau, 9èmeédition, Ed. Dunod, 1579p
- Saihi, A.I. (2024)** . Étude De La Qualité Physico-Chimique Et Bactériologique De L'eau Potable Par Approche Statistique Et Indice De Qualité De L'eau (IQE) (Cas De Hassi Bahbah Et Ain Oussera) . Mémoire De Master . Universiten Djelfa. P 173.
- Schoeller, H. (1965)**. Qualitative evaluation of groundwater resources. In Methods and Techniques of Groundwater Investigations and Development. UNESCO, 5483.
- Stiff H.A (1951)**.The interpretation of chemical water analysis by means of patterns.J. Petrol. Technol. 3 (10) 15 –3. <https://doi.org/10.2118/951376-G>.
- Sawyer G.N, McCarty D.L (1967)** Chemistry of sanitary engineers, 2nd edn. McGraw Hill, New York.
- Sawyer, C. N., & McCarty, P. L. (1967)**. Chemistry for sanitary engineers.
- StatSoft, Inc. (2011)**. STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 8. <http://www.statsoft.com>
- Simler R. (2013)**. Diag rammes software. <http://www.lha.univ avignon.fr/LHALogiciels.htm>
- Sharma, M. S.; Choudhary, P. R., 2017**. Effect of fenugreek seeds powder (*Trigonella foenum-graecum L.*) on experimental induced hyperlipidemia in rabbits. J. Diet. Suppl., 14 (1): 1-8
- Trayssac J. (1981)** : Etude géomorphologique du bassin versant de l'oued Djelfa Mellah,versant Nord des Monts de OuledNaïl (Algérie). Thèse de Doctorat de 3ème Cycle. Université de Poitiers. Faculté des Sciences Humaines, France, 308 pages.
- Talhaoui.A, El Hmaidia.A, Jaddi.H et Ousmana.H (2020)**. Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux

CHAPITRE IV: CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

- Superficielles De L'Oued Moulouya (NE, Maroc), EuropeanScientific Journal, Vol.16, No.2, p64-85.
- Todd D.K. (1980).** Groundwater Hydrology (2ndedn). Wiley. New York. 552pp.
- Wang, H., Jiang, X. W., Wan, L., Han, G., & Guo, H. (2015).** Hydrogeochemical characterization of groundwater flow systems in the discharge area of a river basin. Journal of Hydrology, 527, 433-441.
- Yao, A.J.L (2021).** Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de master. Université Jean Lorougnon Gued. Cote D'ivoire, 65p
- Yebdri.L (2023).** Etude de la vulnérabilité des eaux du versant de la Tafna (Algérie, nord-occidentale). Thèse de Doctorat ; Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 229p.
- Yidana, S. M. & Yidana, A. (2010).** Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. Environmental Earth Sciences, 59(7) (pp. 1461-1473). <https://doi.org/10.1007/s12665-009 0132-3>.
- Zaidi, F. K., Mogren, S., Mukhopadhyay, M., & Ibrahim, E. (2016).** Evaluation of groundwater chemistry and its impact on drinking and irrigation water quality in the eastern part of the Central Arabian graben and trough system, Saudi Arabia. Journal of African Earth Sciences, 120, 208-219.

ANNEXES

ANNEXE 1

Méthodes d'analyse des paramètres physico-chimiques

1. Les méthodes d'analyses physico-chimiques :

1.1 Mesure de pH :

Principe :

Le pH se définit comme le logarithme négatif de l'activité de l'ion hydrogène.

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$$

Il est mesuré à l'aide d'une électrode de verre, dont le potentiel varie en fonction de la concentration des ions hydrogènes suivant l'équation de Nernst. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence à l'aide d'un potentiomètre à haute impédance communément appelé pH-mètre ([MELCCCDP, 2023](#)).

Réactifs :

Tampon pH = **7.07**

Tampon pH = **4.01**

Appareil : pH Mètre ([Figure.1](#))

Electrode : Electrode de pH en verre

Mode opératoire :

a) Etalonnage de l'appareil :

- Rincez l'électrode avec de l'eau distillée. Séchez-la doucement avec un linge non abrasif.
- Déposez l'électrode dans une solution tampon dont le Ph est de **7,00**. Attendez que le pH-mètre se stabilise, puis ajustez-le jusqu'à ce qu'il affiche **7,00**.
- La ligne d'immersion de l'électrode devrait être dans la solution tampon lors de la mesure du pH.
- Retirez le pH-mètre de la solution et rincez-le avec de l'eau distillée Séchez-le doucement avec un linge no abrasif.
- Déposez l'électrode dans une solution tampon dont le pH est de **4,00**. Attendez que le pH-mètre stabilise, puis ajustez-le jusqu'à ce qu'il affiche **4,00**. Retirez le pH-mètre de la solution et rincez-le avec de l'eau distillée. Séchez-le doucement avec un linge non abrasif.
- Remettez l'électrode dans la solution tampon dont le pH est de **7,00**. Si le pH-mètre n'affiche pas **7,00**, recommencez l'étalonnage.

b) Dosage de l'échantillon :

Après étalonnage, on procède au dosage de notre échantillon comme suit :

- Prendre environ \approx **100 ml** d'eau à analyser.
- Le Mettre dans un agitateur avec une faible agitation.
- Tremper l'électrode dans le bêcher.
- Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation.
- Puis noter le pH



Figure.1 : Multi paramètre type (Khelif & Labboun, 2021)

1.2 Mesure de la conductivité :

Principe :

La conductivité d'une solution est la mesure de la capacité des ions à transporter le courant électrique. Ce passage du courant électrique s'effectue par la migration des ions dans un champ électrique produit par un courant alternatif. Un courant alternatif est utilisé pour atténuer la perturbation causée par la polarisation des électrodes résultant du passage d'un courant électrique. En appliquant une force électromotrice constante entre les électrodes, la variation de l'intensité de courant est inversement proportionnelle à la résistance de la solution. La conductivité d'une solution est définie comme l'inverse de la résistance d'un volume de $1,0 \text{ cm}^3$ de solution. Sa mesure s'effectue par l'utilisation d'une cellule de conductivité couplée à un conductivimètre, et la conductivité s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CEAEQ, 2015). La mesure de la conductance électrique par conductimètre d'une colonne d'eau se fait en utilisant deux électrodes de platine ou couvertes de noir de platine, en parallèles (Arioua et al., 2023; Toledo, 2022)

- **R** est la résistance de la colonne d'eau en ohms.

- **S** sa section en cm^2 et **l** sa longueur en cm.

- Solution étalon de conductivité connue **P**

$\frac{1}{S}$ est appelé constante de l'élément de mesure.

$$P = R \frac{S}{l}$$

La conductivité électrique en S / cm est :

$$V = \frac{1}{P} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{S}$$

Mode opératoire :

a) Étalonnage de l'appareil :

- Assurez-vous d'avoir une solution étalon de conductivité connue à portée de main.

- Assurez-vous que le conductimètre est propre et en bon état de fonctionnement.

- Plongez l'électrode du conductimètre dans la solution étalon.
- Initiez le processus de calibration en appuyant sur la touche dédiée. Attendez que l'appareil atteigne automatiquement le point final de la calibration.
- Vérifiez que la valeur affichée correspond à la conductivité de la solution étalon.
- Terminez le processus de calibration, soit automatiquement, soit en appuyant sur une touche spécifique.
- Répétez si nécessaire avec d'autres solutions étalons pour valider la précision sur toute la gamme de mesure.

b) Mesure de conductivité :

- Remplir un bécher avec une quantité d'eau suffisante pour l'immersion de l'électrode de conductivité ;
- Mettre l'électrode dans le bécher, puis appuyer sur la touche « Read », la valeur de la conductivité s'affiche sur l'écran de l'appareil avec une unité de micro Siemens par centimètre ($\mu\text{S/cm}$) ou bien milli siemens par centimètre (Figure 1).

1.3 Dosage de Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) :

Principe :

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel disodique de l'acide éthylènediaminetétracétique à pH 10. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique, le noir ériochrome. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium, la méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium (Rodier et al, 2009).

Réactifs (Amara et Guebla, 2018) :

Solution d'E.D.T.AN/50 ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : (0,02N ou 0,01M)

EDTA 3,725 g.
 après déshydratation à 80°C pendant 2 h. H₂O distillée 1000ml.

Solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 2 N :

NaOH (pastilles) 80 g.
 H₂O distillée 1000ml

Solution d'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH) pH = 10,1

Chlorure d'ammonium 67.5 g.
 NH_4OH (25%) 570 ml
 HCl concentré PH = 10.1
 H₂O distillée 1000 ml.

Noir eriochrome T.

Solution étalon de référence(CaCO_3)=0.01mol/l

Sécher un échantillon de carbonate de calcium pur pendant 2heures à 150°C . En introduire 1 g dans une fiole conique de **500ml** et humidifier avec de l'eau. Ajouter goutte à goutte de l'acide chlorhydrique à **4mol/l** jusqu'à ce que tout le carbonatesoit dissous. Éviter un excès d'acide. Ajouter **200ml** d'eau et porter à ébullition quelques minutes afin d'éliminer le dioxyde decarbonate. Refroidir et ajouter quelques gouttes de l'indicateur au rouge de méthyle. Ajouter une solution ammoniacale à **3mol/l** jusqu'à ce que la solution devienne orange. Transvaser la solution dans une fiole jaugée de **1000ml** et compléter au volume avec de l'eau distillée1ml de la solution contient **0.4008 mg (0.01 mmol/l)** de calcium.

Mode opératoire (Azlaoui et Zenati, 2018) :

(V1) Ca^{2+} :- Prendre **50 ml** d'eau à analyser.

- Ajouter **2 ml** de NaOH à 2 N.
- Ajouter du Murexide.
- Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage violet (Figure 2).

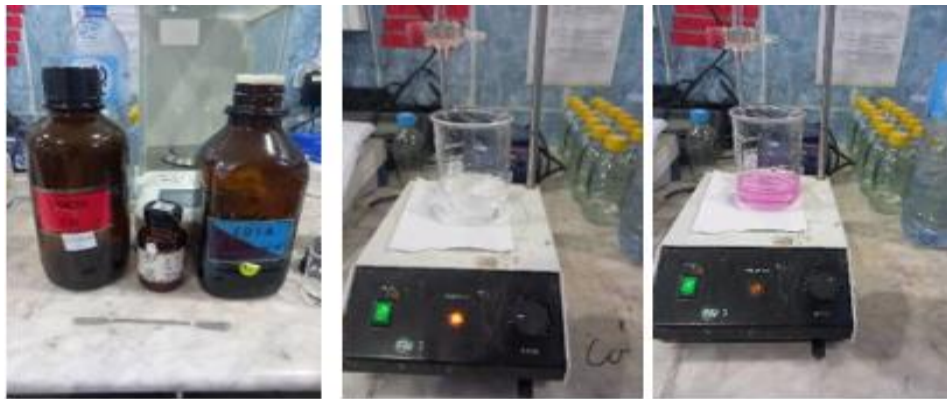


Figure 2: Dosage de Calcium (Ca^{2+}) (Laimeche, 2024)

La détermination de la concentration en mg/L de calcium peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{V1 \times \text{CEDTA} \times F \times \text{M}_{\text{Ca}^{2+}}}{\text{P.E}} \times 1000$$

D'où :

V1 : Volume d'EDTA nécessaire pour une concentration donnée.

CEDTA : Concentration molaire d'EDTA (**0,01 M/l**).

$\text{M}_{\text{Ca}^{2+}}$: Masse molaire du calcium en g.

F : Facteur

P.E : Prise d'essai (volume de l'échantillon nécessaire pour ce dosage)

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{V1 \times 0.01 \times F \times 40}{50} \times 1000$$

Donc : $\text{Ca}^{2+} = V1 \times F \times 8$

- (V2) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$: - Prendre **50 ml** d'eau à analyser.
- Ajouter **2 ml** de NH_4OH (**10,1**).
 - Ajouter noir eriochrome.
 - Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage bleu (**Figure 3**).



Figure 3 : Dosage de Magnésium (Mg^{2+}) (Laimeche, 2024)

La détermination de la concentration en mg/L de magnésium peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Mg}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{(\text{V2}-\text{V1}) \times \text{CEDTA} \times \text{F} \times \text{MMg}^{2+}}{\text{P.E}} \times 1000$$

D'où :

V2 : Le volume total d'EDTA utilisé lors de la titration.

CEDTA : Concentration molaire d'EDTA (**0,01 M/L**).

MMg²⁺ : Masse molaire du magnésium en g.

F : Facteur

P.E : Prise d'essai (volume de l'échantillon nécessaire pour ce dosage)

$$\text{Mg}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{(\text{V2}-\text{V1}) \times 0.01 \times \text{F} \times 24.3}{50} \times 1000$$

Donc : $\text{Mg}^{2+} = (\text{V2} - \text{V1}) \times \text{F} \times 4.86$

1.4 Dosage de Sodium (Na^+) et Potassium (K^+) :

Principe :

Lorsqu'une solution est pulvérisée dans une flamme, l'eau ou le solvant s'évapore ; les sels et leurs produits de décomposition sont dissociés à l'état d'atomes ou de radicaux. Ceux-ci sont excités par l'énergie thermique de la flamme ; leur retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission d'une radiation de fréquence caractéristique de l'élément mis en solution et dont l'intensité est fonction de sa concentration. (Rodier et al., 2009)

Mode opératoire

- - Allumer et étalonner le photomètre à flamme (JENWAY).
- - Remplacer la cuvette d'eau distillée par une cuvette contenant une solution étalon de

- sodium (Na^+) ou de potassium (K^+) à une concentration de **10 mg/L**.
- Ajuster la lecture à **10 mg/L**.
- Retirer la cuvette contenant la solution étalon et la remplacer par une cuvette d'eau distillée pour vérifier si l'écran affiche zéro.
- Remplacer la cuvette d'eau distillée par une cuvette contenant une solution étalon de
- sodium ou de potassium à **10 mg/L** et vérifier si l'écran affiche la valeur de **10**.
- Faire passer les échantillons et lire une fois que la valeur affichée sur l'écran se stabilise (Figure.4).



Figure 4 : Dosage de Sodium (Na^+) et Potassium (K^+) (Khelif & Labboun, 2021)

1.5 Dosage de chlorures (Cl^-) :

Principe :

Le dosage de chlorure dans l'eau repose sur le principe de précipitation. Dans la méthode de Mohr, on utilise une solution standard d'argent (Ag^+) pour précipiter les ions chlorure (Cl^-) présents dans l'échantillon d'eau sous forme de chlorure d'argent (AgCl). Le point final du dosage est déterminé par l'apparition d'un précipité de chlorure d'argent, indiquant que tout le chlorure a réagi avec l'argent.

Réactifs :

Nitrate d'argent, $\text{AgNO}_3(0,01\text{N})$.

Chromate de potassium K_2CrO_4 (10‰)

Mode opératoire : Introduire 5mL d'échantillon dans un erlenmeyer ; Ajouter 2 gouttes de dichromate de potassium K_2CrO_4 (10%) comme indicateur coloré. Titrer avec le nitrate d'argent AgNO_3 (0,01N) jusqu'à l'apparition d'une coloration brunâtre (Figure 5).



Figure 5 : Dosage de chlorures (Cl⁻) (Laimeche, 2024)

Expression des résultats :

$$Cl = \frac{V(AgNO_3) * N(AgNO_3) * MCl * 1000}{Pe}$$

Où :

V(AgNO₃) : Chute de la burette (ml).

N(AgNO₃) : Normalité de AgNO₃ (N=0.01).

MCl : Masse équivalente de Cl⁻(mg/l).

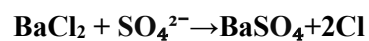
F : Facteur de correction (F=0.83).

Pe : Volume de la prise d'essai (mL).

1.6 Dosage des sulfates (SO₄²⁻)

Principe :

Pour doser les sulfates dans une solution, une méthode courante est l'utilisation d'une solution de chlorure de baryum (BaCl₂) pour précipiter les ions sulfate sous forme de sulfate de baryum (BaSO₄).



Réactifs :

- Solution stabilisante, (100mL d'eau distillé + 60ml HCl pur + 200mL éthanol + 150g chlorure de sodium+ 100mL de glycérol +1000ml d'eau distillé q.s.p).
- Solution de chlorure de baryum, (15g de chlorure de baryum+ 0.5ml de Hcl pur + 100ml eau distillé).

Mode opératoire :

- Prendre 20 ml d'eau à analyser puis compléter à 100mL d'eau distillée ;
- Ajouter 5mL de la solution stabilisante
- Ajouter 2mL de chlorure de baryum

- Agiter énergiquement pendant **1 mn**
- Lire sur le spectrophotomètre, l'absorbance à la longueur d'onde $\lambda=420 \text{ nm}$ (Figure 6).



Figure 6 : Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) (Laimeche, 2024)

1.7 Dosage des nitrates (NO_3^-)

Principe :

La méthode au salicylate de sodium pour le dosage des nitrates repose sur la formation d'un complexe coloré jaune, appelé paranitrosylate de sodium, lorsque les nitrates réagissent avec le salicylate de sodium dans un milieu basique. Cette réaction constitue la base d'un dosage colorimétrique des nitrates dans l'eau. En mesurant l'absorbance de la solution à une longueur d'onde spécifique, généralement autour de 410 nm, on peut déterminer la concentration de nitrates dans l'échantillon.

Réactifs (Rodier et al, 2009) :

- Solution de salicylate de sodium à **10 g/L** à renouveler toutes les 24 heures.
- Acide sulfurique concentré ($d = 1,84$).
- Solution d'hydroxyde de sodium :
- hydroxyde de sodium **200 g**.
- sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique **50 g**.
- eau déionisée *q.s.p.* **1 L**.

Dissoudre avec précaution l'hydroxyde de sodium dans **800 mL** d'eau déionisée, ajouter le sel sodique EDTA. Après dissolution et refroidissement, transvaser la solution dans une fiole jaugée, ajuster le volume à 1 litre. Conserver cette solution dans un flacon de poly-éthylène.

– Solution d'azoture de sodium : azoture de sodium 50 mg eau déionisée *q.s.p.* **100 ml**.

– Solution mère étalon d'azote nitrique à **100 mg/L** : nitrate de potassium anhydre **722 mg** et compléter avec eau déionisée *q.s.p.* **1 000 mL** À renouveler tous les deux mois.

– Solution fille étalon d’azote nitrique à **5 mg/L**. Amener **50 mL** de la solution mère à **1 000 mL** avec de l’eau déionisée.

Établissement de la courbe d’étalonnage :

Dans une série de capsules de **60 ml**, on introduit successivement :

Tableau 1 : Préparation des solutions de la courbe d’étalonnage des nitrates

| Numéro des capsules | T | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Solution étalon d’azote nitrique (5 mg/l) en ml. | | 0 | 1 | 2 | 5 |
| Eau permutée en ml. | 10 | 9 | 8 | 5 | 0 |
| Correspondance en mg/l d’azote nitrique. | 0 | 0.5 | 1 | 2.5 | 5 |
| Solution d’azoture de sodium en ml. | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Acide acétique en ml. | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |

Mode opératoire (Amara et Guebla, 2018) :

- Prendre 10 ml de l’échantillon à analyser.
- Ajouter **2 à 3 gouttes** de NaOH à **30 %**.
- Ajouter **1 ml** de salicylate de sodium.
- Evaporer à sec au bain marie ou à l’étuve **75 - 88° C**.
(ne pas surcharger ni surchauffer très longtemps) laisser refroidir.
- Reprendre le résidu avec **2 ml** de H₂SO₄ laisser reposer **10 mn**.
- Ajouter **15 ml** d'eau distillée.
- Ajouter **15 ml** de tartrate double de sodium et de potassium puis passer au spectrophotomètre au **415nm** (Figure 7).

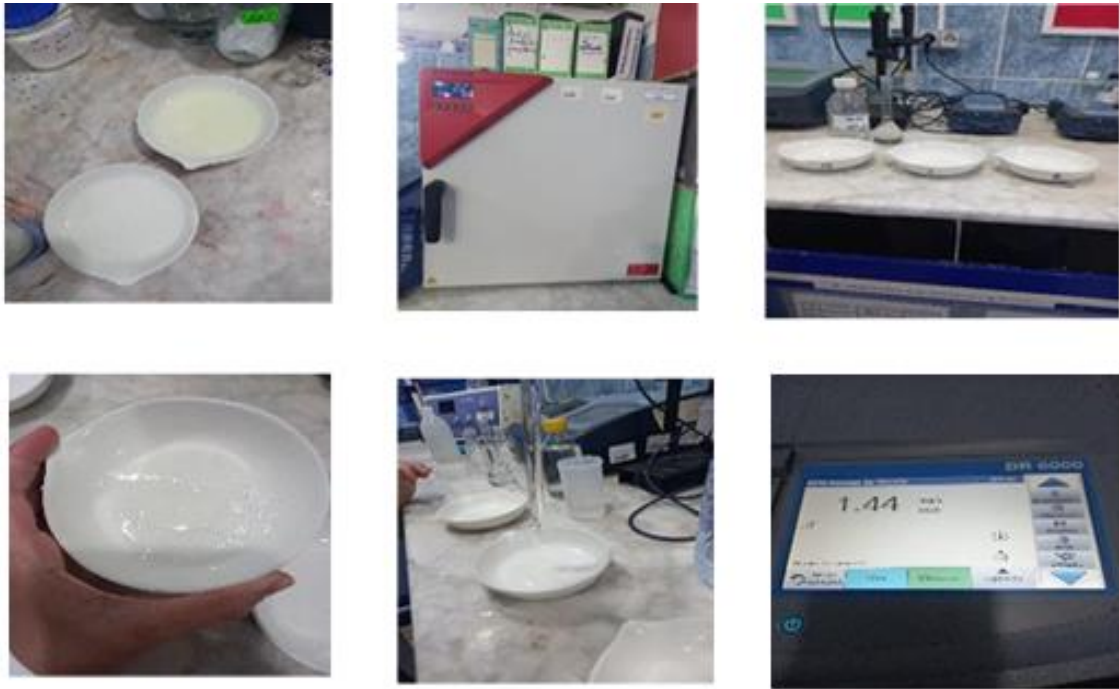


Figure 7 : Dosage des nitrates (NO_3^-) (Laimèche, 2024)

Expression des résultats : Pour une prise d'essai de **10 mL**, la courbe donne directement la teneur en azote nitrique exprimée en milligrammes par litre d'eau. Pour obtenir la teneur en nitrate (NO_3), multiplier ce résultat par **4,43** (Rodier et al, 2009)

1.8 Dosage des nitrites (NO_2^-) :

Principe :

La diazotation de l' amino-4-benzènesulfonamide par les nitrites en milieu acide et sa copulation avec le dichlorure de *N*-(naphtyl-1) diamino-1,2éthane donne un complexe coloré pourpre susceptible d'und dosage spectrométrique. (Rodier et al, 2009)

Réactifs :

- Acide orthophosphorique ($d = 1,70$).
- Réactif de diazotation :

| | | |
|--|----------------|------------------|
| Amino-4-benzènesulfonamide | 40 g. | |
| Dichlorure de <i>N</i> -(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane | 2g. | |
| Acide orthophosphorique ($d = 1,7$) | 100 mL. | |
| Eau déionisée <i>q.s.p.</i> | | 1 000 mL. |

Mélanger dans un bécher **800 mL** d'eau déionisée et **100 mL** d'acide phosphorique, ajouter l' amino-4-benzènesulfonamide puis après dissolution, ajouter le dichlorure de *N*-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane. Agiter jusqu'à complète dissolution. Transvaser la solution dans une fiole jaugée de **1 000 mL**, ajuster le volume avec de l'eau déionisée, mélangé. Conservée au réfrigérateur, cette solution est stable un mois

- Solution mère étalon d'azote nitreux (NO_2) à **100 mg/L** :

nitrite de sodium **492,8 mg**
eau déionisée *q.s.p.* **1 000 mL**

Conservée en flacon de verre inactinique, cette solution est stable un mois.

- Solution fille étalon d'azote nitreux (NO_2) à **1 mg/L** :

Diluer au **1/100** la solution précédente avec de l'eau déionisée.

Établissement de la courbe d'étalonnage :

Introduire dans une série de fioles jaugées de **50 mL** :

Tableau 2 : Préparation des solutions de la courbe d'étalonnage des nitrites

| Numéro des fioles | T | I | II | III | IV | V |
|--|----------|----------|-----------|------------|-----------|----------|
| Solution fille étalon à 1 mg/L (mL) | 0 | 1 | 2.5 | 5 | 7.5 | 10 |
| Eau déionisée (mL) Correspondance en milli grammes par litre d'azote | 50 | 49 | 47.5 | 45 | 42.2 | 40 |
| Nitreux (NO_2) | 0 | 0.02 | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
| Réactif de diazotation (mL) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de **543 nm**. Construire la courbe d'étalonnage.

Mode opératoire :

Introduire **50 mL** d'eau à analyser dans une fiole jaugée puis poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage. Tenir compte de la valeur lue pour le témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage (Figure 8).

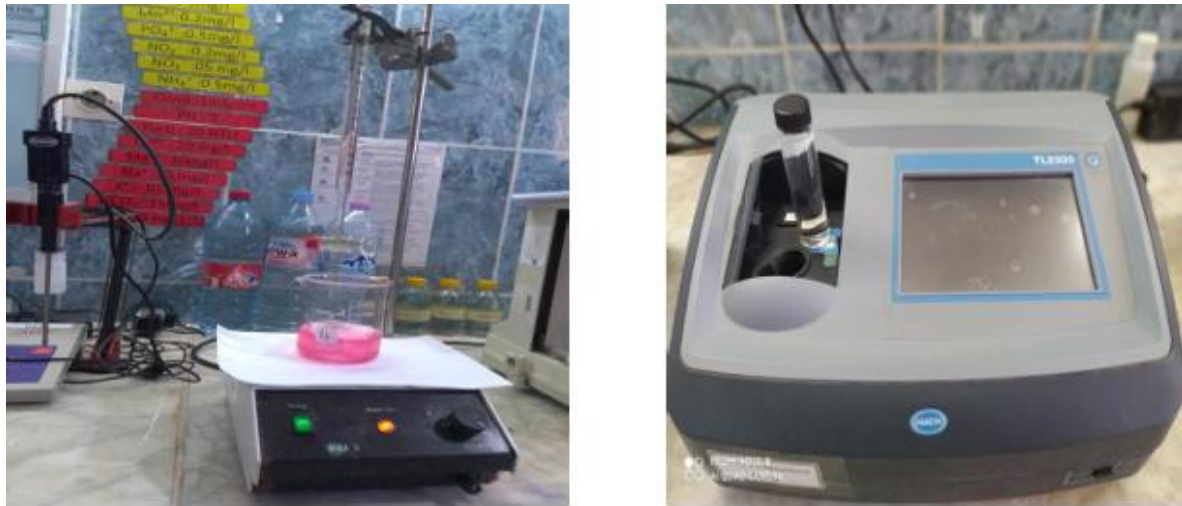


Figure 8 : Dosage des nitrites (NO_2^-). (Khelif & Labboun, 2021)

Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de **50 mL**, la courbe donne directement la teneur en azote nitreux (NO_2), exprimée en milligrammes par litre d'eau. (Rodier et al, 2009)

1.9 Dosage de l'ammonium (NH_4^+) :

Principe :

Mesure spectrométrique du composé bleu formé par réaction de l'ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite en présence de nitroprussiate de sodium

Réactif :

- | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Réactif I | - Acide dichloroisocyanurique | 2 g. |
| | - Hydroxyde de sodium (NaOH) | 32 g. |
| | - H ₂ O distillée | q.s.p 1000 ml. |
| Réactif II (coloré) | - Tricarbonate de sodium..... | 130 g |
| | - Salicylate de sodium..... | 130 g. |
| | - Nitroprussiate de sodium | 0.97 g. |
| | - H ₂ O distillée..... | q.s.p 1000 ml |

Mode opératoire :

- Prendre **40 ml** d'eau à analyser
- Ajouter **4 ml** du réactif I

- Ajouter **4 ml** du réactif II et ajuster à **50 ml** avec H₂O distillée et attendre 1h. 30 L'apparition de la coloration verdâtre indique la présence de : NH₄⁺ Effectuer la lecture à **655 nm** (Figure 9).

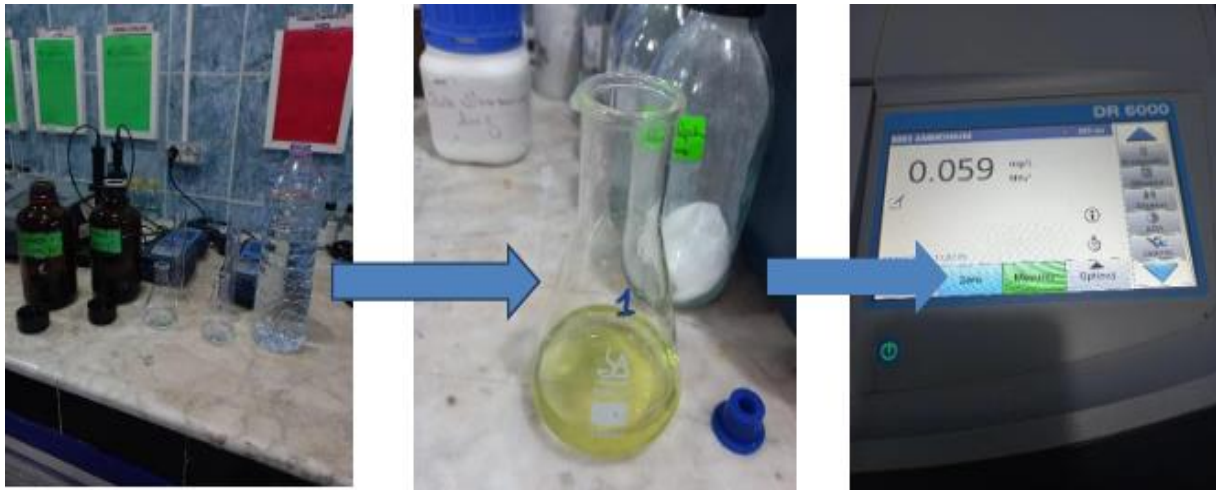


Figure 9 : Dosage de l'ammonium (NH₄⁺) (Laimeche, 2024)

Expression des résultats :

Le résultat est donné directement en mg/l

4.10 Dosage des phosphates (PO₄³⁻) :

Principe :

En milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue susceptible d'un dosage spectrométrique. (Rodier et al, 2009)

Réactifs :

Réactif Mixte :

- A : Heptamolybdate d'ammonium **13 g.**
Eau distillée **100 ml.**
- B : Tartrate d'antimoine **0.35 g.**
Eau distillée **100 ml.**
- C : Acide sulfurique pur **150 ml**
Eau distillée **150 ml.**

(A + B) + C 500 ml d'eau distillée.

Acide ascorbique à 10 % :

- Acide ascorbique.....**10g.**
- Eau distillée**100ml.**

Solution mère à **50 mg/l** PO₄³⁻

Solution fille à **2 mg/l** PO₄³⁻

Courbe d'étalonnage (Amara et Guebla, 2018) :

Tableau 3 : Préparation des solutions de la courbe d'étalonnage phosphates

| | | | | | | |
|---------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| N° Fiole | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| filie à 25 mg/l P | 0 | 0.3 ml | 0.6 | 1.2 | 2.4 | 4.8 |
| 40 ml eau distillée | 40 | 40 ml | 40 | 40 | 40 | 40 |
| [c] P | 0.0 | 0.015 | 0.03 | 0.06 | 0.120 | 0.240 |
| [c] en PO_4^{3-} | 0.0 | 0.0459 | 0.0918 | 0.1836 | 0.3672 | 0.7340 |
| Acide ascorbique (ml) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Réactif mélangé (ml) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Attendre 10 mn. | | | | | | |

Mode opératoire (Arioua et al, 2022) :

- 40 ml d'eau à analyser.
- 1 ml acide ascorbique
- 2 ml du réactif mixte.
- Attendre 10 mn le développement de la couleur bleue.
- Effectuer la lecture à une longueur d'onde de 880nm (Figure 10).



Figure 10 : Dosage des phosphate (PO_4^{3-}). (Laimeche, 2024)

Expression des résultats :

Le résultat est donné directement en mg/l.

Référence bibliographique :

Amara et Guebla(2018) Evaluation des qualités physicochimique et microbiologique de l'eau de la ville d'A in-Maâbed, Mémoire de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 100p.

Arioua et al (2022) Étude de la qualité d'eau potable dans la Région du Hodna. Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 60p.

Azlaoui et Zenati (2018). Evaluation de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau consommée au site de l'université Ziane Achour de Djelfa, Mémoire de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 84p.

CEAEQ (2015) Centre d'expertise en analyse environnemental du Québec- Canada, Méthode d'analyse Ma.115-cond.1.1 Détermination de la conductivité méthode électrométrique, 9p.

MELCCDP (2023) Ministère de l'environnement de la lutte contre les changements climatiques de la faune et des parcs-Québec, Méthode d'analyse Ma.100-pH1.1, détermination du pH, ISBN 978-2-550-93917-7,11p.

Rodier et al (2009) l'analyse de l'eau, 9^e éd. Dunod paris. 1579p. ISBN 978-2-10-054179-9.

Toledo (2022) Mettler Toledo, Guide des mesures de conductivité (Théorie et pratique sur la conductivité), 64p.

Laimeche L (2024). Etude comparative de la qualité d'eau potable distribuée (Eau de robinet) et les sources naturelles dans la ville de Tissemsilt. Mémoire de Master. Université de Tissemsilt. 101p.

Khelif A& Labboun I (2021) . Étude des paramètres physico-chimiques des sources thermale de l'Ouarsenis (Cas de Sidi Slimane Tissemsilt). Mémoire de Master. Université de Tissemsilt. 101p.