



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 الفلاحة 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 :

Étude comparative des modèles d'indice de la qualité de l'eau et analyse statistique multivariée (cas des réservoirs de stockage d'eau potable de la ville de Djelfa)

Présenté par : BENLARBI Nakhla

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

DEDICACES

*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 BOUTELDJAOUI 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 tiens également à remercier mon co-promoteur **Monsieur HEBCHI Samir**, pour m'avoir fourni les données nécessaires et pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer un stage au sein de laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE) de Djelfa.*

***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 région de Djelfa présente un climat semi-aride à aride, avec de faibles précipitations et un taux d'évaporation élevé. Les principales eaux souterraines se situent dans trois zones : la plaine d'Ain Oussera, le synclinal de Djelfa, et les nappes du Zahrez. Une étude a été réalisée sur la composition physico-chimique de l'eau de plusieurs réservoirs alimentant la ville de Djelfa. Cette étude visait à mieux comprendre leurs propriétés chimiques et physiques, avec pour objectif principal d'évaluer la qualité de l'eau selon les normes algériennes et celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Les paramètres physico-chimiques étudiés concernent la température, la turbidité, le pH, la conductivité électrique, les TDS, l'ammonium, les nitrites, les nitrates, le calcium, magnésium, le potassium, les sulfates, le bicarbonate, les chlorures, le sodium, la dureté totale. Les résultats obtenus sont comparés aux normes internationales de l'OMS ainsi qu'aux normes Algériennes, qui servent de référence pour leur interprétation. Les teneurs en TDS de l'eau (Réservoir de 05 Juillet) respectent les normes de l'OMS (<1000 mg/L) ainsi que la réglementation algérienne (<1500 mg/L). La dureté des eaux analysées les classe comme très dures, avec plus de 300 mg/L de CaCO_3 . Par ailleurs, Les concentrations de TDS de l'eau (réservoir de Berbih) respectent les normes de l'OMS et la réglementation algérienne. La dureté moyenne de l'eau est de $507,53$ mg/L, la classant comme très dure. Les indices de qualité de l'eau (CCE-WQI, WQI arithmétique et WQI pondéré) ont révélé que tous les échantillons prélevés au niveau du réservoir du 5 juillet présentaient une qualité d'eau excellente selon les normes algériennes. Par ailleurs, La classification de l'eau du réservoir Berbih, selon l'indice CCE-WQI, révèle deux classes de qualité : « excellente » et « bonne ». L'indice arithmétique de qualité de l'eau (WQI) indique que tous les échantillons analysés sont d'excellente qualité. Par ailleurs, l'indice WQI pondéré classe l'ensemble des échantillons dans les catégories « excellente » et « bonne ». Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) (Réservoir de 05 Juillet) montrent que deux facteurs, F1 et F2, expliquent $73,46$ % de la variance totale. L'ACP des individus révèle la présence de trois groupes distincts. L'application de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a révélé trois clusters : (C1 : T et pH), (C2 : CE et TDS) et (C3 : Turbidité). De plus, la CAH a classé les échantillons en trois clusters distincts. Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) (réservoir de Berbih) mettent en évidence deux facteurs (F1 et F2) qui expliquent ensemble **63,26** % de la variance totale. La classification ascendante hiérarchique (CAH) des variables a identifié deux clusters : le premier (C1) regroupe les variables température (T) et pH, tandis que le deuxième (C2) inclut la conductivité électrique (CE), les solides totaux dissous (TDS) et la turbidité. Par ailleurs, la CAH des individus a révélé l'existence de quatre clusters distincts.

Mots-clés : eau potable, Paramètres physico-chimiques, statistiques multivariées, ville de Djelfa

Abstract

The Djelfa region has a semi-arid to arid climate, with low rainfall and high evaporation rates. The main groundwater resources are located in three areas: the Ain Oussera plain, the Djelfa syncline, and the Zahrez aquifers. An investigative study was conducted on the physicochemical composition of several reservoirs supplying the city of Djelfa, aimed at improving the understanding of their chemical and physical properties. The main objective was to assess water quality in accordance with Algerian standards and those set by the World Health Organization (WHO). The physicochemical parameters studied concern temperature, turbidity, pH, electrical conductivity, TDS, ammonium, nitrites, nitrates, calcium, magnesium, potassium, sulfates, bicarbonate, chlorides, sodium, and total hardness. The results were compared to WHO international standards as well as Algerian standards, which serve as a reference for their interpretation. The TDS levels in the water (July 5 Reservoir) comply with WHO standards (<1000 mg/L) as well as Algerian regulations (<1500 mg/L). The hardness of the analyzed water samples classifies them as very hard, with over 300 mg/L of CaCO_3 . Furthermore, the TDS concentrations of the water (Berbih Reservoir) meet WHO standards and Algerian guidelines. The average water hardness is 507.53 mg/L, classifying it as very hard. The water quality indices (CCE-WQI, arithmetic WQI, and weighted WQI) revealed that all samples collected from the July 5 Reservoir exhibited excellent water quality according to Algerian standards. Furthermore, the classification of water from the Berbih Reservoir, according to the CCE-WQI index, reveals two quality classes: “excellent” and “good.” The arithmetic water quality index (WQI) indicates that all analyzed samples are of excellent quality. Furthermore, the weighted WQI classifies all samples into the “excellent” and “good” categories. The results of the principal component analysis (PCA) (July 5 Reservoir) show that two factors, F1 and F2, explain 73.46% of the total variance. The PCA of the samples reveals the presence of three distinct groups. The application of Ascending Hierarchical Classification (AHC) identified three clusters: (C1: T and pH), (C2: EC and TDS), and (C3: Turbidity). Furthermore, the AHC classified the samples into three distinct clusters. The results of the principal component analysis (PCA) (Berbih Reservoir) highlight two factors (F1 and F2) that together explain 63.26% of the total variance. The ascending hierarchical clustering (AHC) of the variables identified two clusters: the first (C1) groups the variables temperature (T) and pH, while the second (C2) includes electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), and turbidity. Furthermore, the AHC of the individuals revealed the existence of four distinct clusters.

Keywords: drinking water, physicochemical parameters, multivariate statistics, city of Djelfa

ملخص

تتميز منطقة الجلفة بمناخ شبه جاف إلى جاف، مع هطول أمطار قليل ومعدل تبخر مرتفع. وتقع الموارد الرئيسية للمياه الجوفية في ثلاث مناطق: سهل عين وسارة ، ومنحدر الجلفة ، وطبقات المياه الجوفية في الزهرز. أجريت دراسة استقصائية حول التركيب الفيزيائي-الكيميائي لعدد من الخزانات التي تزود مدينة جلفة بالمياه، بهدف تعزيز فهم خصائصها الكيميائية والفيزيائية. وكان الهدف الرئيسي هو تقييم جودة المياه وفقاً للمعايير الجزائرية وتلك التي وضعتها منظمة الصحة العالمية (WHO). وتتعلق المعلومات الفيزيائية والكيميائية التي تمت دراستها بدرجة الحرارة، والعكارة، ودرجة الحموضة، والتوصيلية الكهربائية (CE) ، والمواد الصلبة الذائبة (TDS) ، والأمونيوم، والنترات، والنتريت، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والبوتاسيوم، والكبريتات، والبيكربونات، والكلوريدات، والصوديوم، والصلابة الكلية. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها بالمعايير الدولية لمنظمة الصحة العالمية وكذلك بالمعايير الجزائرية، التي تُستخدم كمرجع لتفسيرها. تتوافق مستويات المواد الصلبة الذائبة (TDS) في المياه (خزان 5 جويلية) مع معايير منظمة الصحة العالمية ($1000 <$ مجم/لتر) وكذلك مع اللوائح الجزائرية ($1500 <$ مجم/لتر). تصنف صلابة المياه التي تم تحليلها على أنها شديدة الصلابة، حيث تزيد عن 300 ملغ/لتر من $CaCO_3$ من ناحية أخرى، تتوافق تركيزات المواد الصلبة الذائبة (TDS) في المياه (خزان بربيج) مع معايير منظمة الصحة العالمية واللوائح الجزائرية. يبلغ متوسط صلابة المياه 507.53 ملغ/لتر، مما يصنفها على أنها شديدة الصلابة. أظهرت مؤشرات جودة المياه (CCE-WQI) ، و WQI الحسابي، و WQI المرجح) أن جميع العينات المأخوذة من خزان 5 جويلية تتمتع بجودة مياه ممتازة وفقاً للمعايير الجزائرية. من ناحية أخرى، يُظهر تصنيف مياه خزان بربيج ، وفقاً لمؤشر CCE-WQI ، فئتين من الجودة: «ممتازة» و«جيدة». ويشير المؤشر الحسابي لجودة المياه (WQI) إلى أن جميع العينات التي تم تحليلها ذات جودة ممتازة. من ناحية أخرى، يصنف مؤشر WQI المرجح جميع العينات في فئتي «ممتازة» و«جيدة». تظهر نتائج تحليل المكونات الرئيسية (ACP) (خزان 5 جويلية) أن عاملين، F1 و F2، يفسران 73,46% من التباين الكلي. يكشف تحليل المكونات الرئيسية (ACP) للأفراد عن وجود ثلاث مجموعات متميزة. وكشف تطبيق التصنيف الهرمي التصاعدي (CAH) عن ثلاث مجموعات (C1: T و (C2: CE ، pH) و (TDS و (C3: العكارة). علاوة على ذلك، صُنّف التصنيف الهرمي التصاعدي (CAH) العينات إلى ثلاث مجموعات متميزة. تُبرز نتائج تحليل المكونات الرئيسية (ACP) (خزان بربيج) عاملين (F1 و F2) يفسران 63,26% من التباين الكلي. حددت التصنيف الهرمي التصاعدي (CAH) للمتغيرات مجموعتين: تجمع المجموعة الأولى (C1) بين متغيري درجة الحرارة (T) ودرجة الحموضة (pH) ، بينما تشمل المجموعة الثانية (C2) التوصيلية الكهربائية (CE) والمواد الصلبة الذائبة الكلية (TDS) والعكارة. من ناحية أخرى، كشف التصنيف الهرمي التصاعدي للأفراد عن وجود أربع مجموعات متميزة.

الكلمات المفتاحية: مياه الشرب، المعلومات الفيزيائية والكيميائية، الإحصاءات متعددة المتغيرات، مدينة الجلفة

Table des Matières	
Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table de matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I : Cadre physique et les ressources en eau de la wilaya de Djelfa	
I.1.Introduction	4
I.2. Situation géographique de la wilaya de Djelfa	4
I.3. Contexte climatique de la wilaya de Djelfa	5
I.3.1. Généralités sur le climat de la wilaya de Djelfa	5
I.3.2. Diagramme de Bagnouls et Gaussen	6
I.3.3. Climagramme d'emberger	6
I.4. Aperçu géologique	8
I.4.1. Le Tertiaire :	8
I.4.2. Le Mio-Pliocène :	8
I.4.3. Le Crétacé :	8
I.4.3.1. Les séries du Crétacé :	8
I.4.3.2. Le Crétacé inférieur :	9
I.5. Aperçu hydrogéologique	9
I.5.1. Synclinal Nord de Djelfa	9
I.5.2. Synclinal Sud d'Ain El Ibel	13
I.6. Réseau hydrographique de la wilaya de Djelfa	13
I.7. Les ressources en eaux de la wilaya de Djelfa	14
I.7.1. Les eaux souterraines de la wilaya de Djelfa	14
I.7.2. Les eaux superficielles de la wilaya de Djelfa	15
I-8- Les potentialités hydriques de la ville de Djelfa.	16
I.8.1. Les forages d'eau exploités pour alimenter la ville de Djelfa	17

I.8.2. Les ouvrages de stockage (réservoirs de stockage) de la wilaya de Djelfa	18
I.9. Conclusion	20
Chapitre II : Matériel et méthodes	
II.1. Introduction	21
II.2. Analyses statistiques multivariées	22
II.2.1. L'analyse en composante principale (ACP)	22
II.2.1.1. Représentation des variables	23
II.2.1.2. Représentation des individus	23
II.2.2. La classification ascendante hiérarchique (CAH)	24
II.3. Présentation des modèles de l'indice de qualité de l'eau (WQI)	25
II.3.1. Indice de qualité de l'eau pondéré (WQI)	25
II.3.2. Indice de qualité de l'eau arithmétique pondéré (WAWQI) :	27
II.3.3. L'indice de qualité de l'eau CCME-WQI :	29
II.4. Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse	31
II.4.1. Balance ionique	32
II.5. Conclusion	33
Chapitre III : valuation de la potabilité des eaux à l'aide d'indices de qualité des eaux	
III.1. Introduction	34
III.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux	35
III.2.1. Réservoir de 05 Juillet	35
III.2.1.1. Les paramètres physiques des eaux	35
III.2.1.2. Paramètres chimiques des eaux	38
III.2.1.2.1. La dureté totale	39
III.2.1.2.2. Les cations	40
III.2.1.2.3. Les anions	43
III.2.2. Réservoir de Berbih	47
III.2.2.1. Les paramètres physiques des eaux	47
III.2.2.2. Paramètres chimiques des eaux	47
III.2.2.2.1. La dureté totale	47
III.2.2.2.2. Les cations	47
III.2.2.2.3. Les anions	48
III.3. Distribution statistique des paramètres chimiques des eaux	48
III.3.1. Réservoir de 05 Juillet	48
III.3.2. Réservoir de Berbih	49
III.4. Évaluation de la qualité de l'eau	51
III.4.1. Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré)	51

III.4.1.1. Réservoir de 5 JUILLET	51
III.4.1.2. Normes Algériennes	51
III.4.1.3. Normes OMS	51
III.4.1.2. Réservoir de BERBIH	52
III.4.1.2.1. Normes Algériennes	52
III.4.1.2.2. Normes OMS	53
III.4.2. Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique)	53
III.4.2.1. Réservoir de 5 JUILLET	53
III.4.2.1.1. Normes Algériennes	53
III. 4.2.1.2. Normes OMS	53
III.4.2.2. Réservoir de BERBIH	54
III.4.2.2.1. Normes Algériennes	54
III.4.2.2.2. Normes OMS	54
III.4.3. Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI)	55
III.4.3.1. Réservoir de 5 JUILLET	55
III.4.3.1.1. Normes Algériennes	55
III.4.3.1.2. Normes OMS	56
III.4.3.2. Réservoir de BERBIH	56
III.4.3.2.1. Normes Algériennes	56
III.4.3.2.2. Normes OMS	57
III.5. Conclusion	57
Chapitre IV: Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux	
IV.1. Introduction	59
IV.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux	60
IV.2.1 Les paramètres physiques des eaux	60
IV.2.1.1 Réservoir de 05 Juillet	60
IV.2.1.1.1. La température (TC°)	60
IV.2.1.1.2. Le potentiel d'hydrogène pH	60
IV.2.1.1.3. La conductivité électrique CE (µS/cm)	62
IV.2.1.1.4. Les solides dissous totaux (TDS)	62
IV.2.1.1.5. La turbidité	62
IV.2.1.2. Réservoir de Berbih	64
IV.2.1.2.1. La température (TC°)	64
IV.2.1.2.2. Le potentiel d'hydrogène pH	65
IV.2.1.2.3. La conductivité électrique CE (µS/cm)	65
IV.2.1.2.4. Les solides dissous totaux (TDS)	67

IV.2.1.2.5. La turbidité	67
IV.3. Classification des eaux des réservoirs de 05 Juillet et Berbih	68
IV.3.1. Classification des eaux selon la conductivité électrique (CE)	68
IV.3.2. Classification des eaux selon les solides totaux dissous (TDS)	69
IV.3.3. Classification des eaux selon la conductivité électrique (CE)	69
IV.3.4. Classification des eaux selon les solides totaux dissous (TDS)	69
IV.4. Etude de la qualité des eaux par approche statistique multivariée	70
IV.4.1. Matrice de corrélation (Réservoir 05-Juillet)	70
IV.4.2. Analyse en Composante principale (ACP)	71
IV.4.2.1. Analyse en composante principale (ACP) (Réservoir 05-JUILLET)	71
IV.4.2.1.1. Projection des variables sur les plans factoriels	71
IV.4.2.1.2. Projection des individus sur les plans factoriels (Réservoir 05 Juillet)	73
IV.4.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)	75
IV.4.3.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des variables	75
IV.4.3.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des individus	75
IV.4.4. Matrice de corrélation (Réservoir BERBIH)	77
IV.4.5. Analyse en composante principale (ACP) (Réservoir BERBIH)	77
IV.4.5.1. Projection des variables sur les plans factoriels	77
IV.4.5.2. Projection des individus sur les plans factoriels (Réservoir Berbih)	79
IV.4.6. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ((Réservoir BERBIH)	80
IV.4.6.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des variables	80
IV.4.6.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des individus ((Réservoir BERBIH)	81
IV.5. Conclusion	84
Conclusion générale	87
Recommandations	88
Références Bibliographiques	90
Annexes	

Liste des abréviations

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.
D.R.E	Direction des Ressources en Eau
ACP	Analyse en Composantes Principales
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CE	Conductivité électrique
TDS	Solides dissous totaux
TH	Titre Hydrotimétrique (Dureté total)
WQI	Water Quality Index
WAWQI	Weighted Arithmetic Water Quality Index)
CCME	Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement

Liste des tableaux

Tableau.I.1. Les unités hydrogéologiques de la wilaya de Djelfa	16
Tableau I.2.: Les retenues collinaires de la wilaya de Djelfa	16
Tableau. I.3: Liste des forages exploités dans la ville de Djelfa	17
Tableau I.4 : Réservoirs de la ville de Djelfa	18
Tableau II.1: Pondération des paramètres de qualité	27
Tableau II.2 : Classification des eaux basée sur les valeurs WQI (Ramakrishnaiah et al., 2009)	27
Tableau II.3 : Évaluation de la qualité de l’eau selon L’indice de qualité de l’eau arithmétique pondérée (IQE) (Chatterji et Raziuddin, 2002).	29
Tableau II.4 : Catégorie de qualité de l’eau en fonction de l’WQI du CCME	31
Tableau II.5 : Méthodes d’analyse des paramètres chimiques (ADE, 2026)	32
Tableau III.1 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir5 Juillet (2022-2025)	35
Tableau III.2 : Classification des eaux selon leur dureté totale (Sawer et Mccarthy, 1967)	39
Tableau III.3 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir Berbih (2022-2025)	46
Tableau III.4 : Statistique descriptive de l’indice de qualité de l’eau (WQI pondéré) /Réservoir : R. 5 juillet)	52
Tableau III.5 : Indice de qualité de l’eau (WQI pondéré) / Normes Algériennes (Réservoir: R. 5 juillet).	52
Tableau III.6 : Indice de qualité de l’eau (WQI pondéré) / Normes OMS (Réservoir: R. 5 juillet).	52
Tableau III.7 : Statistique descriptive de l’indice de qualité de l’eau (WQI pondéré) / Réservoir: R. BERBIH.	53
Tableau III.8 : Indice de qualité de l’eau (WQI pondéré) / Normes Algérienne (Réservoir: R. BERBIH).	53

Tableau III.9 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) / Normes OMS (Réservoir: R. BERBIH)	53
Tableau III.10 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) /Réservoir: R. 5 juillet)	54
Tableau 11 : Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes Algériennes (Réservoir: R. 5 juillet).	54
Tableau III 12 : Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes OMS (Réservoir: R. 5 juillet).	54
Tableau III.13 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / (Réservoir R. BERBIH).	55
Tableau III.14 : Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes Algériennes (Réservoir: R. BERBIH).	55
Tableau III.15: Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes OMS (Réservoir: R. BERBIH)	55
Tableau III.16 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) /(Réservoir R. 5 juillet).	56
Tableau III.17 : Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes Algériennes (Réservoir: R. 5 juillet).	56
TableauIII.18 : Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes OMS (Réservoir: R. 5 juillet).	56
Tableau III.19: Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) /(Réservoir BERBIH).	57
Tableau III.20 : Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes Algériennes (Réservoir: BERBIH).	57
Tableau III.21: Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes OMS (Réservoir: BERBIH).	57
Tableau IV.1 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir 5 Juillet (2025)	60
Tableau IV.2 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir Berbih (2025)	64
Tableau IV.3: Classification des eaux de réservoir de 05 Juillet (Detay and Carpenter 1997).	68
Tableau IV.4: Classification des eaux de réservoir de 05 Juillet (solides dissous totaux (TDS) (Freeze et Cherry (1979)	69

Tableau IV.5: Classification des eaux de réservoir de Berbih (Detay and Carpenter 1997).	69
Tableau IV.6: Classification des eaux de réservoir Berbih (solides dissous totaux (TDS) (Freeze et Cherry (1979)	70
Tableau IV.7 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques	71
Tableau. IV.8: valeurs propres des composantes principales	71
Tableau. IV.9: Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1 et F2.	73
Tableau IV.10: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques	77
Tableau. IV.11: Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1 et F2.	78
Tableau IV.12. Résumé statistique des paramètres chimiques pour les principaux groupes (Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). (Réservoir de Berbih de la ville de Djelfa)	83

Liste des figures

Figure I.1 : Situation géographique de la wilaya Djelfa. (Source : monographie de Djelfa 2020)	5
Figure I.2: Diagramme ombrothermique de la station de Djelfa (1975 – 2018) (Source : Boudiaf et Kamel, 2018).	7
Figure I.3: Climagramme d'Emberger (Source : Boudiaf et Kamel, 2018).	7
Figure I.4. Carte géologique du synclinal Nord Wilaya de Djelfa à partir de l'extrait de la carte géologique de Djelfa (Source : ANRH).	10
Figure I.5. Carte géologique du synclinal Sud d'Ain Bel Wilaya de Djelfa à partir de l'extrait de la carte géologique de Djelfa (Source : ANRH).	11
Figure I.6: Log stratigraphique synthétique du Synclinal de Djelfa (Source : Chibane et al., 2010)	12
Figure I.7 : Les sous-bassins hydrologiques de la région de Djelfa. (Source : ANRH,2018 modifiée par Mezrag, 2018).	14
Figure I.8 : Réseau hydrographique du sous bassin versant Oued Djelfa-Melah et Daïet Mefiteg (Source : Rahmani,2016).	15
Figure I.9 : Schéma synoptique d'AEP de la ville de Djelfa (Zone 1 : Oued Sedeur-Djelfa ville) (Source, ADE)	19
Figure I.10 : Schéma synoptique d'AEP de la ville de Djelfa (Zone 3 : Oued Sedeur-Djelfa ville) (Source, ADE)	19
Figure I.11 : Schéma synoptique d'AEP de la ville de Djelfa (Zone 2 : Oued Sedeur-Djelfa ville) (Source, ADE)	20
Figure II.1: Passage des variables X_p aux nouvelles variables F_k	22
Figure II.2: Cercle des corrélations	23
Figure II.3: Représentation plane des individus dans le premier plan principal	23
Figure II.4 : Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).	25
Figure II.5: Modèle conceptuel de l'WQI du CCE	31
Figure III.1: Variation de la température des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	36
Figure III.2: Variation de pH des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	37
Figure III.3: Variation de CE des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	37

Figure III.4: Variation de TDS (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	38
Figure III.5: Variation de la turbidité (NTU) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	39
Figure III.6: Variation de la dureté (mg/L CaCO_3) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	40
Figure III.7: Variation de Na^+ (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	41
Figure III.8: Variation de Ca^{2+} (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	42
Figure III.9: Variation de Mg^{2+} (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	42
Figure III.10: Variation de K^+ (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	43
Figure III.11: Variation de Cl^- (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	44
Figure III.12: Variation de SO_4^{2-} (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	45
Figure III.13: Variation de HCO_3^- (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	45
Figure III.14: Variation de NO_3^- (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa	46
Figure III.15 : Distribution statistique des cations (a) et anions (b) des eaux (Réservoir de 05 Juillet)	50
Figure III.16 : Distribution statistique des cations (a) et anions (b) des eaux (Réservoir de Berbih)	51
Figure IV.1: Variation de la température de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa	61
Figure IV.2: Variation de pH de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa	61
Figure IV.3: Variation de la conductivité électrique (CE) de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa	62
Figure IV.4: Variation de la minéralisation totale (TDS) de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa	63

Figure IV.5: Variation de la turbidité de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa	63
Figure IV.6: Variation de la température de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa	65
Figure IV.7: Variation de pH de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa	66
Figure IV.8: Variation de la conductivité électrique (CE) de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa	66
Figure IV.9: Variation de la minéralisation totale (TDS) de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa	67
Figure IV.10: Variation de la turbidité de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa	68
Figure IV.11 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.	72
Figure IV.12 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.	73
Figure IV.13 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (Réservoir 05 Juillet).	74
Figure IV.14 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux de réservoir de 05 Juillet	75
Figure IV.15 : Dendrogrammes des individus de la composition chimique des eaux des eaux de réservoir de 05 Juillet	76
Figure IV.16 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.	78
Figure IV.17 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.	79
Figure IV.18 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (Réservoir Berbih).	80
Figure IV.19 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux de réservoir de Berbih	81
Figure IV.20 : Dendrogrammes des individus de la composition chimique des eaux des eaux de réservoir de Berbih	82

Introduction générale

Introduction générale

1. Zone d'étude et problématique de l'eau

La wilaya de Djelfa, située à 300 km au sud d'Alger, se trouve entre 2° et 5° de longitude est et entre 33° et 35° de latitude nord. Elle est délimitée :

à l'ouest par Tiaret et Laghouat,

à l'est par Biskra et M'sila,

au sud par Ouargla, El Oued et Ghardaïa,

au nord par Tissemsilt et Médéa.

La région Djelfa est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride. Il se marque par des hivers froids et pluvieux et des étés chauds et secs. Les précipitations annuelles ne dépassent pas 336 mm. La température moyenne annuelle est de 14,6°C. Selon la méthode de Thornthwaite, l'évapotranspiration atteint 804,66 mm. Le bilan hydrique (ETR) est de 278,12 mm (Chibane 2010). La zone d'étude présente diverses formations géologiques. Les formations du Barremien, d'une épaisseur de 1500 à 2000 mètres, sont constituées de grès et d'argiles sableuses fissurées, formant un aquifère productif. L'Albien inférieur, d'environ 400 mètres d'épaisseur, est composé de grès continentaux fissurés et contient de nombreuses sources, représentant un aquifère majeur. Enfin, le Turonien se caractérise par du calcaire avec des alternances de marnes en partie supérieure. Sur le plan hydrogéologique, Les ressources en eaux souterraines dans cette région sont issues de quatre aquifères distincts : les grès Barrémiens, les grès Albiens, les calcaires karstiques Turonniens et les dépôts de remplissage Néogènes et Quaternaires (Cornet, 1952; Trayssac, 1981; Chibane 2010).

La pénurie d'eau, accentuée par la croissance démographique et le changement climatique, devient une priorité politique dans de nombreux pays. Les populations des zones arides et semi-arides, déjà vulnérables, risquent de rencontrer une insécurité économique et alimentaire accrue, en particulier en milieu rural. La mobilisation des ressources en eaux superficielles dans la wilaya de Djelfa est très faible, aggravée par des conditions climatiques défavorables, notamment une pluviométrie faible et irrégulière de 100 à 300 mm par an et une évaporation élevée entre 800 et 1000 mm par an. La capacité annuelle des petits barrages et retenues collinaires existants est estimé à 3,89 Hm³ (DRE de Djelfa, 2018). Les eaux souterraines les plus importantes sont celles de la plaine d'Ain Oussera, du synclinal de Djelfa et des nappes du Zahrez (Ouanouki, 2012; ANRH de Djelfa, 2018). Le volume des ressources en eau souterraine mobilisée est estimé à 55,32 Hm³ (DRE de Djelfa, 2018). Les eaux souterraines d'Oued Seddeur est représentent la principale source d'eau potable pour la ville de Djelfa, située à 25 km au sud dans le synclinal sud de Djelfa. L'exploitation de cette nappe par plus

Introduction générale

de 20 forages entraîne des risques comme le rabattement du niveau du champ captant, la dégradation de la qualité de l'eau et une diminution des débits d'exploitation (ANRH, 2018 ; DRE, 2018). La ville de Djelfa est alimentée par plusieurs réservoirs et châteaux d'eau, ayant une capacité totale de 32050 m³, représentant environ 28,21 % des capacités de stockage de la wilaya (ADE de Djelfa, 2026). La majorité des ouvrages se trouvent autour de la ville, avec une capacité variant de 50 à 3250 m³. Ces ouvrages peuvent être installés individuellement ou regroupés par deux, trois ou quatre au sein d'une même enceinte de stockage.

2. Objectifs de ce travail

- ✓ Dans le cadre de cette étude, une évaluation de la qualité physico-chimique des eaux des réservoirs de stockage, qui assurent l'approvisionnement en eau potable (AEP) de la ville de Djelfa, sera réalisée.
- ✓ L'utilisation de différents modèles d'indice de qualité de l'eau (WQI) pour évaluer la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine, conformément à des normes nationales et internationales (OMS).

3. Approche et méthodologie

Pour atteindre les objectifs fixés et répondre à la problématique posée, une approche multidisciplinaire a été utilisée. Cette démarche méthodologique a combiné des méthodes statistiques multivariées (ACP et CAH), ainsi que l'indice de qualité de l'eau (WQI). Dans la présente évaluation on a utilisé trois indices de qualité (WQI), l'indice CCME qui est élaboré par le conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME), l'indice pondéré de la Qualité de l'eau (WQI) et l'indice arithmétique pondéré de la qualité de l'eau (WAWQI).

4. Structure de mémoire

Nous commençons tout d'abord par une **introduction générale**.

Les **quatre chapitres** suivants sont ensuite présentés :

- ✓ Le **premier chapitre** aborde les aspects liés au milieu physique de la région de Djelfa, à savoir la situation géographique, le contexte climatique, la géologie et l'hydrogéologie, ainsi que les ressources en eau de la wilaya de Djelfa.

Introduction générale

- ✓ Le **deuxième chapitre** est consacré à la présentation des différents modèles d'indices de qualité de l'eau, ainsi qu'aux techniques statistiques multivariées utilisées pour évaluer la qualité physico-chimique des eaux des réservoirs de stockage de la ville de Djelfa.
- ✓ Le **troisième chapitre** est dédié à l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa. Il portera sur l'interprétation des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau analysés. À travers cette partie, nous avons essayé d'identifier les paramètres physico-chimiques les plus pertinents pour comprendre la minéralisation de l'eau.
- ✓ Le **quatrième chapitre** est consacré à une étude statistique multivariée (**ACP** et **CHA**) des différents paramètres physico-chimiques afin de mieux comprendre le comportement chimique des eaux des réservoirs de Djelfa.

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

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, le présent chapitre a pour objet la présentation du milieu physique et des ressources hydriques de la wilaya de Djelfa. Ce chapitre traite également les aspects géographique, géologique et hydrogéologique de la zone d'étude, en s'appuyant sur une synthèse de divers travaux de recherche et publications antérieures en relation avec notre projet de fin d'étude. Le choix de la zone d'étude est motivé par la disponibilité des données physico-chimiques des eaux échantillonnées par les services de l'Algérienne des eau (ADE) à partir des réservoirs de stockage d'eau potable de la ville de Djelfa.

I.2. Situation géographique de la willaya de Djelfa

La wilaya de Djelfa est localisée dans la partie centre-nord de l'Algérie, au sein de la région des Hauts Plateaux ([Figure I.1](#)). Cette région représente une zone de transition entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud, ce qui lui donne une position géographique particulière. Cette situation géographique stratégique lui confère un rôle de point de jonction entre les régions septentrionales, caractérisées par un climat méditerranéen, et les régions méridionales, marquées par un climat saharien. Par ailleurs, il est important de souligner que sa position centrale au niveau national lui attribue une importance économique et territoriale notable ([Zegrab et al., 2021](#) [Mellouk et Bentchich, 2021](#))

La willaya de Djelfa, couvrant 32.256,35 km² et représentant 1,36% du territoire national, se situe au centre du pays. Découpée administrativement en 1974, elle comprend 36 communes regroupées en 12 Dairates ([Imessaoudene, 2014](#)). Elle est limitée ([Figure I.1](#)) :

- ❖ Au Nord, par les wilayas de Médéa et de Tissemsilet.
- ❖ A l'Est, par les wilayas de M'Silla et de Biskra
- ❖ A l'Ouest, par les wilayas de Laghouat et de Tiaret.
- ❖ Au Sud par les wilayate de Ouargla et de Ghardaïa

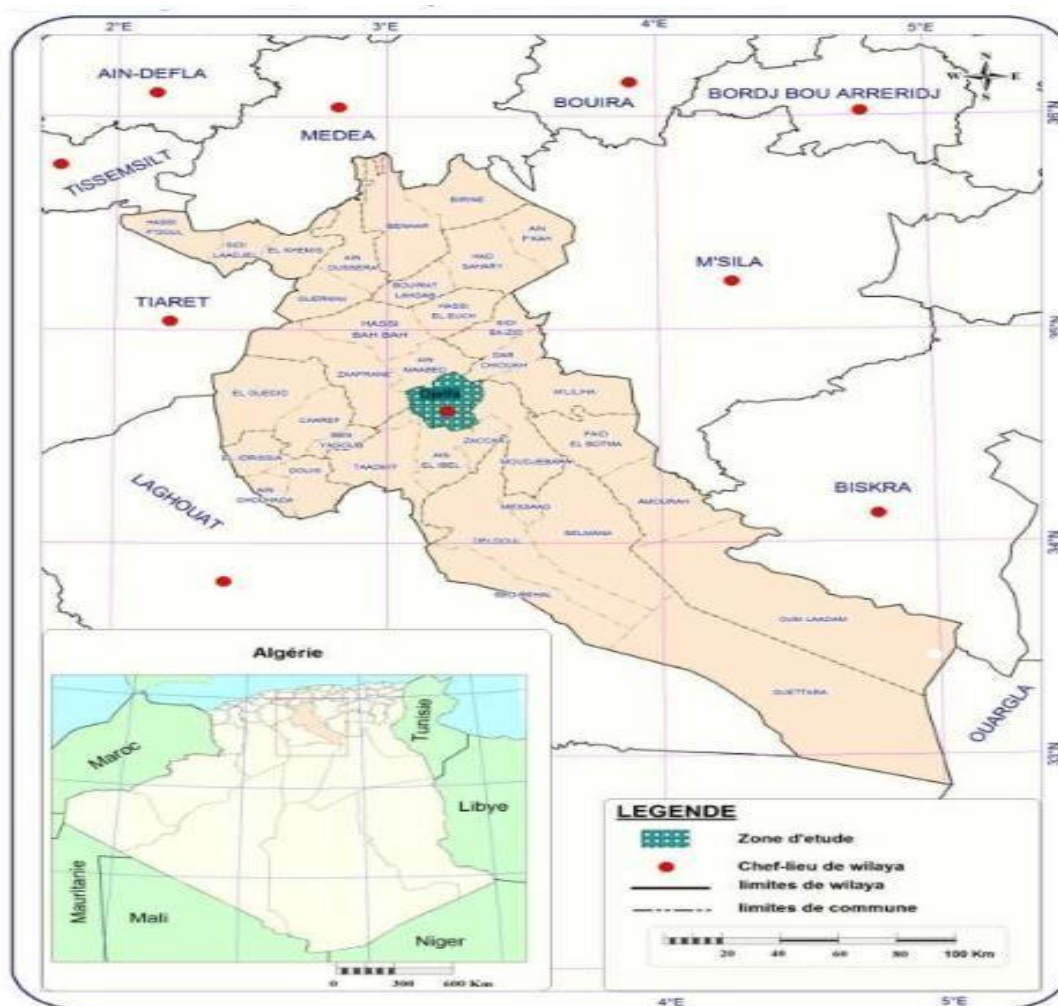


Figure I.1 : Situation géographique de la wilaya Djelfa. (Source : INCT, 2009)

I.3. Contexte climatique de la wilaya de Djelfa

I.3.1. Généralités sur le climat de la wilaya de Djelfa

La wilaya de Djelfa se caractérise par un régime climatique semi-aride à aride, caractérisé par une influence continentale marquée. Dans les régions centrales et septentrionales de la wilaya, le climat est semi-aride, tandis que les zones méridionales sont caractérisées par des conditions climatiques essentiellement arides (DPAT, 2010). Cette région se caractérise par des étés chauds et secs, ainsi que par des hivers froids (Imessaoudene, 2014; Louarghi.2022).

I.3.2. Diagramme de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen est un outil d'analyse largement utilisé pour étudier le régime climatique d'une région et identifier la durée de la saison sèche. Cette dernière est déterminée par les périodes au cours desquelles les précipitations mensuelles sont inférieures au double des températures moyennes mensuelles ($P < 2T$) (Figure I.2). La représentation graphique de cette relation fait appel à la relation entre les courbes de température et de précipitation (Imessaoudene, 2014).

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.

I.3.3. Climagramme d'Emberger

Le climagramme d'Emberger (1931) permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée en calculant le coefficient pluviothermique, par la formule suivante (Emberger, 1931) :

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

Où :

- **Q** : quotient pluviométrique modifié d'Emberger
- **P** : précipitation moyennes annuelles (mm).
- **M** : moyenne des maxima (températures maximales journalières) du mois le plus chaud, en kelvins
- **m** : moyenne des minima (températures minimales journalières) du mois le plus frais, en kelvins.

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).

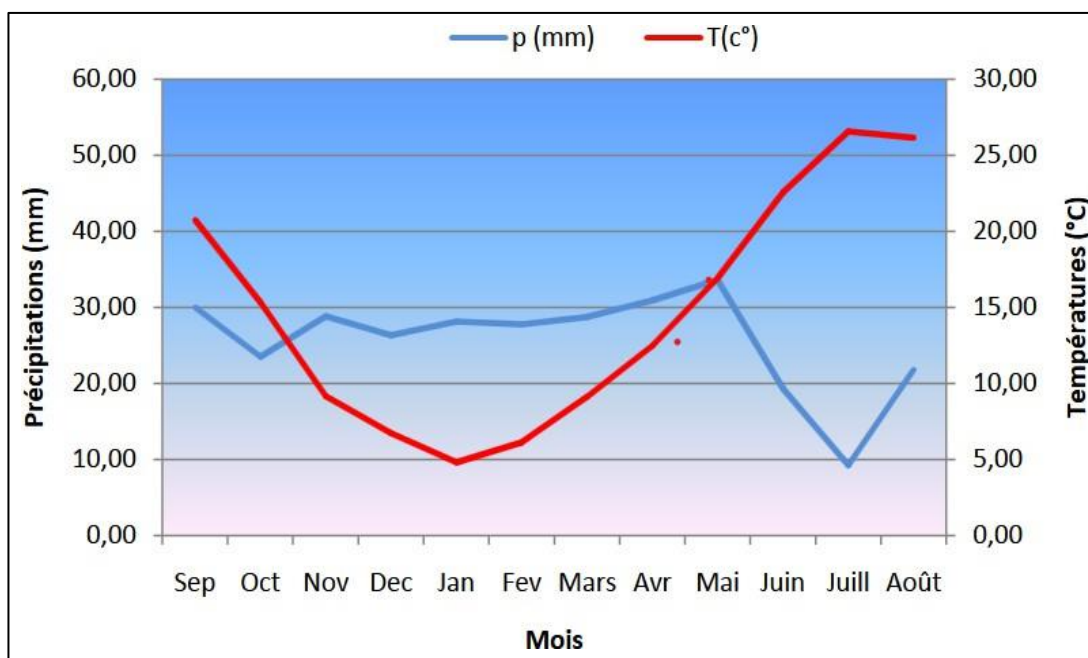


Figure I.2: Diagramme ombrothermique de la station de Djelfa (1975 – 2018) (Source : Boudiaf et Kamel, 2018).

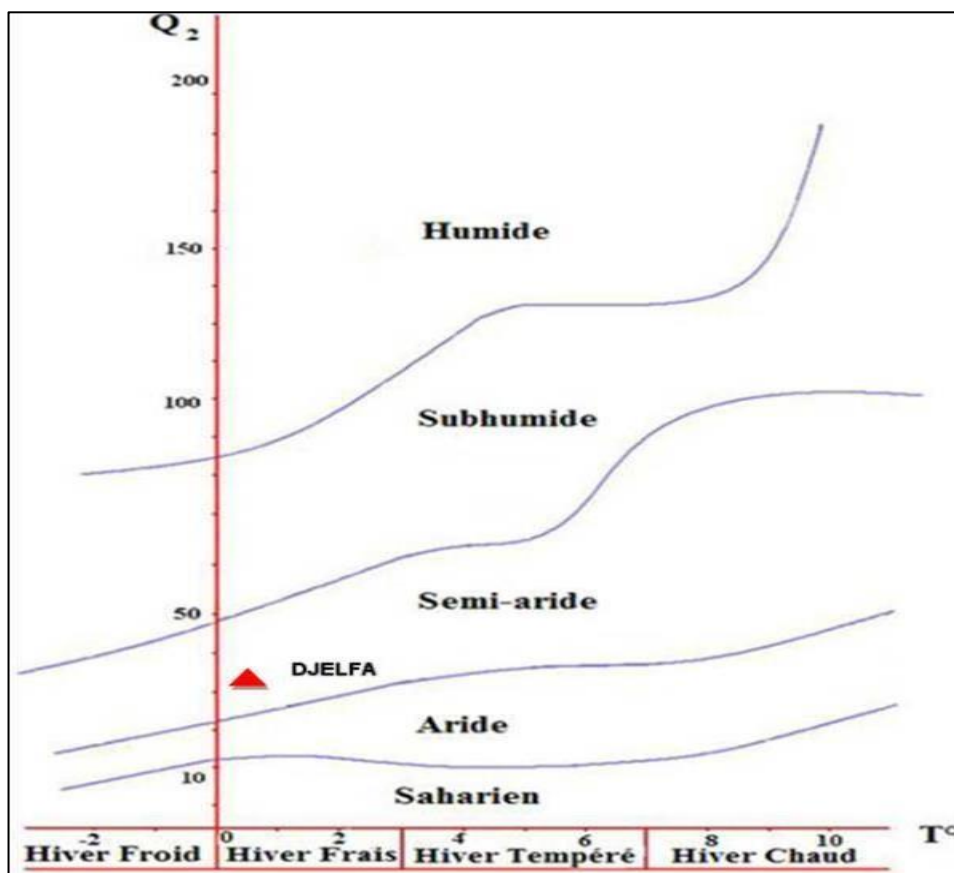


Figure I.3: Climagramme d'Emberger (Source : Boudiaf et Kamel, 2018).

I.4. Aperçu géologique

La structure géologique de l'Algérie du Nord trouve son origine dans les mouvements orogéniques Hercyniens et Alpains, qui ont donné naissance à de vastes ensembles géologiques, parmi lesquels figure l'Atlas saharien. Dans le contexte géologique de la région de Djelfa, des dépôts continentaux datant du Plio- et du Quaternaire ont été détectés (Figures I.4 et I.5). Ces dépôts, situés entre les domaines tellien et saharien, se caractérisent par des couches géologiques simples, essentiellement composées de roches du Plio- et du Miocène, ainsi que par la présence d'un cailloutis calcaire sur des roches marno-calcaires. Le synclinal de Djelfa constitue un exemple remarquable de structure géologique de grande étendue, caractérisée par une topographie régulière (Zegrab et al., 2021).

I.4.1. Le Tertiaire :

Le Tertiaire est principalement constitué d'un horizon conglomératique à la base et plus argileux en au sommet. Les dépôts quaternaires sont constitués d'importants éboulis de pente, de dunes, d'alluvions torrentielles et de croûtes calcaires discontinues.

I.4.2. Le Mio-Pliocène :

Il se caractérise par une composition géologique qui inclut du calcaire marneux, de la marne et de l'argile bleutée, gréseuse et rouge (Zegrab et al., 2021). Les couches géologiques du Zehrez, qui appartiennent essentiellement au Crétacé (Zegrab et al., 2021).

I.4.3. Le Crétacé :

Il est principalement composé de couches de calcaire, de marne, d'argile et de grès massif, poreux et perméable.

I.4.3.1. Les séries du Crétacé :

Les séries du Crétacé composent le substratum essentiel, tandis que les dépôts du Quaternaire sont dominants dans les bassins (Figure I.4). L'encadrement géologique est principalement issu des plissements du Tertiaire.

Les formations géologiques d'Ain El Ibel, d'après le B.E.R.E.G.H. (2001), sont principalement constituées de :

- Les terrains gréseux du Néocomien sont intercalés de calcaires à débris, de calcaires et de dolomies.
- Les grès barrémiens sont caractérisés par une porosité d'interstices, de fractures et de chenaux, dans lesquels s'intercalent des niveaux marno-gréseux, parfois argileux.

I.4.3.2. Le Crétacé inférieur :

Dans le cadre de l'étude du contexte géologique du Crétacé inférieur ([Figure I.4](#)), il a été observé que celui-ci se caractérise par la présence de séries épaisses, majoritairement d'origine continentale, et composées de dépôts calcaires et marno-calcaires. Le Trias se caractérise par sa composition à la fois argileuse et gypseuse, ainsi que par la présence significative de sel. Le Barrémien se caractérise par la présence de marnes bariolées à gypse, ainsi que par des niveaux gréseux. L'Albien inférieur se distinguait par une série argilo-gréseuse, tandis que l'Albien supérieur est composé de formations argilo-carbonatées, comprenant des dolomies et des calcaires associés à des lamellibranches.

I.5. Aperçu hydrogéologique

I.5.1. Synclinal Nord de Djelfa

Le synclinal de Djelfa ([Figure I.5](#)), situé dans les monts de Ouleds Naïls au centre de l'Atlas Saharien, s'étend selon une orientation Sud-Ouest – Nord-Est et autres. Ce synclinal est formé de matériaux continentaux datant du Trias, Crétacé, Tertiaire et Quaternaire, plissés durant les phases orogéniques Tertiaires ([Cornet, 1952](#) ; [Chibane et al., 2010](#)).

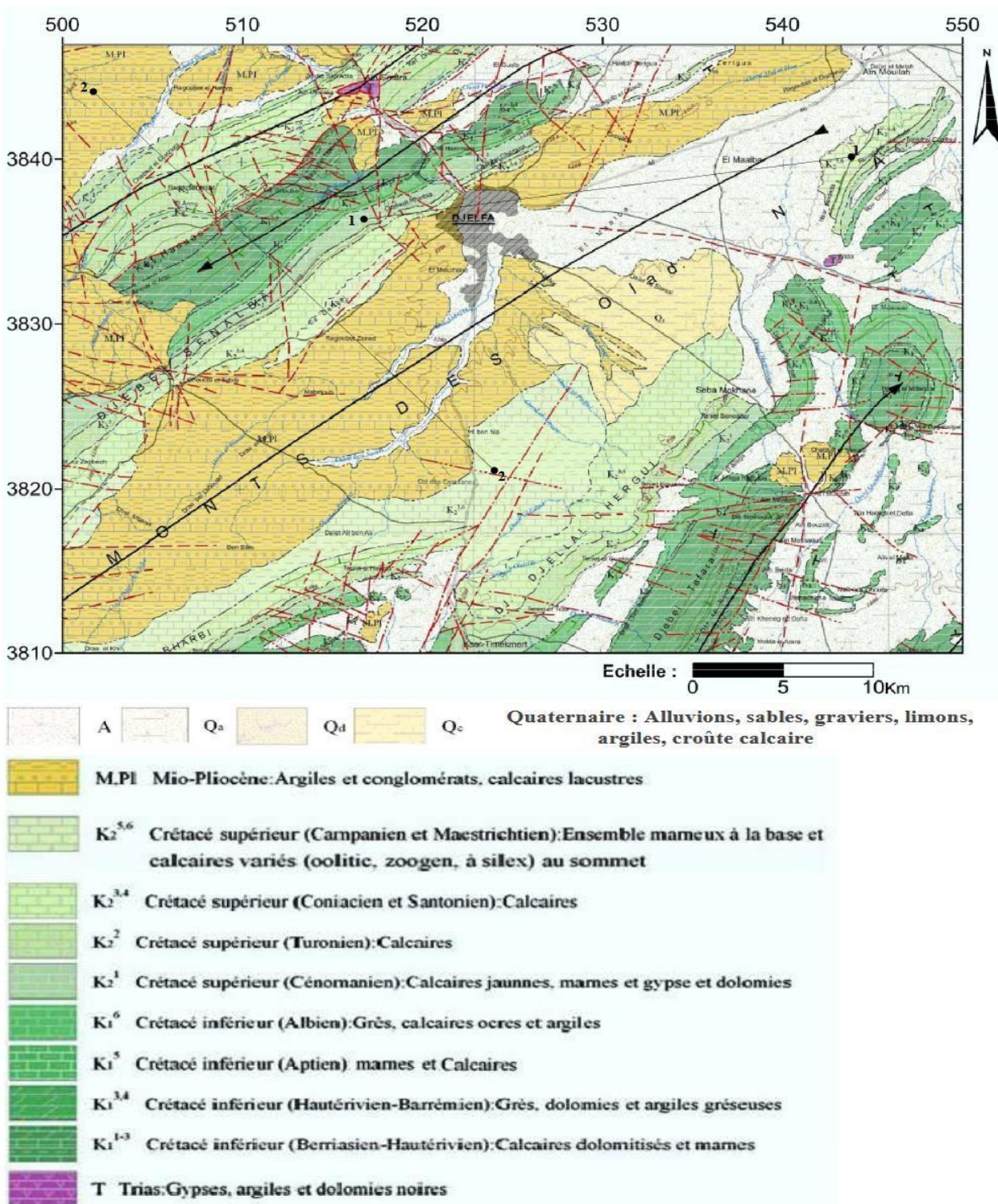


Figure I.4. Carte géologique du synclinal Nord Wilaya de Djelfa à partir de l'extrait de la carte géologique de Djelfa (Source : ANRH).

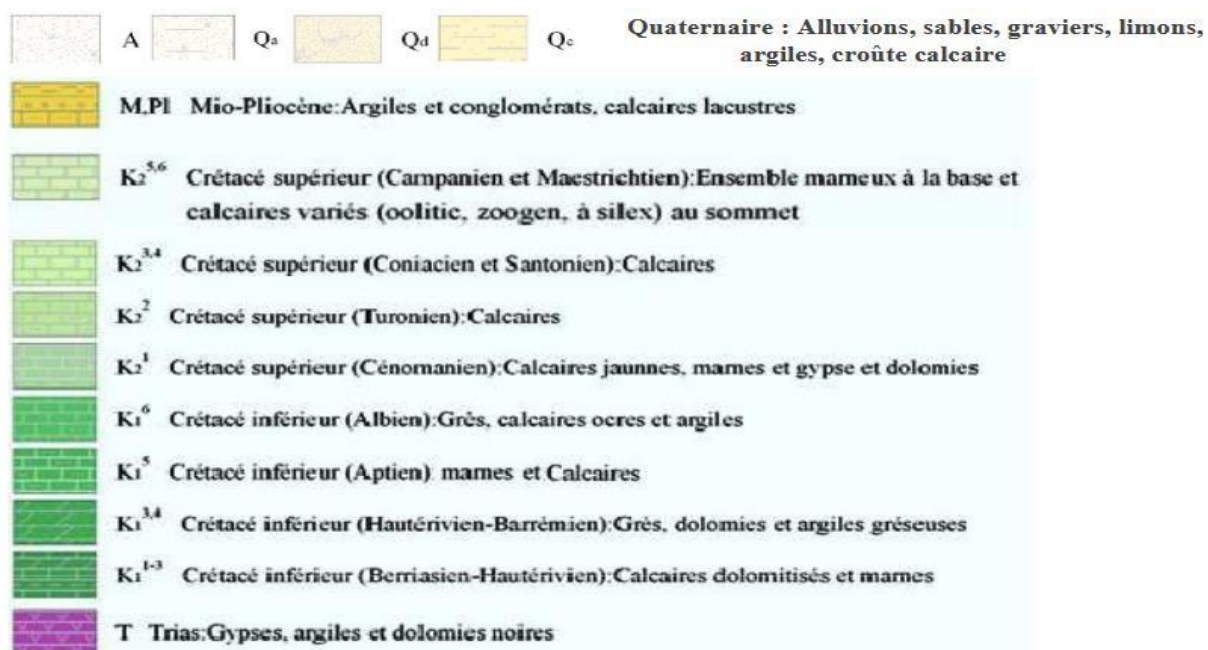
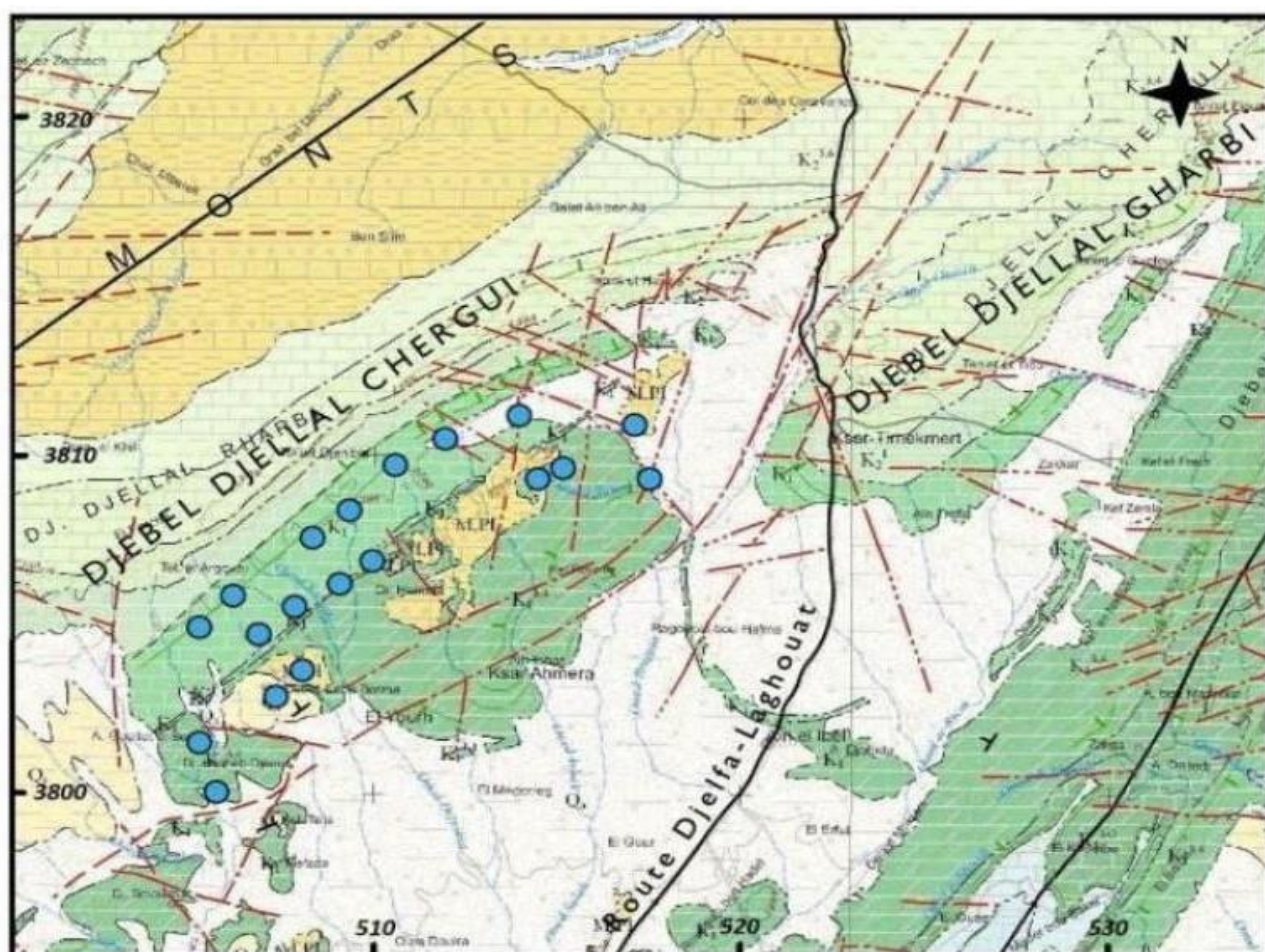


Figure I.5. Carte géologique du synclinal Sud d'Ain Bel Wilaya de Djelfa à partir de l'extrait de la carte géologique de Djelfa (Source : ANRH).

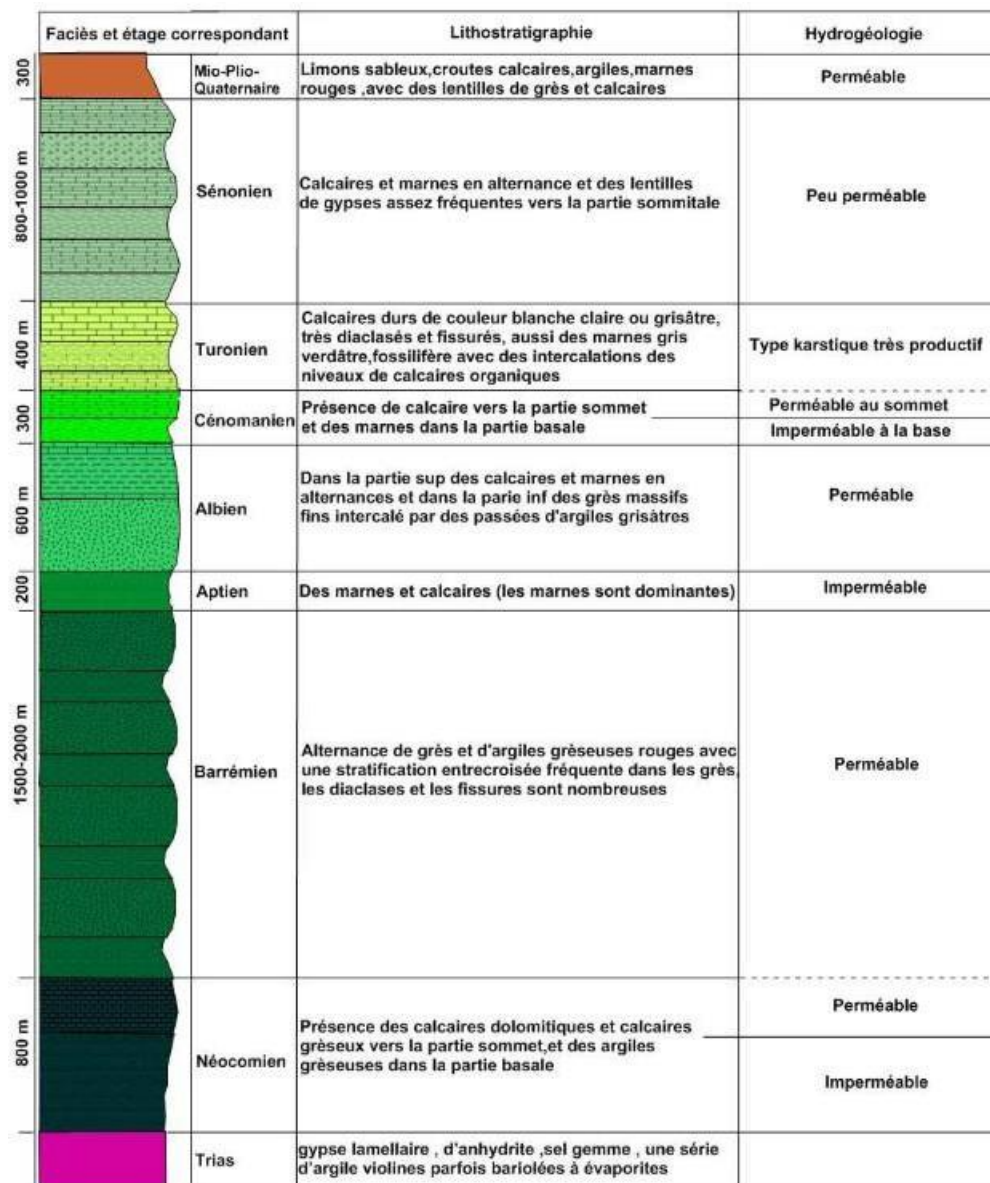


Figure I.6: Log stratigraphique synthétique du Synclinal de Djelfa (Source : ANRH)

Ces formations sont constituées de (Chibane et al., 2010 ; Rahmani, 2016) :

- ✓ Les terrains anciens sont des formations du Trias. Assises carbonatées, grès et marnes d'âge crétacé très importantes.
- ✓ Le remplissage Mio-Plio-Quaternaire est composé principalement de limons, d'argiles, de marnes, de grès et de conglomérats.

I.5.2. Synclinal Sud d'Ain El Ibel

Le synclinal sud de Djelfa, situé dans les monts de Ouleds Naïls de l'Atlas Saharien, est principalement représenté sur les cartes de Djelfa et d'Aflou ([Pouget M. \(1977\)](#)). Dans le cadre de l'étude géologique, le flanc sud, dont l'inclinaison varie entre 12° et 30°, présente un accident tectonique significatif. Ce dernier se distingue par un décrochement dextre qui divise le flanc en deux parties distinctes : Djebel Djellal Gharbi à l'ouest et Djebel Djellal Chergui à l'est de la route Djelfa-Laghouat ([Azlaoui, 2013](#); [ANRH, 2018](#)).

Les forages dans les formations hydrogéologiques Barrémien et Albien au sud-est de Djebel Djellal Gharbi et dans l'ouest de la carte présentent des épaisseurs atteignant jusqu'à 4000 m à l'ouest et plus de 3000 m à l'est ([ANRH, 2018](#) ; [DRE, 2018](#)).

Barrémien

Ces dépôts continentaux sont caractérisés par des alternances de grès et d'argiles gréseuses rouges, avec des grès durs à stratifications entrecroisées. Les bancs de grès sont moins épais au sommet, et des diaclases, alignées avec les failles, sont fréquentes.

Albien

Les formations de l'Albien, visibles autour du synclinal, se constituent essentiellement de grès massifs fins, rouges ou parfois blancs tachetés de noir, intercalés par des argiles grisâtres, avec une épaisseur moyenne de 1500 mètres.

I.6. Réseau hydrographique de la wilaya de Djelfa

Le bassin de Zahrez ([Figure I.6 et Figure I.7](#)) est composé de six sous-bassins distincts : Zahrez Gherbi et Zahrez Chergui au nord, Djelfa et El Idrissia au sud, ainsi que Dar Chioukh à l'est, ce dernier étant drainé par oued Medjdel ([Mezrag, 2018](#)). Dans le cadre de l'étude hydrologique de la région, il a été constaté que plusieurs oueds alimentent les sous-bassins en question. Parmi ces oueds, on peut citer oued Melah, oued Korirech, et oued Hadjia ([Mezrag, 2018](#)). Le réseau hydrographique se caractérise par un développement limité, avec des oueds souvent isolés ou à sec. Cette réalité est rarement reflétée dans les cartes du bassin versant. Le sous-bassin versant de l'Oued Djelfa-Melah présente un réseau hydrographique ramifié, influencé par la structure topographique du bassin. Les cours d'eau s'organisent autour de thalwegs, créant des entailles dans les dépôts Mio-Plio-Quaternaires. L'Oued Djelfa-Melah, qui draine la partie occidentale du synclinal de Djelfa sur 1294

km², est le cours d'eau principal, avec les affluents Oued Msekka et Oued Ben-Naam (Rahmani, 2016).

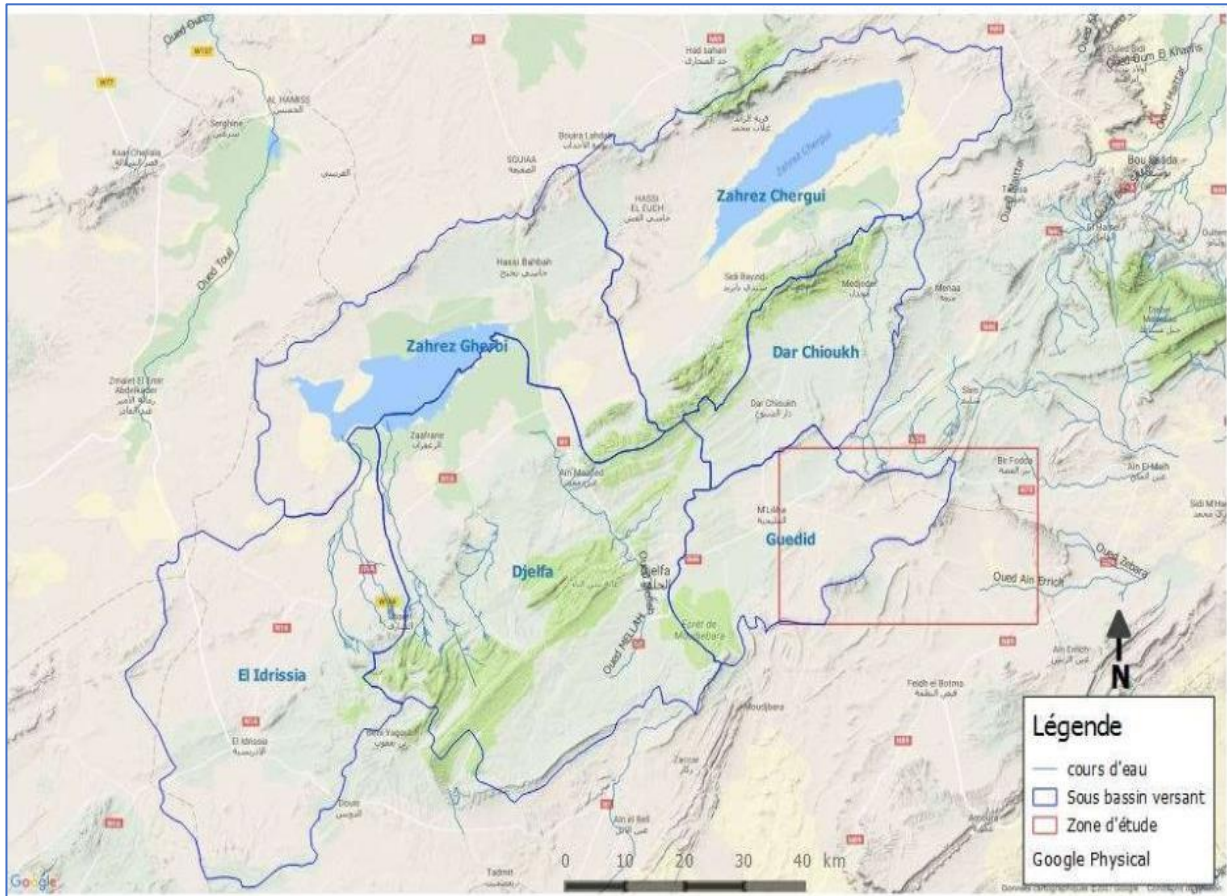


Figure I.7 : Les sous-bassins hydrologiques de la région de Djelfa. (Source : ANRH,2018 modifiée par Mezrag, 2018).

I.7. Les ressources en eaux de la wilaya de Djelfa

Les ressources en eau de la région ne sont en fait pas très bien connues (Ouanouki, 2012):

- ✓ Les eaux souterraines les plus connues sont celles de la plaine d'Ain Oussera, le synclinal de Djelfa et les nappes du Zahrez (Tableau I.1).
- ✓ Les eaux superficielles sont insignifiantes compte tenu de l'absence de barrages et de retenues collinaires importantes en dehors de celles résumées dans le (Tableau I.2).

I.7.1. Les eaux souterraines de la wilaya de Djelfa

Les eaux souterraines se présentent sous forme de nappes, qui peuvent être libres, captives ou alluviales. Dans le contexte de la wilaya de Djelfa, les eaux souterraines constituent une ressource

hydrique d'une importance majeure, en vue de la rareté des eaux de surface, liée aux conditions climatiques semi-arides qui prévalent dans cette région. Dans le cadre de l'étude des ressources en eaux souterraines de la région, il a été révélé que celles-ci sont issues de quatre aquifères distincts. Les formations géologiques de cette région se composent de grès barrémiens, de grès de l'Albien, de calcaires karstiques du Turonien et de dépôts de comblement Néogène-Quaternaire (Chibane et al., 2010; Elguizi & Zeddouri, 2019). Les unités hydrogéologiques présentes dans la région de Djelfa sont présentées dans le (Tableau I.1).

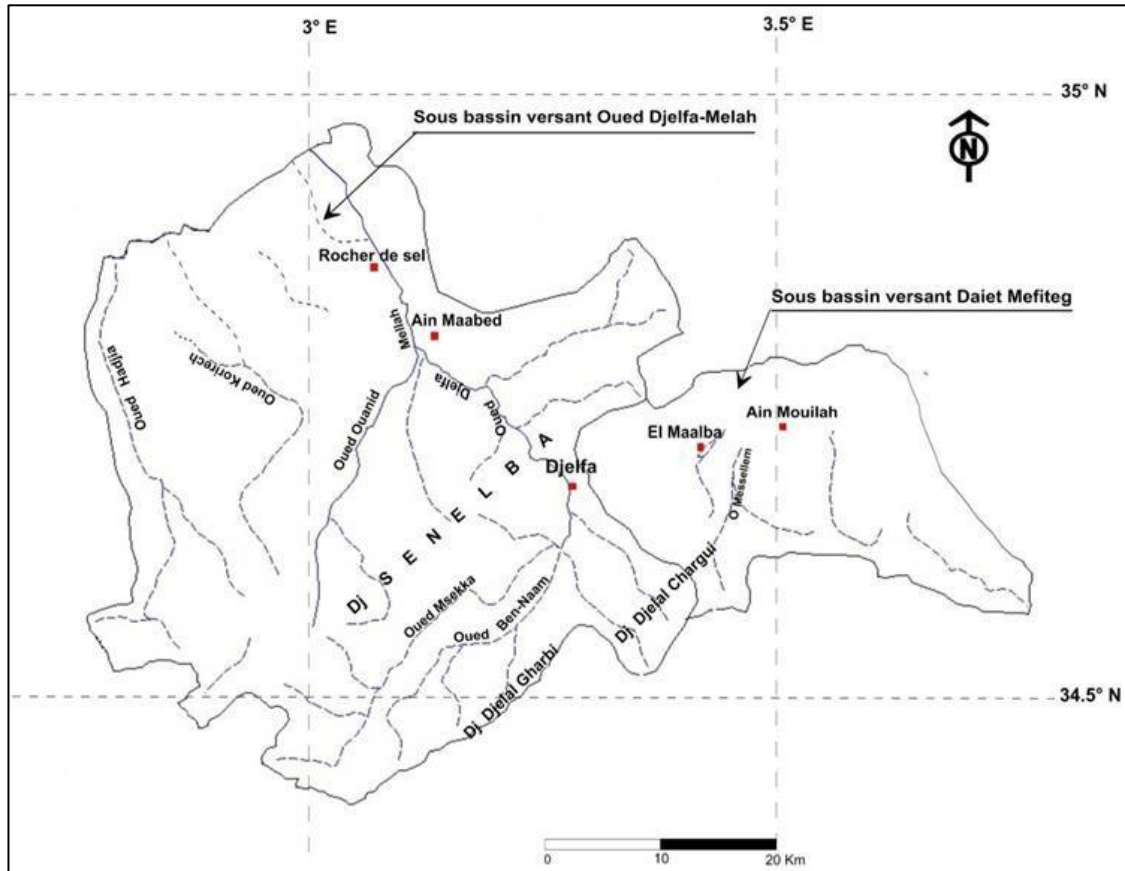


Figure I.8 : Réseau hydrographique du sous bassin versant Oued Djelfa-Melah et Daiet Mefiteg
(Source : Rahmani, 2016).

I.7.2. Les eaux superficielles de la wilaya de Djelfa

Dans la région de Djelfa, la mobilisation des ressources en eaux superficielles est extrêmement limitée, voire négligeable (Ben Melouka, 2021). Cette situation est attribuable à des conditions climatiques défavorables, caractérisées par une pluviométrie faible, irrégulière et souvent torrentielle, avec un déficit annuel de 100 à 300 mm (Ben Melouka, 2021). Dans le cadre de l'étude menée sur le sujet, il a été constaté une évaporation élevée, dont l'ordre de grandeur est estimé entre 800 et 1 000

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

mm par an. Les ouvrages de mobilisation d'eau superficielle existants sont représentés dans le [Tableau I.2\).](#)

Tableau.I.1: Les unités hydrogéologiques de la wilaya de Djelfa

Unité hydrogéologique	Volume mobilisable minima(Hm ³)	Volume mobilisable maxima(Hm ³)
Bassin de Zehrez	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

Source: ANRH de Djelfa, 2018

Tableau I.2: Les retenues collinaires de la wilaya de Djelfa

Communes	Nature de l'ouvrage	Localisation	Volume de mobilisation Hm ³
Charef	Petit Barrage	El Hajia	1,87
Taadmit	Petit Barrage	Toukersane	4,51
Djelfa	Retenue collinaire	Oued Boutreifiss	0,40
Djelfa	Retenue collinaire	Chebaika	0,04
Djelfa	Retenue collinaire	Oued El kiran	0,04
Total			3,89

Source: monographie de Djelfa (2017)

I-8- Les potentialités hydriques de la ville de Djelfa.

Le système de distribution d'eau potable de la ville de Djelfa se constitue des ouvrages hydrauliques suivants :

- ✓ Les ouvrages de captage d'eau souterraine
- ✓ Des stations de pompage (pompage ou surpression).
- ✓ Des réservoirs de stockage
- ✓ Des réseaux de distribution.

I.8.1. Les forages d'eau exploités pour alimenter la ville de Djelfa

Dans le cadre de l'approvisionnement en eau potable de la ville de Djelfa, la direction des ressources en eau de la wilaya (DRE) de Djelfa a réalisé plusieurs forages ([Tableau. I.3](#)) dans la wilaya de Djelfa. Le champ captant d'Oued Seddeur (Albien et Barrémien), situé à 25 km au sud de Djelfa, a fait l'objet d'une exploitation depuis 2007 ([DRE, 2018; Elguizi & Zeddouri, 2019](#)). En 1995, deux forages réalisés dans le cadre d'un projet de cimenterie ont révélé la présence d'un important potentiel aquifère. En l'an 2003, la zone a été désignée comme domaine de protection des ressources hydriques de la wilaya. Une étude approfondie a révélé que dix forages Albien (OS1 à OS5 en 2007, OS9 en 2008 et OS10 à OS13 en 2012) ont été réalisés entre 2007 et 2012, tandis que dix forages au Barrémien (OS6 en 2004, OS7, OS8 en 2007 et OS14 à OS20 en 2015) ont été implantés plus au sud entre 2004 et 2015 ([ADE, 2010; Elguizi & Zeddouri, 2019](#)).

Tableau. I.3: Liste des forages exploités dans la ville de Djelfa

Eléments desystème	Désignation	Volume prélevé (m ³ /j)	Champ de captage
Ressources	ZI1	691,2	La zone industrielle (au sud-ouest de ville)
	ZI5	604,8	
	F9	864	
	F1	2592	Ain Loukarif (au nord de la ville)
	F1Bis	2332,8	
	F4	1382,4	
	F4Bis	864	
	F5	604,8	
	F5 Bis	1036,8	
	Turonien	2592	
	F13	864	
	OS1	1728	Oued Sedar (au sud de la ville)
	OS2	2592	
	OS3	2592	
	OS4	3024	
	OS5	3888	
	OS6	3456	
Total	17	31708,8	

Source: ADE2010

I.8.2. Les ouvrages de stockage (réservoirs de stockage) de la wilaya de Djelfa

La ville de Djelfa est actuellement alimentée en eau à partir de plusieurs réservoirs et châteaux d'eau dont la capacité totale s'élève à 32050 m³, ce qui représente environ 28,21 % des capacités de stockage de la wilaya. La majorité des ouvrages étudiés se situent dans un périmètre aux alentours de la ville, et leur capacité varie de 50 à 3250 m³. Ces ouvrages sont soit uniques, soit regroupés en deux, trois ou quatre ouvrages dans une même enceinte de stockage. Ils sont récapitulés dans les tableaux suivants :

Tableau I.4 : Réservoirs de la ville de Djelfa

Localisation	Nombre de réservoir	Capacité (m³)	Date de mis en service
Chiboute	4	13000	1980
Makam	4	4250	1950
Berbih	2	5000	1974
05Juillet	1	3000	1980
Zone Industriel	2	1350	1974
Fosha	1	500	
100Maisons	1	500	1950
Boutrifis	1	500	1994
Cité Jardin	1	1000	2007
Centre ville	1	450	
Station Oued Seder	2	1000	2007
Station Nord	1	500	
Station Ain Srar	1	500	
Station 05Juillet	1	500	
Total	23	32050	

Source: ADE, 2010

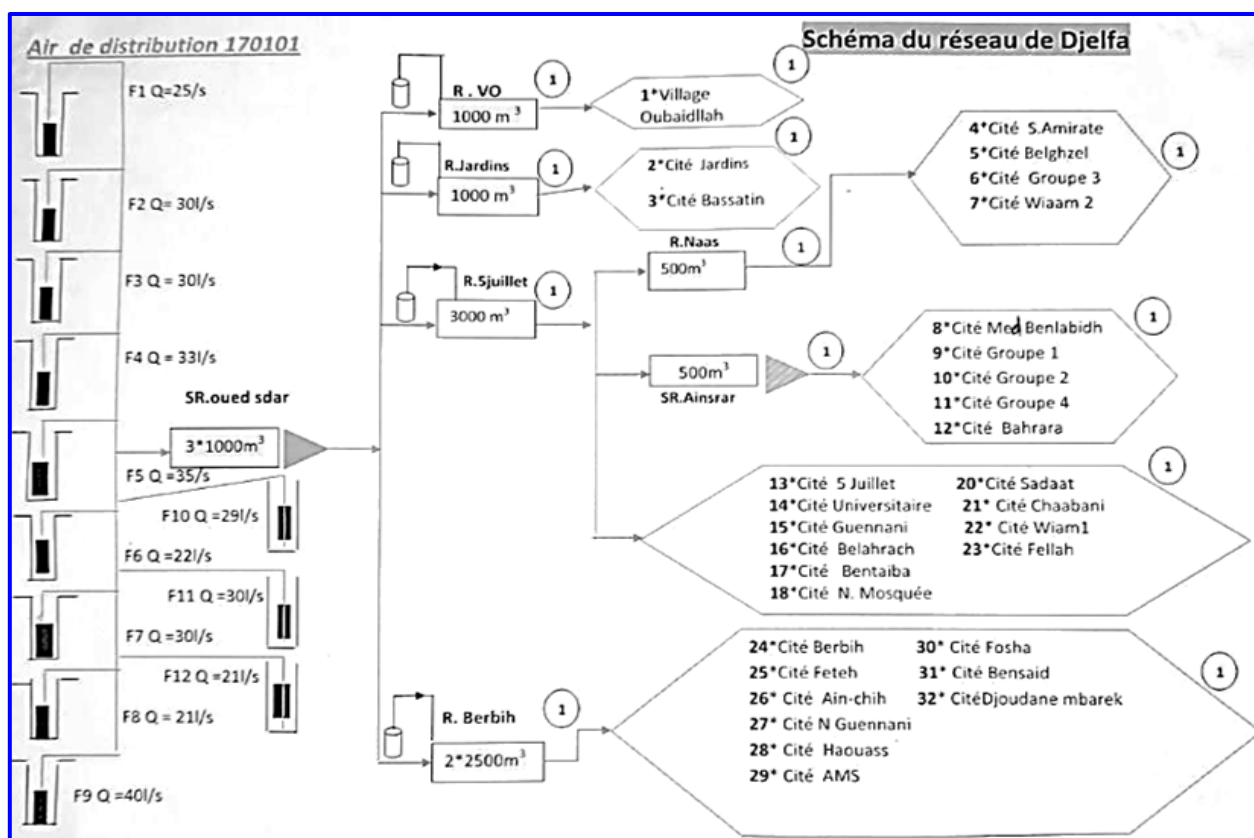


Figure I.9 : Schéma synoptique d'AEP de la ville de Djelfa (Zone 1 : Oued Sedeur-Djelfa ville)
(Source, ADE)

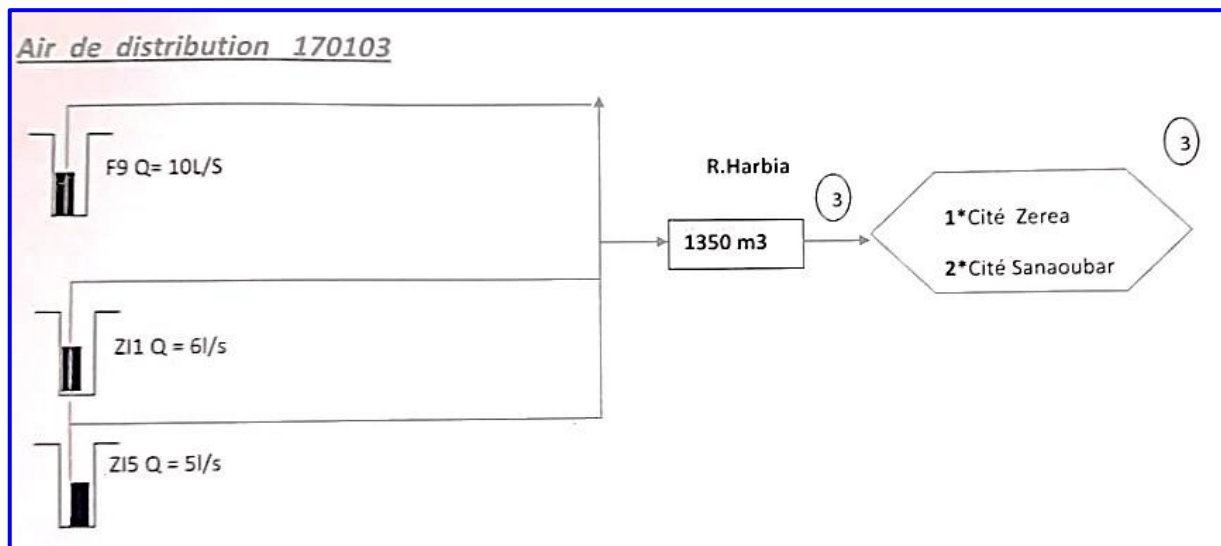


Figure I.10 : Schéma synoptique d'AEP de la ville de Djelfa (Zone 3 : Oued Sedeur-Djelfa ville)
(Source, ADE)

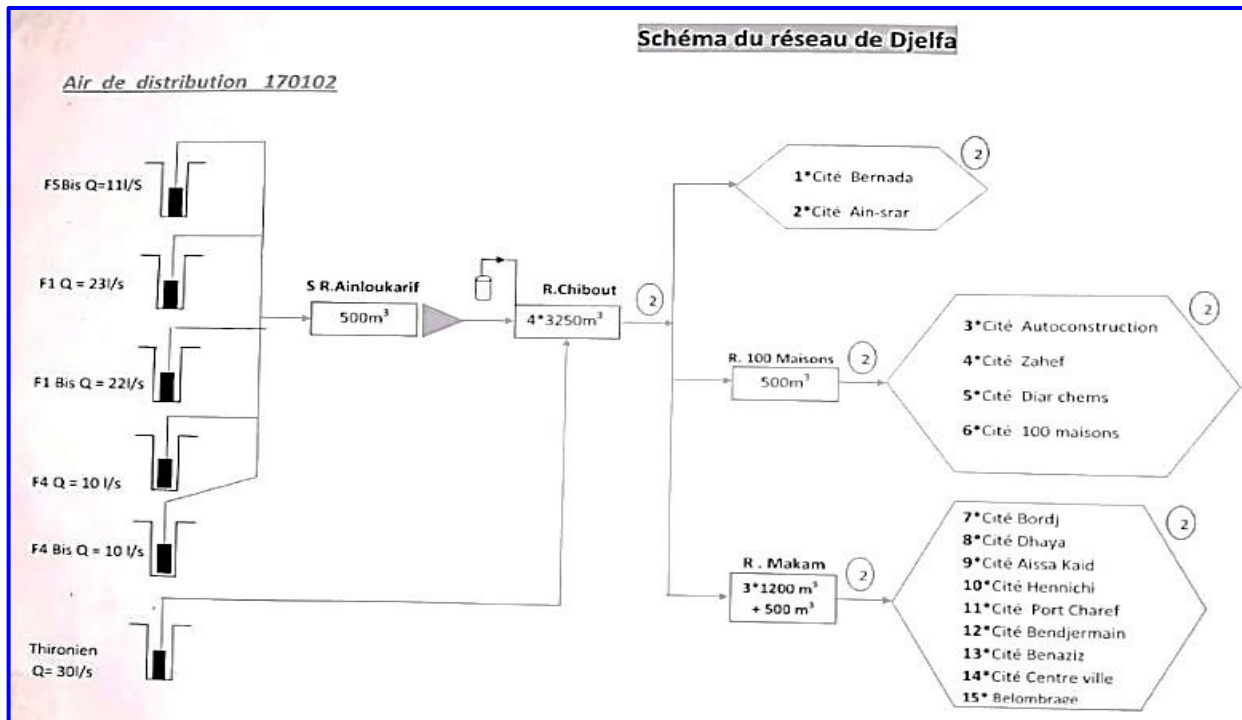


Figure I.11 : Schéma synoptique d'AEP de la ville de Djelfa (Zone 2 : Oued Sedeur-Djelfa ville) (Source, ADE)

I.9. Conclusion

La présentation de la zone d'étude nous a permis de ressortir les conclusions suivantes :

- Les ressources hydriques de la région de Djelfa, en particulier les eaux souterraines, font l'objet de connaissances limitées. Les aquifères principaux de la région sont constitués par la plaine d'Ain Oussera, le synclinal Nord de Djelfa, synclinal sud d'Ain El bel et plateau de Messad et les nappes du Zahrez.
- Dans la wilaya de Djelfa, les ressources en eaux superficielles sont limitées en raison de conditions climatiques défavorables, avec une faible pluviométrie et un déficit annuel de 100 à 300 mm. Une étude indique également une évaporation élevée, estimée entre 800 et 1 000 mm par an.
- La ville de Djelfa dispose de plusieurs réservoirs et châteaux d'eau, avec une capacité totale de 32050 m³, soit environ 28,21 % de la capacité de stockage de la wilaya.
- Dans le cadre de la gestion de l'eau potable à Djelfa, la direction des ressources en eau a renforcé l'approvisionnement depuis 2007 par des mesures comprenant des forages dans le champ captant d'Oued Seddeur. Dix forages Albien ont ainsi été réalisés entre 2007 et 2012, tandis que dix autres forages Barrémien ont été réalisés entre 2004 et 2015.

CHAPITER II :
MATÉRIEL ET MÉTHODES

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les outils et les approches utilisées pour atteindre les objectifs de cette étude.

L'analyse statistique multivariée (ACP et CAH) est largement utilisée pour interpréter les résultats analytiques liés aux paramètres influençant le chimisme des eaux (Güller et al., 2002 ; Cloutier et al., 2008 ; Davis, 1986). L'Analyse en Composantes Principales (ACP) permet d'explorer des jeux de données avec de nombreuses variables physico-chimiques, réduisant la variance à quelques plans factoriels pour faciliter l'analyse des données quantitatives. L'analyse de classification ascendante hiérarchique (CAH) utilise des techniques statistiques pour identifier des groupes ou des structures naturelles dans les données, en regroupant des observations ou des variables selon leurs ressemblances. Elle est souvent utilisée pour l'analyse des données hydrochimiques des eaux et vient compléter l'analyse en composantes principales (ACP).

Dans ce chapitre, nous exposons en détail les modèles de l'indice de qualité de l'eau (WQI). Les modèles d'indice de qualité de l'eau (WQI) sont des outils utiles pour l'agrégation et l'évaluation de ces différentes données, qui produisent un indice unique permettant de représenter la qualité de l'eau d'un plan d'eau. L'indice de qualité de l'eau (WQI) synthétise l'influence des divers paramètres de qualité de l'eau sur sa potabilité, offrant une évaluation globale de son état en comparaison avec les normes nationales ou internationales recommandées. Il est largement utilisé par les agences de gestion de l'eau, présentent l'avantage d'être à la fois simples et faciles à interpréter. Un grand nombre d'indices de qualité de l'eau, calculés selon diverses méthodes, incluent (Abbasi, & Abbasi, 2012) : indice de qualité de Horton (1965), indice de qualité de l'eau de la fondation nationale de l'assainissement (NSFWQI), développé en (1970 à 1973) par Brown et ses collaborateurs, indice de qualité de l'eau Dinius (Dinius, 1972), indice de la qualité de l'eau Colombie-Britannique (BCWQI, 1990), l'indice du Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCMEWQI, 1990), l'indice de qualité de l'eau de l'Oregon (OWQI, 1994) (Dunnette, 1979).

II.2. Analyses statistiques multivariées

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont été utilisées pour traiter les données des analyses physico-chimiques des eaux. Ces méthodes permettent d'identifier les principaux facteurs contrôlant la chimie des eaux.

II.2.1. L'analyse en composante principale (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique multivariée basée sur une matrice de corrélation utilisée pour analyser des données multidimensionnelles (Davis, J.C., 1986). Elle permet de visualiser graphiquement les relations entre plusieurs variables ainsi que la position des individus par rapport à ces variables. C'est une technique utilisée pour réduire la dimensionnalité d'un ensemble de données comportant de nombreuses variables interdépendantes. Le but de l'ACP est la construction de nouvelles variables appelées composantes principales à partir d'un ensemble de variables originales existantes. Les nouvelles variables sont une combinaison linéaire des variables existantes. En outre, l'ACP revient à remplacer les variables $X_1, X_2, \dots, X_p$ qui sont a priori corrélées en des nouvelles variables ($F_1, F_2, \dots, F_k$) non corrélées (Figure II.1).

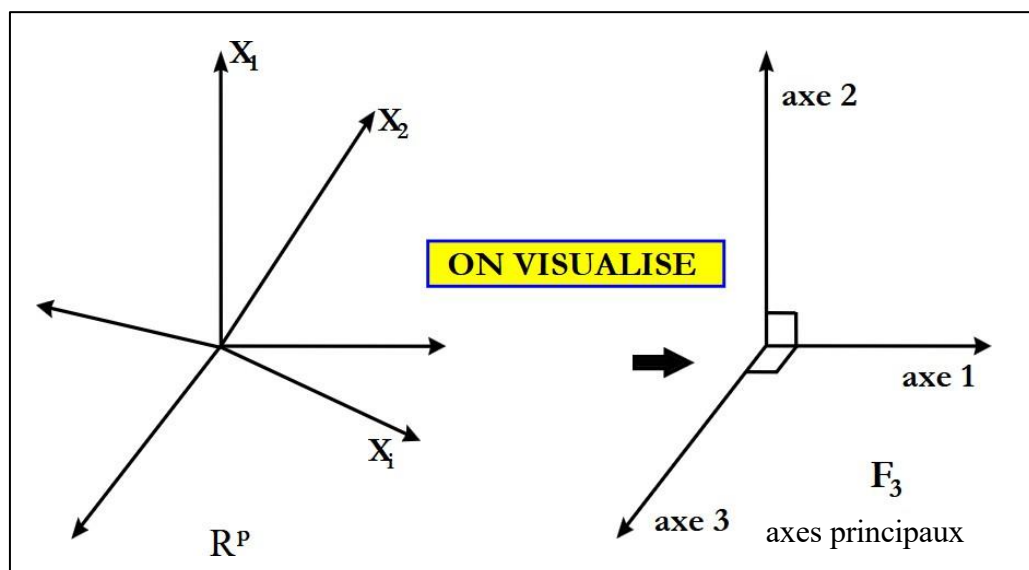


Figure II.1: Passage des variables X_p aux nouvelles variables F_k (Gonzalez, 2026)

On construit des composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires de variables centrées et réduites, dont on peut apprécier la qualité de restitution de l'information (inerties ou dispersion maximales).

[illegible]

Où Z_p est la variable p après centrage et réduction.

Le nombre de composants principaux à retenir dans l'analyse est basé sur le critère de [Kaiser \(1960\)](#). Selon ce critère, seuls les facteurs dont la valeur propre est supérieure ou égale à 1 sont retenus comme sources potentielles de variance dans les données.

II.2.1.1. Représentation des variables

Les variables sont représentées dans un cercle des corrélations (Figure II.2). Le cercle des corrélations est la projection du nuage des variables sur le plan des composantes principales.

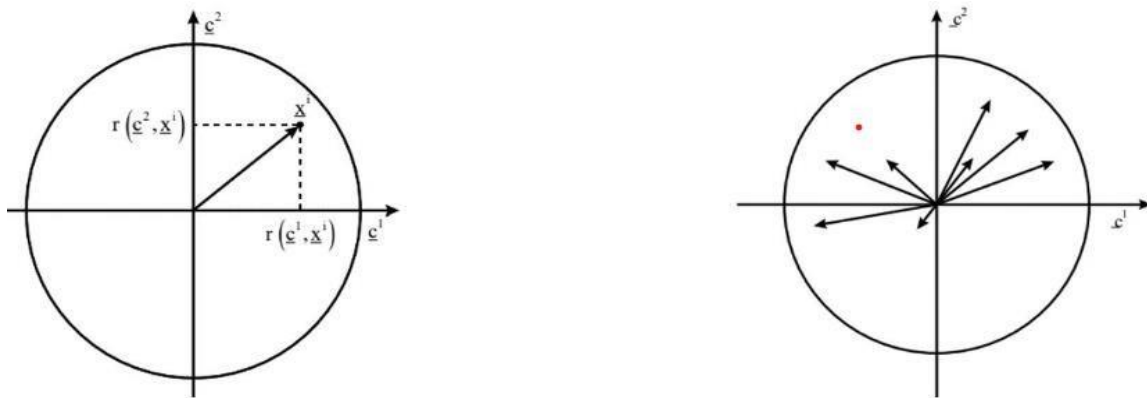


Figure II.2: Cercle des corrélations (Gonzalez, 2026)

avec $r(C_j, X_i)$ est le coefficient de corrélation linéaire entre C_j et X_i .

II.2.1.2. Représentation des individus

La $j^{\text{ème}}$ composante principale C_j fournit les coordonnées des n individus sur le $j^{\text{ème}}$ axe principal. On désire une représentation plane des individus, la meilleure sera celle réalisée grâce aux deux premières composantes principales.

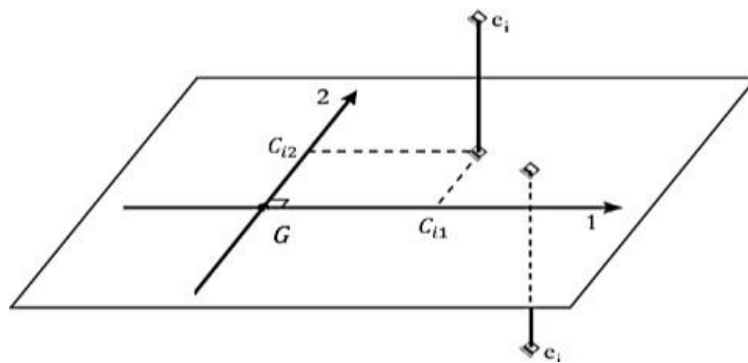


Figure II.3: Représentation plane des individus dans le premier plan principal (Gonzalez, 2026)

Dans ce plan (Figure II.3), nous allons nous intéresser à la qualité de représentation et la contribution de chaque individu. L'application de l'ACP nécessite la normalisation des données, en utilisant la formule suivante :

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (\text{Eq. II.2})$$

où Z = valeur standardisée de l'échantillon i , X_i = valeur de l'échantillon i , $\bar{X}$ = moyenne et S = écart type (Davis, 1986). La normalisation est appliquée pour s'assurer que chaque variable a un poids égal dans les l'ACP.

II.2.2. La classification ascendante hiérarchique (CAH)

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une méthode de regroupement fréquemment utilisée en sciences de la Terre pour classer des données hydrogéochimiques, permettant d'identifier des sites d'échantillonnage avec des compositions chimiques similaires (Cloutier et al., 2008). L'objectif de cette méthode est de définir un critère d'agrégation des classes, basé sur la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance entre les échantillons (El Yaouti et al. 2008). Plusieurs mesures existent pour estimer cette ressemblance, la plus couramment utilisée étant la distance euclidienne, en association avec la méthode d'agrégation de Ward (Ward, 1963; Khadri, 2024). Cette dernière correspond à la plus courte distance géométrique entre deux points dans un espace (Cloutier et al., 2008).

Les niveaux de similitude permettent d'obtenir un dendrogramme (Figure II.4) (Davis, 1986). Cette approche statistique utilise nécessite la normalisation des données par rapport à leurs moyennes en utilisant l'équation (Eq. II. 3) .

$$K_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{S_{ic}} \quad (\text{Eq. II. 3})$$

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 (Eq. II. 4) pour mesurer la similarité entre deux individus (j, k).

$$d_{ij} = \left[\sum_{i=1}^n [(K_{ij} - K_{ik})^2]^{1/2} \right] \quad (\text{Eq. II. 4})$$

Où K_{ik} représente la $K^{\text{ème}}$ variable mesurée sur l'objet i , et K_j, K la $K^{\text{ème}}$ variable mesurée sur l'objet j (Davis, 1986).

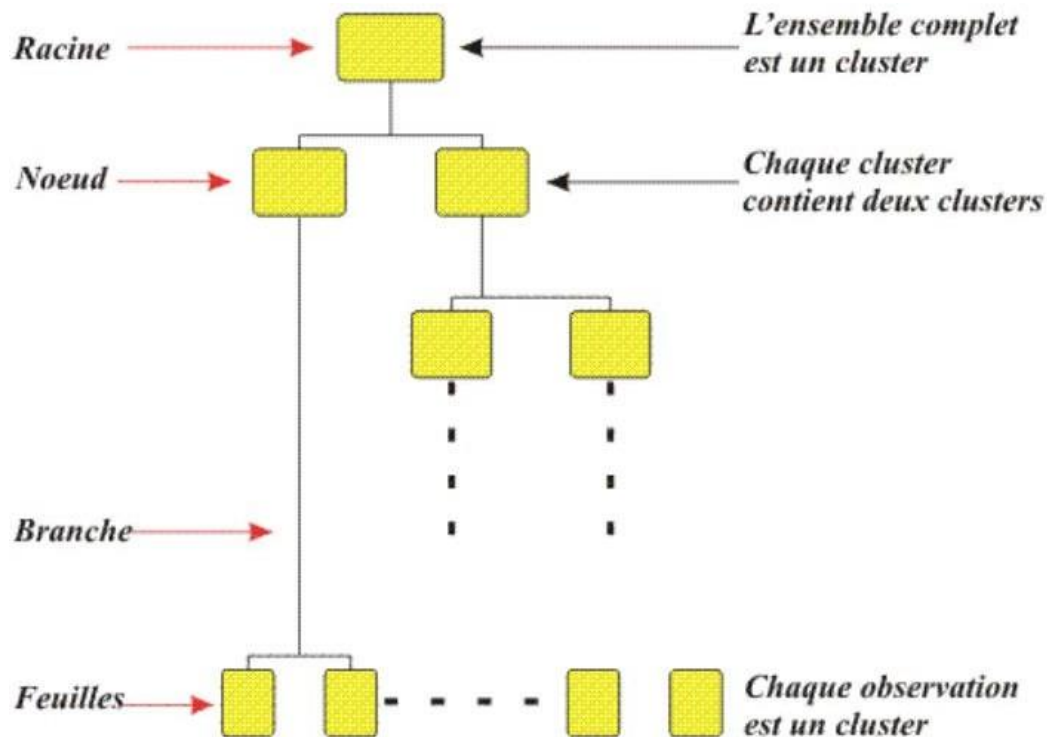


Figure II.4 : Représentation d'un dendrogramme (Chevalier F. & Le Bellac J. 2012).

Le traitement des données a été réalisé à l'aide des logiciels **STATISTICA 10**, pour le traitement statistique des variables.

II.3. Présentation des modèles de l'indice de qualité de l'eau (WQI)

II.3.1. Indice de qualité de l'eau pondéré (WQI)

L'indice de la qualité de l'eau (WQI) est une méthode simple permettant d'analyser la qualité de l'eau via un ensemble de paramètres, condensant ainsi de vastes informations en un seul nombre, généralement sans dimension, de manière simple et reproductible (Abbasi et al., 2012). L'indice de qualité de l'eau (WQI) est recommandé par de nombreux chercheurs pour évaluer la qualité des eaux (Bouderbala 2017; Leizou, K et al., 2017). Les paramètres physico-chimiques sont utilisés pour estimer cet indice selon quatre étapes.

Étape I

La première étape consiste à choisir les paramètres chimiques et à leur attribuer un poids (w_i) de 1 à 5 selon leur impact sur la santé et leur importance dans l'évaluation globale de la qualité de l'eau. Pour le calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (WQI), 11 paramètres ont été retenus : CE, TDS, pH, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^- . Le poids maximal de 5 a été attribué aux paramètres ayant le plus fort impact sur la qualité de l'eau, tels que TDS et NO_3^- . En revanche, un poids minimal de 1 a été donné aux paramètres ayant le moindre effet, comme

Mg²⁺. Pour les autres paramètres, tels que le pH, TH, CE et SO₄²⁻ un poids de 4 a été attribué en raison de leur importance relative dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Cela permet de déterminer la pondération relative « W_i » pour chaque paramètre via une formule spécifique.

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{Eq. II. 5})$$

où, W_i = Pondération (Poids) relative

w_i = Pondération (Poids) de chaque paramètre physico-chimique i ;

n = nombre des paramètres physico-chimique

Étape II

La détermination de l'échelle d'estimation de la qualité, notée q_i, pour chaque paramètre consiste à diviser la concentration de ce paramètre dans un échantillon d'eau par une valeur guide de référence, puis à multiplier le résultat par 100. L'équation pour calculer q_i est la suivante :

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. II. 6})$$

q_i: échelle de notation de la qualité

C_i : la concentration de chaque paramètre en mg/L.

S_i : norme de potabilité pour chaque paramètre chimique en mg/L selon les directives de l'OMS (2017), et aussi les normes Algériennes.

Étape III

Le sous-indice «SI_i» est calculé par la formule suivante :

$$SI_i = w_i \times q_i \quad (\text{Eq. II. 7})$$

SI_i : Sous-indice, désigne l'indice de qualité pour un paramètre i donné.

q_i = degré de qualité du paramètre i^{ème}

Étape IV

En dernier lieu, l'indice de qualité de l'eau (WQI) est calculé à partir des sous-indices de qualité de l'eau (Eq. II. 8).

$$WQI = \sum SI_i \quad (\text{Eq. II. 8})$$

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

Tableau II.1: Pondération des paramètres de qualité

Paramètres chimiques	Poids	Poids	Norme	Norme
	Wi	relatif (Wi)	Algérienne	OMS
pH	4	0,098	9	9,5
TH	4	0,098	500	300
CE	4	0,098	2800	1500
TDS	5	0,122	1500	1000
Ca ²⁺	2	0,049	200	200
Mg ²⁺	1	0,024	150	50
Na ⁺	2	0,049	200	200
Cl ⁻	3	0,073	500	250
SO ₄ ²⁻	4	0,098	400	250
NO ₃ ⁻	5	0,122	50	50
K ⁺	2	0,049	12	12
NH ₄ ⁺	5	0,122	0,5	0,5
Total	41	1		

Tableau II.2 : Classification des eaux basée sur les valeurs WQI (Ramakrishnaiah et al., 2009)

Valeur de l'indice de qualité (WQI)	Classes
< 50	Excellente qualité
50 – 100	Bonne qualité
100 – 200	Qualité médiocre
200 – 300	Qualité mauvaise
> 300	Eau impropre à la boisson

II.3.2. Indice de qualité de l'eau arithmétique pondéré (WAWQI) :

La méthode de l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée évalue la qualité de l'eau en fonction de son niveau de pureté, en se basant sur les paramètres de qualité de l'eau les plus couramment mesurés. Cette méthode est largement utilisée par de nombreux chercheurs (Brown et al., 1970 ; Brown et al., 1972; Chatterji and Raziuddin, 2002; Yidana et Yidana, 2010; Abbasi & Abbasi, 2012). La méthode de l'indice de qualité des eaux reflète l'influence composite des

différents paramètres de qualité de l'eau. L'indice WAWQI est calculé en utilisant les équations suivantes (Equations II. 9 à II. 12) :

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{s_i})} \quad (\text{Eq. II. 9})$$

$$K = \frac{1}{[\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \dots + \frac{1}{s_n}]} \quad (\text{Eq. II. 10})$$

K : constante de proportionnalité

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

n: nombre de paramètres

$$w_i = \frac{k}{s_i} \quad (\text{Eq. II. 11})$$

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 du dit paramètre et en multipliant l'ensemble par **100** comme dans la formule suivante :

$$q_i = 100. (\frac{V_a - V_i}{V_s - V_i}) \quad (\text{Eq. II. 12})$$

q_i : Échelle d'évaluation de la qualité de l'ième paramètre

L'échelle d'évaluation de la qualité (**q_i**) est obtenue à partir de la relation :

Avec :

V_a : Valeur réelle présente du (i) paramètre à un puits d'échantillonnage donné

V_i : Valeur idéale (0 pour tous les paramètres sauf le pH qui est de 7,0)

s : Valeur standard admissible

Tableau II.3 : Évaluation de la qualité de l'eau selon L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée (IQE) (Chatterji et Raziuddin, 2002).

Classe d'WQI	Type d'eau	Usage possible
0-25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
26-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
51-75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
76-100	Très Mauvaise qualité	Irrigation
>100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

II.3.3. L'indice de qualité de l'eau CCME-WQI :

L'indice de qualité de l'eau (WQI) du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME) est une méthode standardisée pour évaluer et communiquer la qualité de l'eau, et qui vise à protéger la vie aquatique. Conçu pour l'eau de surface, il nécessite d'être adapté aux spécificités de chaque pays et implique un échantillonnage d'au moins quatre paramètres mesurés quatre fois par station (CCME, 2001). Le calcul de l'IQE repose sur des relations spécifiques établies par le CCME (CCME, 2001 ; Abbasi & Abbasi, 2012).

F1 (étendue) correspond au pourcentage de paramètres mesurés pour lesquels au moins une mesure ne respecte pas la valeur recommandée durant la période étudiée (paramètres non conformes), par rapport au nombre total de paramètres mesurés (Eq. II. 13).

$$F_1 = \left(\frac{\text{Nombre de paramètres non conformes}}{\text{nombre total de paramètres}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. II. 13})$$

F2 (fréquence) désigne le pourcentage de résultats analytiques qui ne respectent pas les valeurs recommandées, c'est-à-dire les « résultats non conformes » (Eq. II. 14).

$$F_2 = \left(\frac{\text{Nombre de résultats non conformes}}{\text{nombre total de résultats}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. II. 14})$$

F3 : (l'amplitude) écart des mesures non conformes par rapport aux recommandations correspondantes (Eqations II. 14a et 14b). Le calcul de F3 s'effectue en trois étapes distinctes.

1) L'amplitude par laquelle une concentration individuelle excède la valeur recommandée (ou est inférieure si cette valeur représente un minimum) est appelée coefficient d'écart. Lorsque le résultat analytique ne doit pas dépasser la valeur recommandée :

$$\text{Coefficient d' écart}_i = \left(\frac{\text{Résultats analytique non conforme}_i}{\text{Valeur recommandée}_j} \right) - 1 \quad (\text{Eq. II. 14a})$$

Dans les cas où le résultat analytique ne doit pas être inférieur à la valeur recommandée :

$$\text{Coefficient d' écart}_i = \left(\frac{\text{Valeur recommandée}_j}{\text{Résultats analytique non conforme}_i} \right) - 1 \quad (\text{Eq. II. 14b})$$

2) Le degré global de non-conformité est calculé en additionnant les coefficients d'écart des résultats individuels, puis en divisant cette somme par le total des résultats, qu'ils soient conformes ou non. Ce paramètre est désigné comme la somme normalisée des coefficients d'écart (**sncé**) (Eq. II. 15) :

$$\text{sncé} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{coefficient d' écart}}{\text{n}^{\text{bre}} \text{résultats}} \quad (\text{Eq. II. 15})$$

3) La valeur de F3 est déterminée par une fonction asymptotique utilisant la somme normalisée des coefficients d'écart par rapport aux valeurs recommandées, notée **sncé**, dans une plage de 0 à 100 (Eq. II. 16).

$$F_3 = \left(\frac{\text{sncé}}{0,01\text{sncé}+0,01} \right) \quad (\text{Eq. II. 16})$$

Une fois les facteurs déterminés, l'indice est calculé en les additionnant vectoriellement selon le théorème de Pythagore (Figure II.5). La somme des carrés des facteurs correspond au carré de l'indice, considéré comme un point dans un espace tridimensionnel défini par les trois axes des facteurs. C'est ainsi que l'WQI du CCME est calculé :

$$\text{WQI du CCME} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right) \quad (\text{Eq. II. 17})$$

La division par **1,732** provient du fait que chacun des trois facteurs composant l'indice peut atteindre une valeur maximale de **100**. La longueur maximale du vecteur est donc :

$\sqrt{100^2 + 100^2 + 100^2} = \sqrt{30000} = 173,2$ au maximum. La division par 1,732 normalise la longueur du vecteur à un maximum de 100 (Abbasi, 2012 ; Amiri, 2023). Plus la valeur obtenue est élevée, meilleure est la qualité de l'eau.

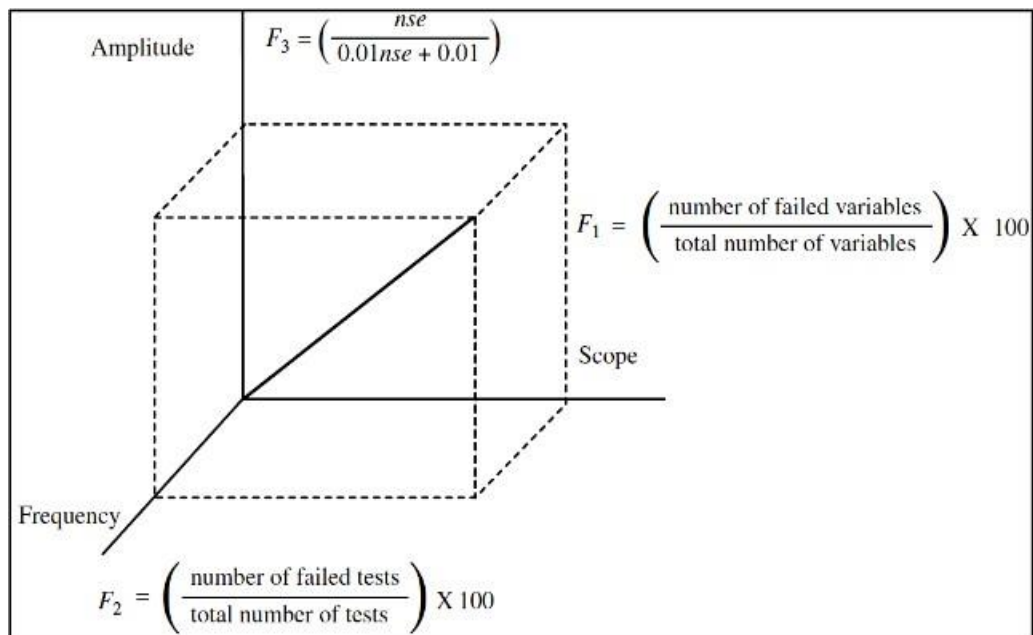


Figure II.5: Modèle conceptuel de l'WQI du CCE

Tableau II.4 : Catégorie de qualité de l'eau en fonction de l'WQI du CCME

WQI (CCME)	Qualité de l'eau	
95 à 100	Excellente	La qualité de l'eau est préservée, pratiquement aucune menace ni détérioration n'étant décelée ; les conditions sont très proches des niveaux naturels ou originels.
80 à 94	Bonne	La qualité de l'eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineure étant observée ; les conditions s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables.
65 à 79	Moyenne	La qualité de l'eau est ordinairement préservée, mais elle est occasionnellement menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent parfois des niveaux naturels ou souhaitables.
45 à 64	Médiocre	La qualité de l'eau est fréquemment menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent souvent des niveaux naturels ou souhaitables.
0 à 44	Mauvaise	La qualité de l'eau est presque toujours menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent généralement des niveaux naturels ou souhaitables.

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

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée entre 2021 et 2025 sur les deux réservoirs de la ville de Djelfa, 5 Juillet et Berbih, par les services de la Direction Algérienne des Eaux (ADE de Djelfa). Le prélèvement, le transport et la conservation des échantillons ont été réalisés conformément aux recommandations de [Rodier et al. \(2009\)](#). Les échantillons d'eau destinés aux analyses physico-

chimiques ont été collectés dans des flacons en polyéthylène de 1,5 litre. Tous les échantillons ont été acheminés au laboratoire dans une enceinte maintenue à une température de 4°C, dans les 24 heures suivant la fin du prélèvement. Les paramètres physiques, tels que la température, le pH et la conductivité électrique (CE), ont été mesurés in situ à l'aide d'un multi paramètre. Les principaux éléments dosés en laboratoire sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- , selon les méthodes d'analyse résumées dans le **Tableau II.5**. Les analyses physico-chimiques des eaux ont été réalisées conformément aux normes recommandées par l'AFNOR (1997) ou aux standards homologués par Rodier (2009).

Tableau II.5 : 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) :

$$\text{BI} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad \text{Eq. II. 18}$$

$$\text{Avec } \sum \text{anions} = [\text{rHCO}_3^-] + [\text{rSO}_4^{2-}] + [\text{rCl}^-] + [\text{rNO}_3^-] \quad \text{Eq. II. 19}$$

$$\Sigma cations = [rCa^{+}] + [rMg^{2+}] + [rNa^{+}] + [rK^{+}] \quad \text{Eq. II. 20}$$

: La concentration de l'élément chimique est exprimée en milliequivalent par litre (méq/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.5. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodes de calcul des indices de qualité de l'eau (WQI) et aux statistiques multivariées utilisées dans ce mémoire. L'approche statistique repose sur l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH), qui regroupent les différents échantillons selon leurs principales similitudes physico-chimiques. Cette méthode facilite leur interprétation et contribue à une meilleure compréhension des différents facteurs naturels et anthropiques influençant la minéralisation des eaux. Par ailleurs, l'indice de qualité de l'eau (WQI) est utilisé comme un outil efficace pour évaluer la qualité des eaux en prenant en compte l'influence de divers paramètres physico-chimiques.

***Chapitre III : Evaluation de la potabilité
des eaux à l'aide d'indices de qualité des eaux***

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

III.1. Introduction

L'eau est essentielle pour la vie humaine, notamment en raison des risques sanitaires liés à sa contamination par des pathogènes ou des produits chimiques toxiques. Pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines à la consommation, on se réfère à la norme algérienne et à celle de l'OMS. Dans le but de contribuer au Contrôle de la qualité des eaux destinées à la consommation dans cette ville, nous avons mené une étude visant à évaluer la qualité physico-chimique de ces eaux des réservoirs de la ville de Djelfa. Pour ce faire, nous avons analysé la base de données des analyses physico-chimiques des eaux de l'ADE de Djelfa : la température, le pH, la conductivité, la dureté totale, les nitrates, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les chlorures, sulfates, les bicarbonates et les nitrates. Nous avons ensuite comparé ces résultats aux normes nationales et internationales de potabilité de l'eau afin de déterminer la qualité des eaux des réservoirs de la ville.

Au cours des dernières décennies, l'indice de qualité de l'eau (WQI) a été largement reconnu comme un outil efficace permettant de fournir des informations cruciales sur la qualité de l'eau aux citoyens. Cet indice permet de mesurer la qualité de l'eau en comparant des paramètres à des normes algériennes et internationales. L'WQI est un indice qui permet d'évaluer l'impact des facteurs naturels et anthropiques sur la qualité physico-chimique des eaux. Il permet d'obtenir un résumé simplifié des données (excellent, bon, mauvais, etc.) ([Abdelghani et al., 2020](#)). Plusieurs modèles WQI ont été développés pour l'évaluation de la qualité de l'eau dans plusieurs pays. [Horton, 1965](#) a développé le premier modèle WQI dans les années 1960. En [1970, Brown](#) a développé une version plus rigoureuse du modèle WQI de Horton, le IQE de NSF, avec le soutien de la National Sanitation Foundation ([Brown et al., 1970 ; Abbasi & Abbasi, 2012](#)). Le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement a élaboré l'WQI de [CCME en 2001](#). Dans le cadre de cette étude, nous avons procédé à l'évaluation de la qualité de l'eau en utilisant l'indice de qualité de l'eau (WQI) selon deux approches méthodologiques distinctes. La première méthode est la méthode arithmétique, tandis que la deuxième méthode est la méthode du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement. Dans la présente étude, les données utilisées comprennent les données relatives aux analyses physicochimiques des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa. La collecte d'échantillons d'eau a été effectuée par l'ADE sur une période s'étendant du 24 mai 2021 au 20 avril 2025, au niveau des réservoirs de 05 Juillet et de Berbih.

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

III.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

III.2.1. Réservoir de 05 Juillet

III.2.1.1. Les paramètres physiques des eaux

Ces paramètres sont analysés in situ, permettant d'évaluer l'aspect physique de la qualité de l'eau, afin de mieux comprendre leur origine, les processus responsables de leur évolution physico-chimique ainsi que la classification de ces eaux (Baziz, 2025).

Tableau III.1 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir5 Juillet (2022-2025)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne
T°C	16.30	20.50	18.02
pH	6.96	7.95	7.66
TH	386.00	431.00	408.48
CE	954.00	1170.00	1043.50
TDS	477.00	585.00	521.75
Ca ²⁺	100.80	118.40	107.05
Mg ²⁺	21.87	43.74	34.38
Na ⁺	64.00	94.00	75.75
HCO ₃ ⁻	198.86	250.00	212.50
Cl ⁻	82.24	113.44	97.69
SO ₄ ²⁻	200.00	270.00	218.75
NO ₃ ⁻	3.97	13.74	7.47
K ⁺	5.00	6.40	5.85
Turb	0.19	1	0.38

La température (°C)

La température de l'eau est un paramètre important, influençant les interactions entre les éléments chimiques et favorise les activités biologiques et bactériennes. La variation de la température dépend principalement des conditions climatiques de la zone d'étude (Mahdid, 2024). Dans la région étudiée, les valeurs de la température varient de 16,30 à 20,50°C avec une moyenne de 18,02 °C (Tableau III.1 et Figure III.1). Ces valeurs ne dépassent pas la norme algérienne et la norme de l'OMS (<25°C) (JORA, 2011, OMS, 2011).

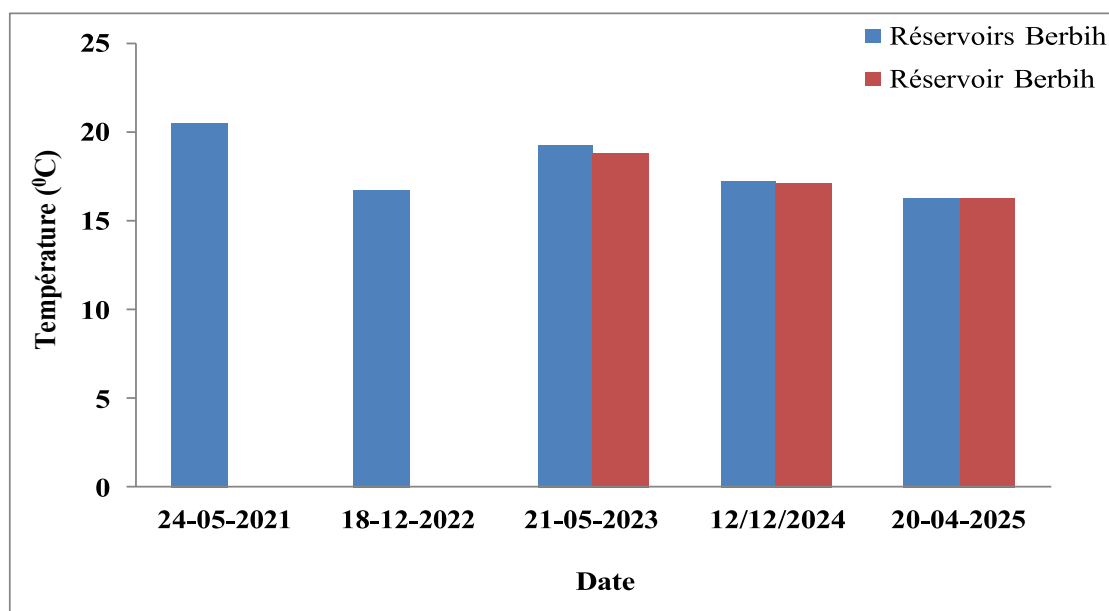


Figure III.1: Variation de la température des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Le potentiel d'hydrogène pH

Le potentiel hydrogène (pH) constitue un paramètre essentiel dans l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques de l'eau, en permettant de caractériser leur degré d'acidité ou d'alcalinité à travers la concentration en ions hydrogène (H^+) (Baziz, 2025). Les eaux de réservoir analysées dans la région d'étude sont pour la plupart neutres à légèrement alcalines avec des valeurs qui varient de 6,96 à 7,95 et une moyenne de 7,66 (Tableau III.1 et Figure III.2). Les valeurs du pH montrent que tous les échantillons 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 (JORA, 2011, OMS, 2011).

La conductivité électrique CE ($\mu S/cm$)

C'est un paramètre important pour la caractérisation physico-chimique de l'eau parce qu'elle est directement influencée par la composition des sels minéraux dissouts dans les eaux souterraines (Aldahaan et al., 2016 ; Belkendil, 2021). Les valeurs de la conductivité électrique (CE) durant les campagnes d'échantillonnages (2022-2025) sont comprises entre 954 et 1170 $\mu S/cm$ avec une moyenne de 1043,50 $\mu S/cm$ (Tableau III.1 et Figure III.3). Il est à signaler que les valeurs de CE ne dépassent pas les normes de l'OMS (<1500 $\mu S/cm$) et de l'Algérie (<2800 $\mu S/cm$).

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

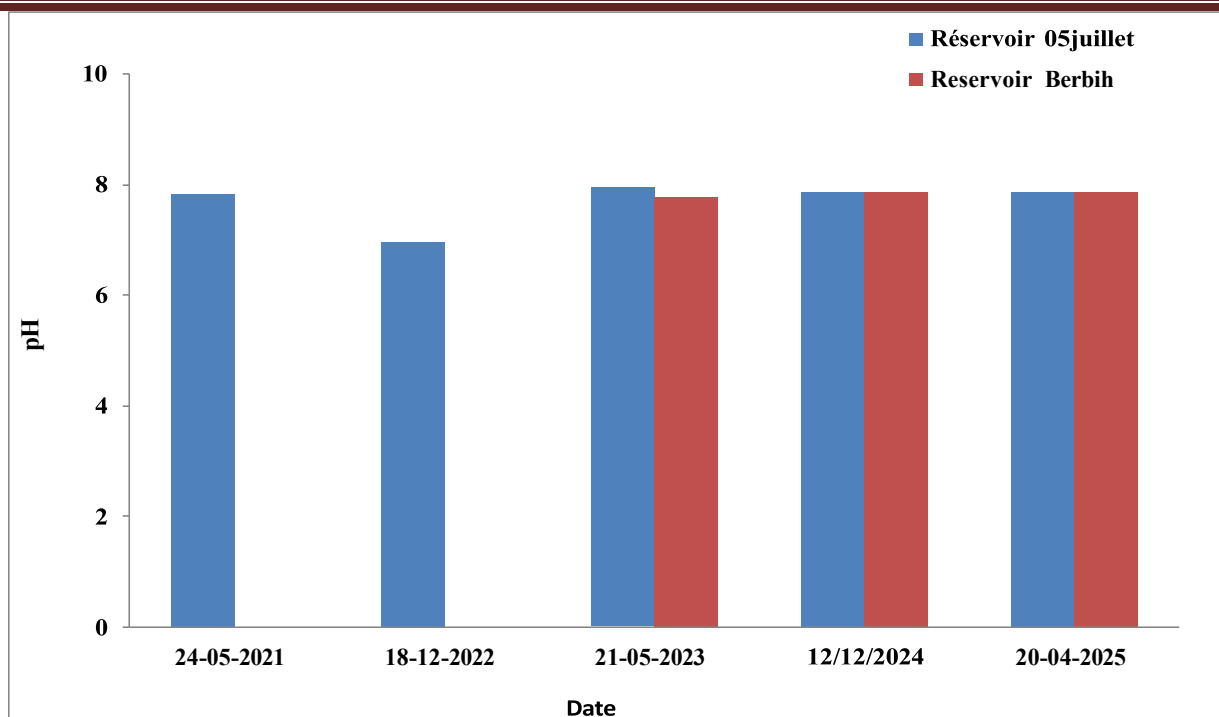


Figure III.2: Variation de pH des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

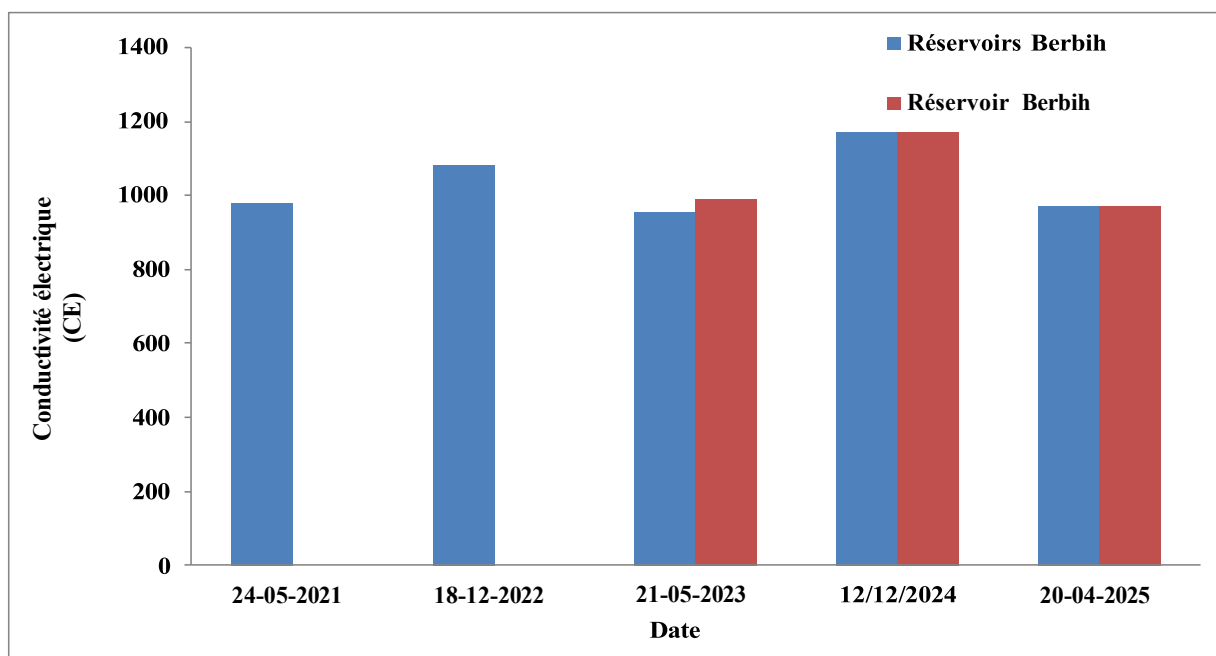


Figure III.3: Variation de CE des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Les solides dissous totaux (TDS)

Le total des solides dissous (TDS) correspond à l'ensemble des substances organiques et inorganiques dissoutes dans l'eau (Mahdid, 2024). Il est généralement exprimé en parties par million (ppm) ou en milligrammes par litre (mg/L), et représente un indicateur de la charge globale en matières dissoutes. Les valeurs enregistrées de TDS varient entre 477 et 585 mg/L, avec une moyenne de 521,75 mg/L (Tableau III.1 et Figure III.4). Il est à noter que les valeurs de TDS sont conformes aux normes de qualité de l'eau potable fixées par l'OMS (<1000 mg/L) et la réglementation Algérienne (<1500 mg/L).

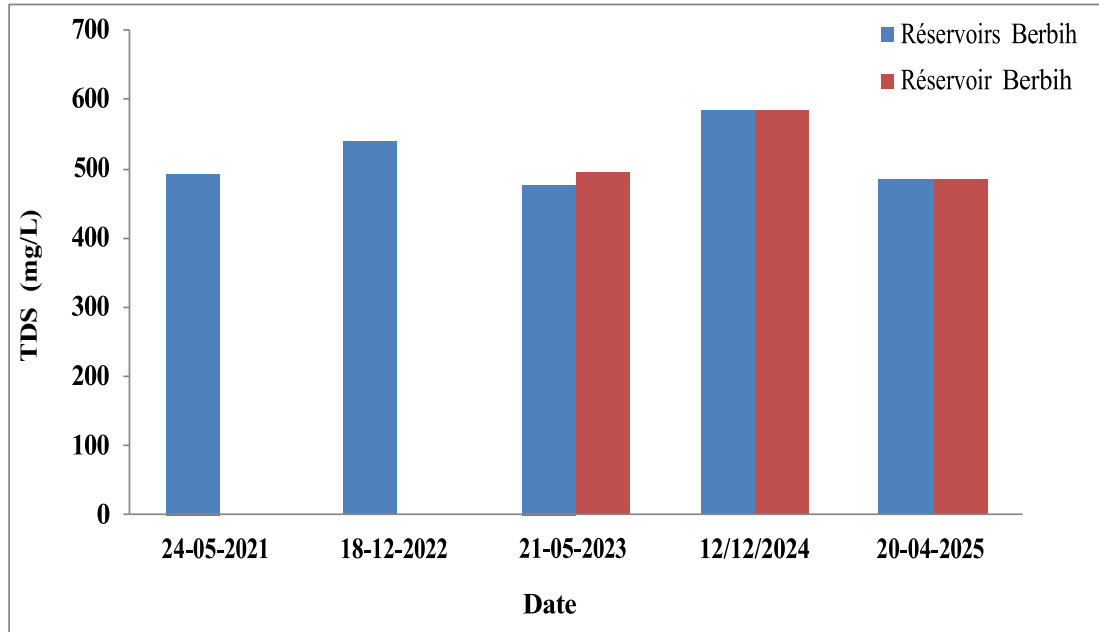


Figure III.4: Variation de TDS (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

La turbidité

La turbidité est l'un des paramètres les plus importants pour estimer et évaluer la qualité de l'eau. Elle est liée à la présence de particules en suspension et non dissoutes dans l'eau (Leroy, 1999). Les résultats obtenus de la turbidité (Tableau III.1 et Figure III.5) montrent que les valeurs varient entre 0,19 et 1 NTU, avec une moyenne de 0,38NTU, ce qui est inférieur à la limite fixée par la norme algérienne (5 NTU) ainsi que par la norme de l'OMS (5 NTU).

III.2.1.2. Paramètres chimiques des eaux

L'analyse des paramètres chimiques permet d'évaluer la qualité des eaux souterraines, de déterminer leur origine et de suivre leur évolution géochimique.

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Elle aide à détecter d'éventuelles contaminations (nitrates) et à identifier les processus eau-roche. Ces données sont essentielles pour une gestion durable des ressources en eau (Baziz, 2025).

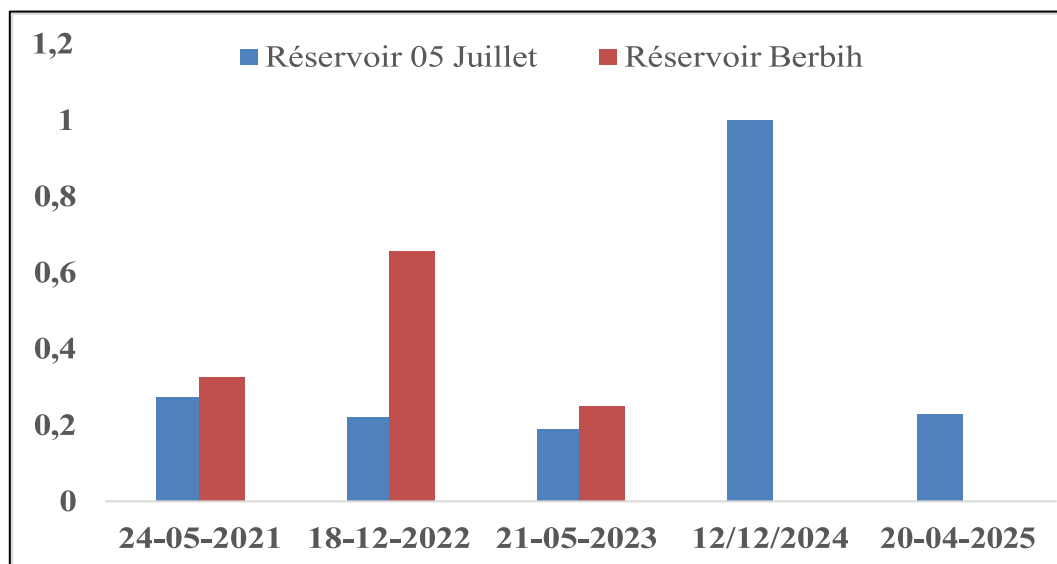


Figure III.5: Variation de la turbidité (NTU) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

III.2.1.2.1. La dureté totale

La dureté d'une eau a un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium (Rodier et al., 2009). La dureté totale est déterminée par l'équation suivante (Todd, 1980) :

$$TH = 2,497 \text{ Ca}^{2+} + 4,117 \text{ Mg}^{2+} \quad (\text{Eq. III.1})$$

où les concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimées en meq/l.

Les valeurs de la dureté (TH) sont comprises entre 386 mg/L et 431 mg/L de CaCO_3 , avec une moyenne de 408,48 mg/L de CaCO_3 (Tableau III.2 et Figure III.6). Il a signalé que les eaux analysées sont classées dans la catégorie des eaux très dure (Sawer et Mccarthy, 1967).

Tableau III.2 : Classification des eaux selon leur dureté totale (Sawer et Mccarthy, 1967)

TH (CaCO_3 en mg/l)	Type d'eau
< 75	Douce
75-150	Modérément dure
150-300	Dure
>300	Très dure

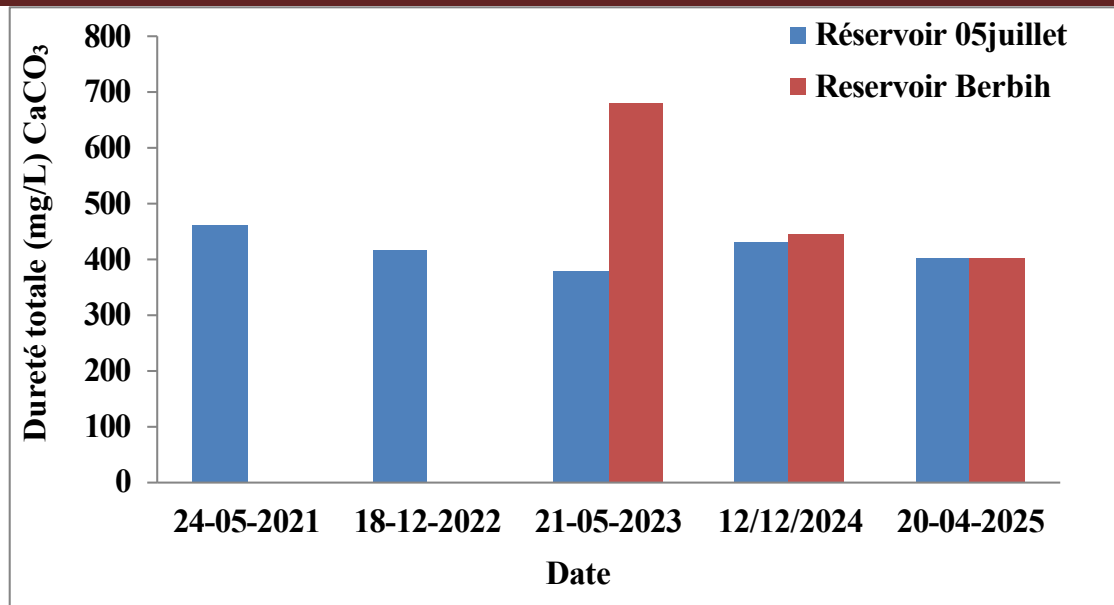


Figure III.6: Variation de la dureté (mg/L CaCO₃) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

III.2.1.2.2. Les cations

Sodium (Na⁺)

La présence de sodium (Na⁺) dans les eaux souterraines est liée à la dissolution des minéraux comme l'halite (NaCl) et silicate comme le feldspath (Belkendil, 2021) naturelle de la roche halite (NaCl), et une partie du sodium est également susceptible d'être le résultat de vestiges d'eau marine ancienne emprisonnés dans des aquifères profonds (Baaziz, 2025). Les concentrations du sodium oscillent entre 64 mg/l à 94 mg/l avec une moyenne de 75,75 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.7). Ces valeurs sont dans les normes de potabilité recommandées par les normes Algériennes et de l'OMS (< 200 mg/l).

Calcium (Ca²⁺)

L'origine de calcium (Ca²⁺) dans l'eau est liée à la dissolution de formations carbonatées telles que la calcite (CaCO₃) et la dolomite [(Ca,Mg) (CO₃)₂], ou la dissolution de formations évaporitiques telles que le gypse [CaSO₄·2H₂O] ou l'anhydrite (CaSO₄), selon les équations suivantes (Mahdid, 2024; Baaziz, 2025) :

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

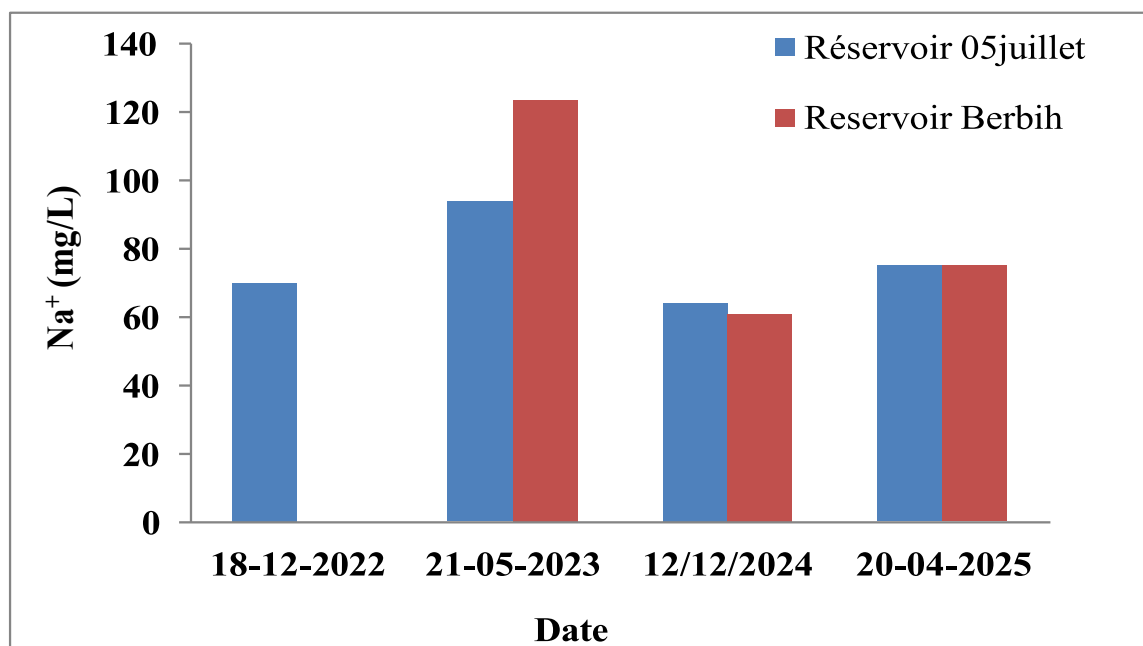
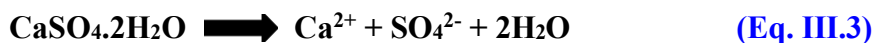


Figure III.7: Variation de Na^+ (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Les concentrations en Ca^{2+} dans les eaux varient de 100,80 mg/l à 118,40 mg/l avec une moyenne de 107,05 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.8). Les concentrations de calcium sont conformes aux normes de potabilité préconisées par l'OMS et les normes Algériennes (< 200 mg/l).

Magnésium (Mg^{2+})

Cet élément provient de la dissolution de formations carbonatées ou sulfatées riches en magnésium, notamment la dolomie et l'Epsomite selon la relation suivante :



Les teneurs en magnésium dans les eaux s'échelonnent de 21,87 mg/l à 43,74 mg/l avec une moyenne de 34,38 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.9). Ces valeurs sont dans les normes de potabilité recommandées par les normes Algériennes (< 150 mg/l) et de l'OMS (<50 mg/L).

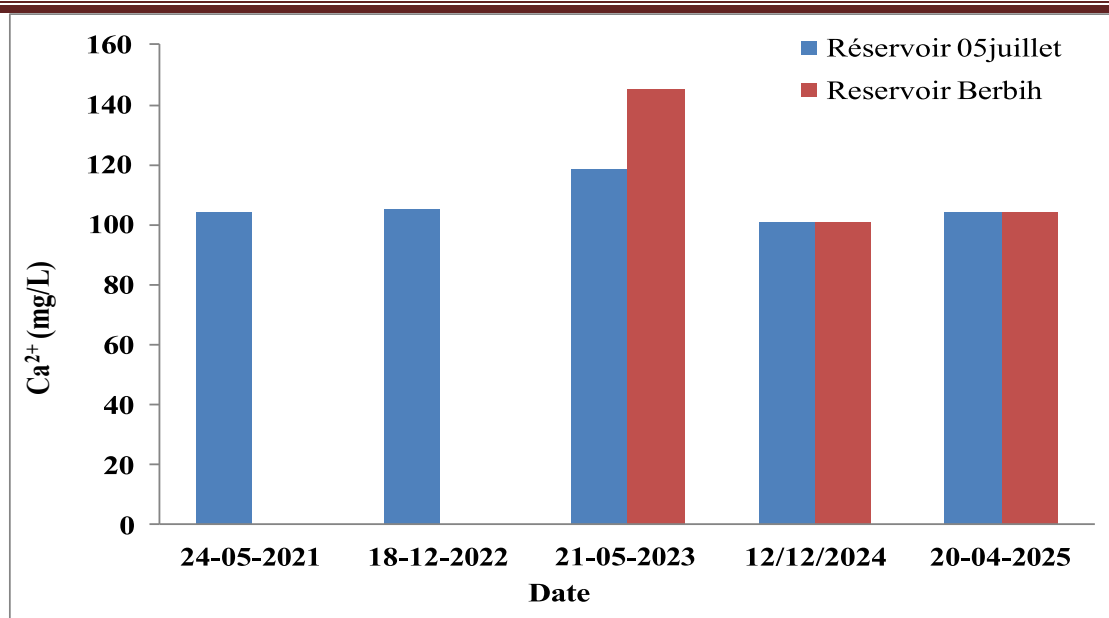


Figure III.8: Variation de Ca^{2+} (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

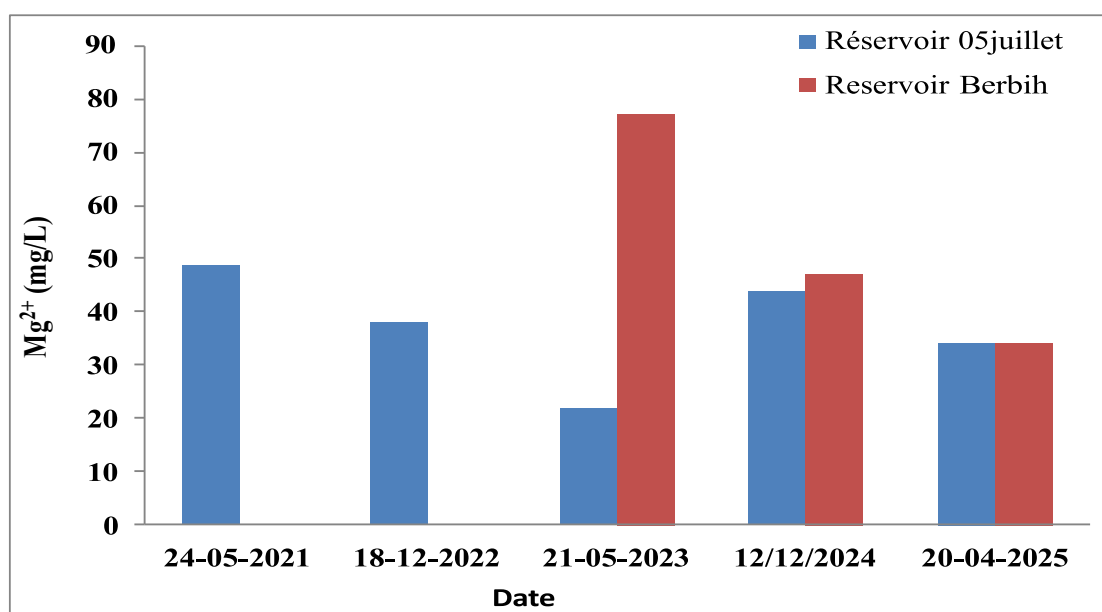


Figure III.9: Variation de Mg^{2+} (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Potassium (K^+)

Les fortes concentrations en potassium peuvent être observées dans les eaux des formations argileuses et dans les eaux ayant traversées des formations évaporitiques riches en sylvite (KCl), selon l'équation suivantes :



Les concentrations en K^+ sont comprises entre 5 et 6,40 mg/l, avec une moyenne de 5,85 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.10). Ces valeurs sont dans les normes de potabilité recommandées par les normes Algériennes et de l'OMS (< 12 mg/l).

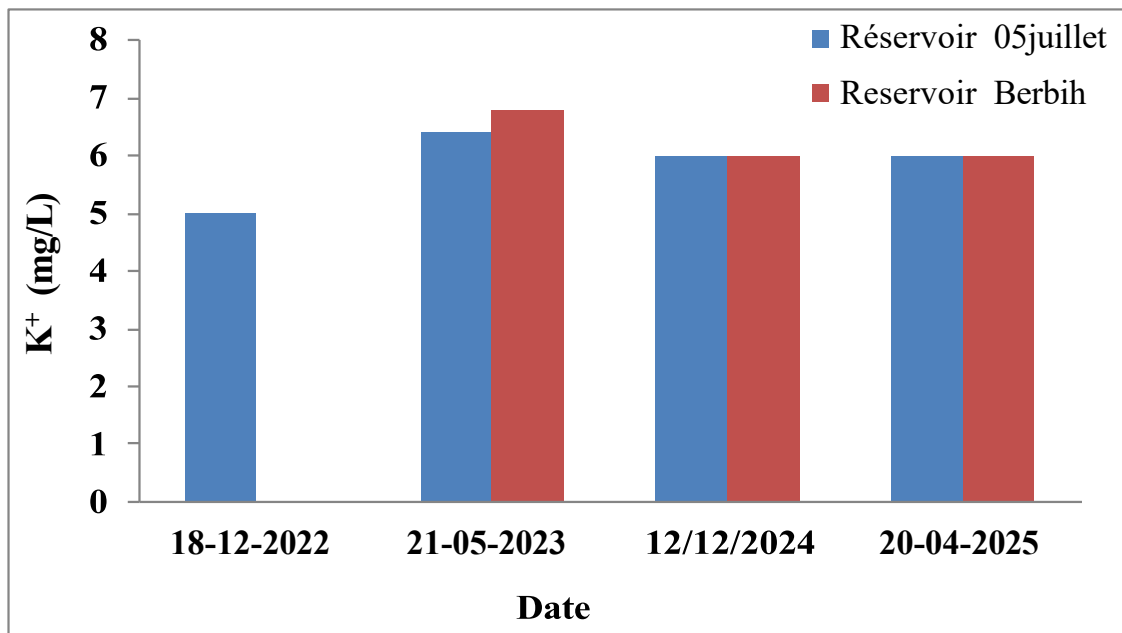


Figure III.10: Variation de K^+ (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

III.2.1.2.3. Les anions

Chlorures (Cl^-)

L'origine des Chlorures (Cl^-) est liée principalement à la dissolution de l'Halite ($NaCl$), qui se fait selon la relation suivante (Baziz, 2025) :



Les concentrations de chlorures (Cl^-) varient de 82,24 à 113,44 mg/l, avec une moyenne de 97,69 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.11). Ces valeurs sont dans les normes de potabilité recommandées par les normes de l'OMS (< 250 mg/l) ainsi que les normes de qualité de l'eau potable de l'Algérie.

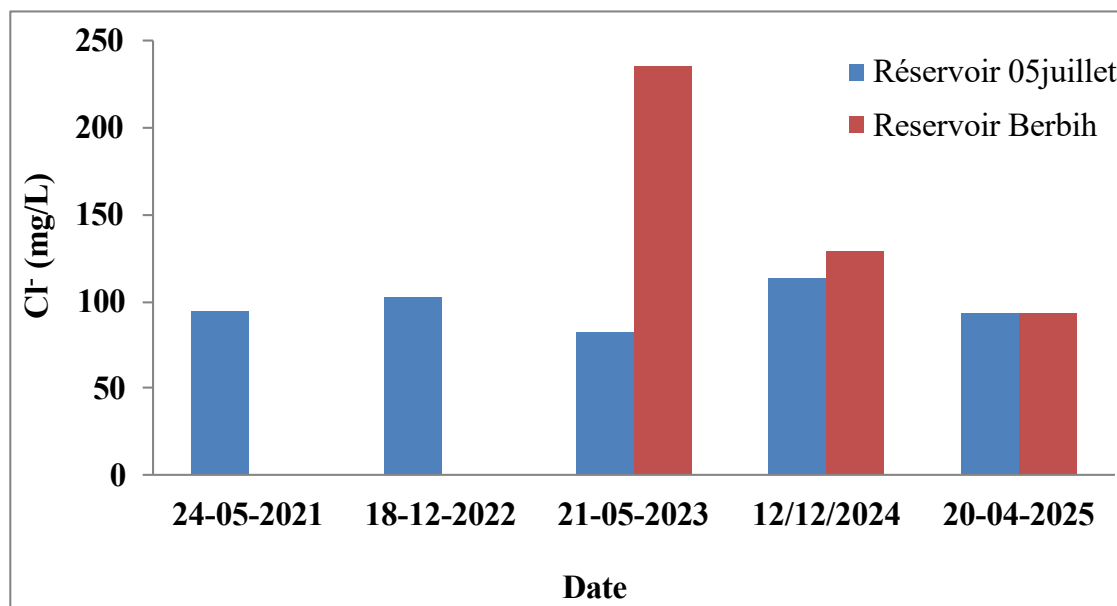


Figure III.11: Variation de Cl^- (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Sulfates (SO_4^{2-})

La présence des sulfates dans les eaux souterraines est liée à plusieurs origines : naturelle et/ou anthropique. Naturellement, ils existent dans de nombreux minéraux dont le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'anhydrite (CaSO_4), la barytine (BaSO_4), la célestite (SrSO_4) et l'epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ils peuvent provenir également de l'oxydation de la pyrite (FeS_2) (Rabiet, 2006; Saihi, 2024). Les origines anthropiques sont l'utilisation d'engrais chimiques en agriculture. Les concentrations en sulfates varient de 200 mg/l à 270 mg/l, avec une moyenne de 218,75 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.12). Les concentrations des sulfates ne dépassent pas les normes recommandées par l'OMS (< 250mg/l) et les normes Algériennes (< 400mg/l).

Bicarbonates (HCO_3^-) :

La présence des bicarbonates dans les eaux est principalement liée à la dissolution des formations carbonatées, telles que les calcaires et les dolomies, sous l'action des eaux enrichies en dioxyde de carbone (CO_2) (Baziz, 2025). Ce processus géochimique conduit à la libération des ions bicarbonates et calcium dans l'eau, selon la réaction suivante :



Les teneurs en bicarbonates varient de 198,86 mg/l à 250 mg/l, avec une moyenne de 212,50 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.13).

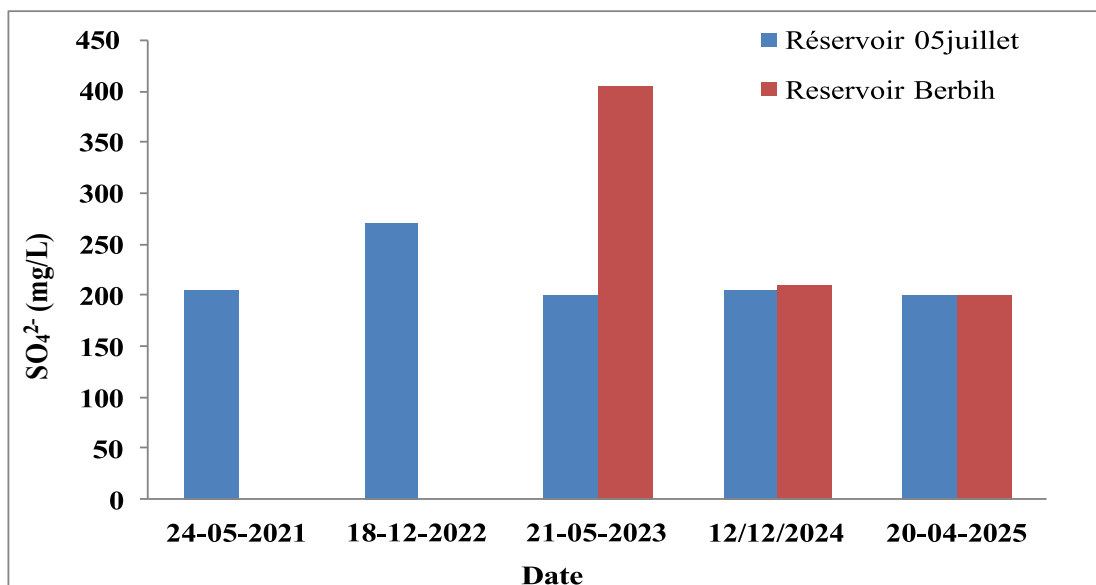


Figure III.12: Variation de SO_4^{2-} (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

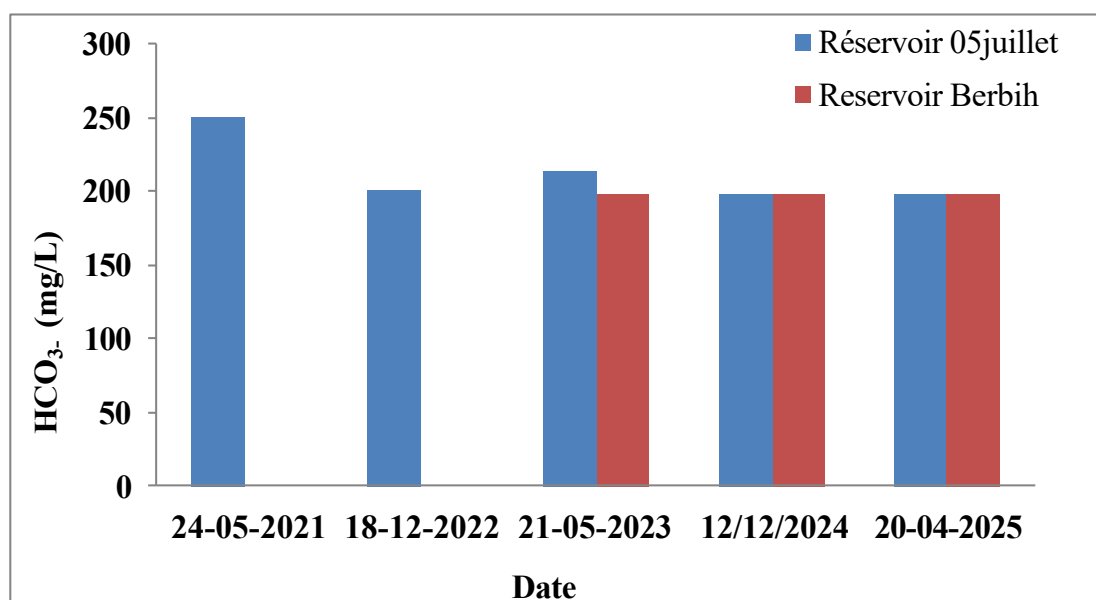


Figure III.13: Variation de HCO_3^- (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Nitrates (NO_3^-) : Les nitrates dans les eaux souterraines sont présents à l'état soluble, et sont très mobile et peuvent être lessivés de la zone non saturée aux eaux souterraines (Green et al. 2008). L'utilisation excessive des engrais azotés (engrais azotés synthétiques et fumier organique) au cours des dernières décennies a entraîné la contamination des eaux souterraines par les nitrates, qui menacent la qualité de l'eau, en particulier dans les zones agricoles.

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Les concentrations des nitrates sont comprises entre 3,97 mg/l à 13,74, avec une moyenne de 7,47 mg/l (Tableau III.1 et Figure III.14). Il est à signaler que les concentrations en nitrates ne dépassent pas les normes Algériennes et de l'OMS (< 50 mg/l)

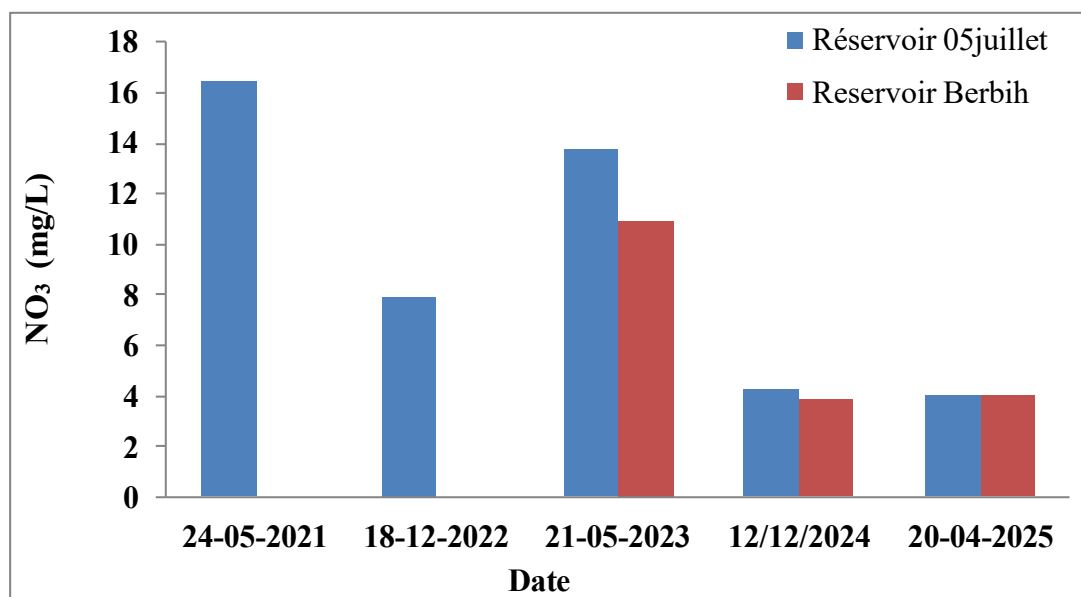


Figure III.14: Variation de NO₃⁻ (mg/L) des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa

Tableau III.3 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir Berbih (2022-2025)

R. BERBIH	Minimum	Maximum	Moyenne
T°C	16.30	18.80	17.40
pH	7.77	7.88	7.84
TH	399.48	678.82	507.53
CE	970.00	1170.00	1043.67
TDS	485.00	585.00	521.67
Ca ²⁺	100.68	145.00	116.56
Mg ²⁺	34.02	77.15	52.71
Na ⁺	61.00	124.00	86.67
HCO ₃ ⁻	198.86	212.28	205.37
Cl ⁻	92.27	235.00	151.88
SO ₄ ²⁻	200.00	405.00	271.67
NO ₃ ⁻	3.80	10.92	6.23
K ⁺	6.00	6.80	6.27
Turb	0.25	0.66	0.41

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

III.2.2. Réservoir de Berbih

III.2.2.1. Les paramètres physiques des eaux

La température (°C)

La température varie entre 16.30°C et 18.80°C avec une moyenne 17.40°C et tous les échantillons observés ne dépassent pas les normes de l'OMS et de l'Algérie (<25°C) (Tableau III.3 et Figure III.1).

Le potentiel d'hydrogène pH

Les échantillons d'eau sont légèrement alcalins, affichant des valeurs de pH variant entre 7.77 et 7.88, avec une moyenne de 7.84. Ces valeurs du pH sont dans les normes de qualité de l'eau potable de l'OMS (6,5 à 8,5) et de l'Algérie (6,5 à 9) (Tableau III.3 et Figure III.2).

La conductivité électrique CE (µS/cm)

Les valeurs de la conductivité électrique des échantillons d'eau sont comprises entre de 970 à 1170 µS/cm avec une moyenne de 1043, 67 µS/cm (Tableau III.3 et Figure III.3). Les valeurs de CE ne dépassent pas la norme Algérienne de qualité de l'eau potable (<2800 µS/cm), ainsi que la norme de l'OMS (<1500 µS/cm).

Les solides dissous totaux (TDS)

Les valeurs de TDS des eaux oscillent entre 485 mg/L et 585 mg/L avec une moyenne de 521,67 mg/L. Il est à signaler que les teneurs en TDS sont conformes aux normes de potabilité de l'OMS (<1000 mg/L) et de l'Algérie (<1500 mg/L) (Tableau III.3 et Figure III.4).

La turbidité

Les résultats obtenus pour la turbidité (Tableau III.3 et Figure III.5) montrent que les valeurs sont comprises entre 0,25 et 0,66 NTU, avec une valeur moyenne de 0,41 NTU, ce qui est conforme aux normes algérienne (5 NTU) et de l'OMS (5 NTU).

III.2.2.2. Paramètres chimiques des eaux

III.2.2.2.1. La dureté totale

Les valeurs de la dureté (TH) varient de 399,48 mg/L et 678,82mg/L CaCO₃, avec une moyenne de 507,53 mg/L de CaCO₃ (Tableau III.3 et Figure III.6). Il a été noté que les eaux analysées appartiennent à la classe des eaux très dure (Sawyer et McCarthy, 1967).

III.2.2.2.2. Les cations

Sodium (Na⁺)

Les teneurs en Na⁺ des eaux oscillent entre 61 mg/L et 124 mg/L avec une moyenne de 86,67 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.7). Les concentrations de sodium enregistrées dans les échantillons d'eau ne dépassent pas la norme algérienne et celle de l'OMS pour l'eau potable (<200 mg/L).

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Calcium (Ca^{2+})

Les teneurs en calcium dans les eaux varient entre 100,68 mg/L et 145 mg/L, avec une moyenne de 116,56 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.8). Les concentrations en Ca^{2+} ne dépassent pas la norme Algérienne et la norme de l'OMS (200 mg/l).

Magnésium (Mg^{2+})

Les concentrations en Mg^{2+} des eaux souterraines sont comprises entre 34,02 mg/L et 77,15 mg/L, avec une moyenne de 52,71 mg/L (Tableau III.1 et Figure III.9). les teneurs en Mg^{2+} ne dépassent pas la norme Algérienne (150 mg/l) et la norme de l'OMS (50 mg/L).

Potassium (K^+)

Les teneurs en potassium dans les eaux varient entre 6,00 mg/L et 6,80 mg/L, avec une moyenne de 6,27 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.10). Il est à noter que les valeurs des concentrations en K^+ sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS et celle de l'Algérie (<12 mg/L).

III.2.2.2.3. Les anions

Chlorures (Cl^-)

Les valeurs des concentrations des chlorures dans les eaux souterraines varient de 92.27 mg/L a 235 mg/L, avec une moyenne de 151,88 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.11). Ces valeurs sont dans les normes de potabilité recommandées par les normes de l'OMS (< 250 mg/L) ainsi que les normes de qualité de l'eau potable de l'Algérie (<500 mg/L) (Norme Algérienne).

Sulfates (SO_4^{2-})

Les teneurs en sulfates dans les eaux souterraines oscillent entre 200 mg/L a 405 mg/L, avec une moyenne de 271,67 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.12). Ces valeurs sont conformes aux normes de potabilité de l'Algérie (< 500mg/L). Cependant, les concentrations de sulfates dépassent la norme de l'OMS (< 250mg/l).

Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les concentrations en HCO_3^- dans les eaux souterraines varient entre 198.86 mg/L et 212.28 mg/L, avec une moyenne de 205.37 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.13).

Nitrates (NO_3^-) :

Les concentrations en NO_3^- dans les eaux souterraines varient entre 3,80 mg/L et 10,92 mg/L, avec une moyenne de 6,23 mg/L (Tableau III.3 et Figure III.14). Elles sont inférieures au niveau admissible recommandé par la norme Algérienne et l'OMS (50 mg/L) pour l'eau potable.

III.3. Distribution statistique des paramètres chimiques des eaux

III.3.1. Réservoir de 05 Juillet

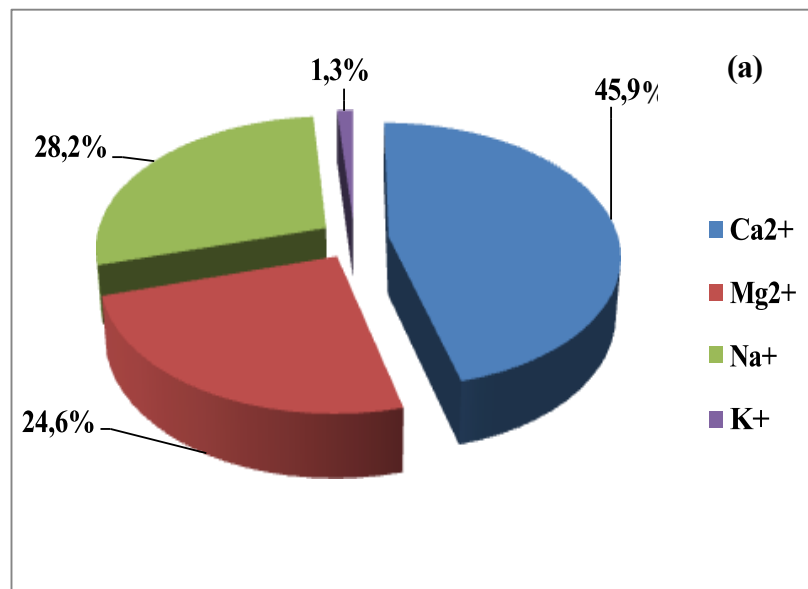
Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Le diagramme circulaire (Figure III.15) montre le pourcentage de chaque ion dans l'eau. L'ordre d'abondance des principaux cations est dans l'ordre suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ (Figure III.15a). On retient alors de cette figure que le calcium est le cation le plus abondant dans l'eau des échantillons analysés avec un pourcentage de 45,9%. Par contre le potassium est le cation le moins abondant dans les échantillons avec un pourcentage extrêmement faible de 1,3%.

L'ordre d'abondance des principaux anions est $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ (Figure III.15b). Les anions SO_4^{2-} et HCO_3^- sont majoritaires dans l'ensemble des échantillons d'eau analysés. Les ions NO_3^- occupent des faibles proportions dans les échantillons d'eau analysés. Ces résultats ont permis de mettre en évidence le rôle prépondérant des ions (Ca^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^-) dans la minéralisation des eaux.

III.3.2. Réservoir de Berbih

La contribution relative des ions à la minéralisation des eaux est illustrée sur la Figure III.16. L'abondance des cations est dans l'ordre suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ (Figure III.16a), tandis que l'ordre des anions est $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ (Figure III.16b). Cette figure montre que les éléments majeurs Ca^{2+} et Mg^{2+} sont les cations plus abondants, avec des pourcentages de 41,2% et 31% respectivement.



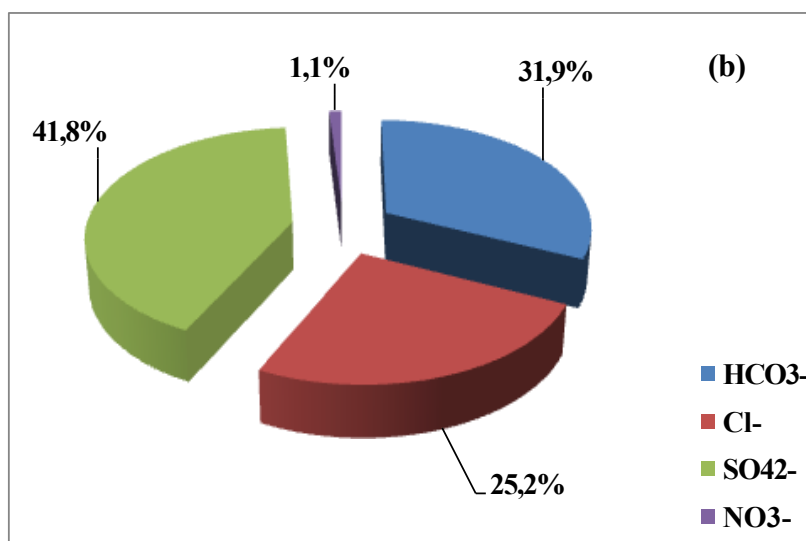
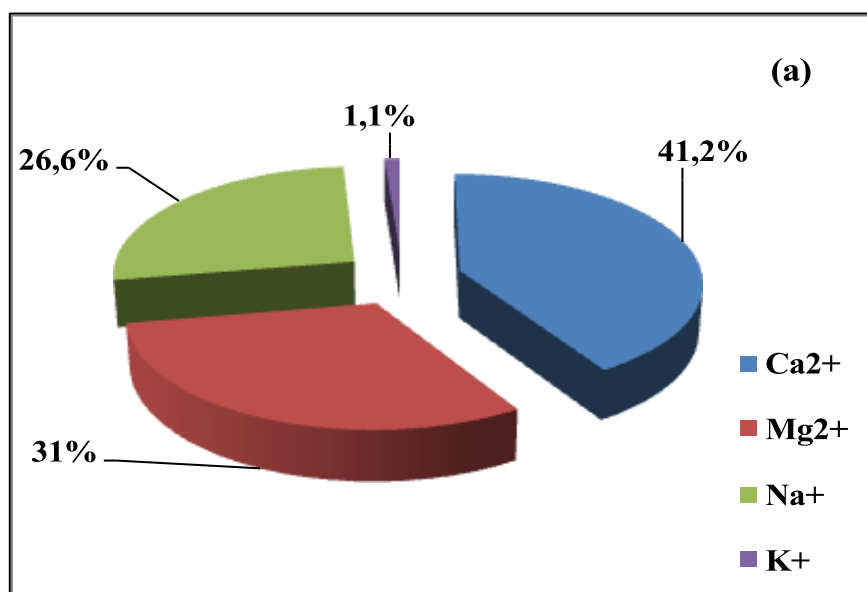


Figure III.15 : Distribution statistique des cations (a) et anions (b) des eaux (Réservoir de 05 Juillet)

En outre, les ions SO_4^{2-} et Cl^- sont les anions les plus abondants, avec des pourcentages de 42,2% et 31,9% respectivement. Ces résultats ont permis de mettre en évidence le rôle prépondérant des ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^-) dans la minéralisation des eaux.



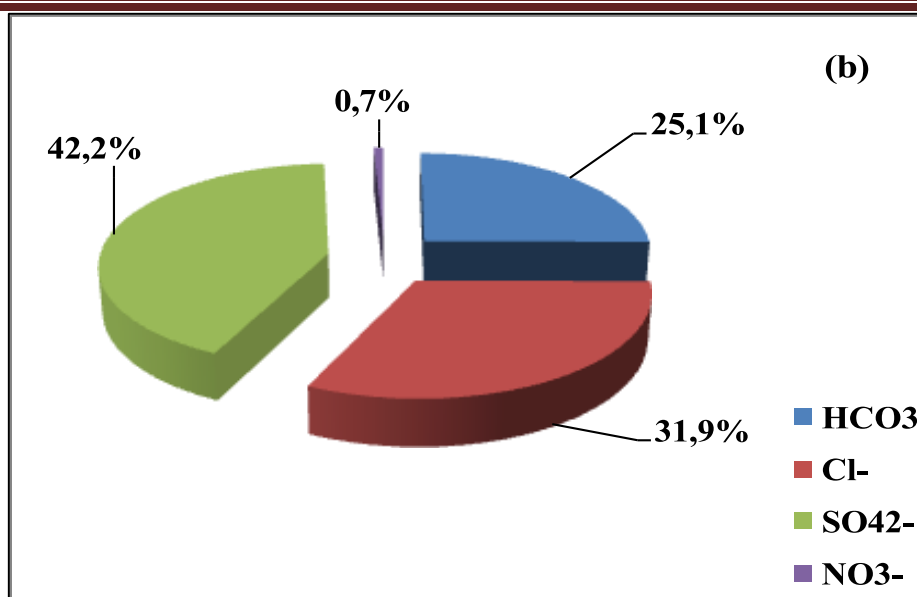


Figure III.16 : Distribution statistique des cations (a) et anions (b) des eaux (Réservoir de Berbih)

III.4. Évaluation de la qualité de l'eau

Dans cette étude, la qualité des eaux des réservoirs de la ville de Djelfa a été évaluée par la méthode de l'indice de qualité de l'eau. En effet, 11 paramètres importants dans l'étude de la qualité des eaux (pH, CE, TH, TDS, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) ont été sélectionnés pour calculer l'indice de qualité de l'eau (WQI).

III.4.1. Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré)

III.4.1.1. Réservoir de 5 JUILLET

III.4.1.2. Normes Algériennes

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'WQI variaient de 33,06 à 36,94 avec une moyenne de 35,06 pour l'année 2025 (Tableau III.4). On constate que la totalité des échantillons d'eau prélevés appartiennent à la catégorie excellent qualité (WQI ≤ 50) (Tableau III.5).

III.4.1.3. Normes OMS

Les valeurs de l'WQI oscillaient entre 48,53 et 53,09, avec une moyenne de 50,75 (Tableau III.4). Les résultats obtenus montrent l'existence de deux catégories d'eau (excellente et bonne). Les échantillons d'eau prélevés le : 18-12-2022, 21-05-2023, 12/12/2024 (75%) sont de bonne qualité. En outre, l'échantillon prélevé le 20-04-2025 (25%) est d'excellente qualité (Tableau III.6).

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Tableau III.4 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) /Réservoir : R. 5 juillet)

WQI pondéré	Minimum	Maximum	Moyenne
NA	33.06	36.94	35.06
OMS	48.53	53.09	50.75

Tableau III.5 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) / Normes Algériennes (Réservoir: R. 5 juillet).

Date de prélèvement	WQI	Qualité de l'eau
20-04-2025	33.91	Excellente
12/12/2024	36.34	Excellente
21-05-2023	36.94	Excellente
18-12-2022	33.06	Excellente

Tableau III.6 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) / Normes OMS (Réservoir: R. 5 juillet).

Date de prélèvement	WQI	Qualité de l'eau
20-04-2025	48.53	Excellente
12/12/2024	53.09	Bonne
21-05-2023	50.69	Bonne
18-12-2022	50.68	Bonne

III.4.1.2. Réservoir de BERBIH

III.4.1.2.1. Normes Algériennes

L'indice de qualité des eaux fait apparaître que les valeurs de l'WQI varient de 33,92 à 51,04, avec une moyenne 40,61 (Tableau III.7). Il est à noter que les échantillons d'eau prélevés le 20-04-2025 et 12-12-2024 sont d'excellent qualité pour la consommation humaine. En outre, l'échantillon prélevé le 21-05-2023 est caractérisé par une eau de bonne qualité (Tableau III.8).

Tableau III.7 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) / Réservoir: R. BERBIH.

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

WQI pondéré	Minimum	Maximum	Moyenne
NA	33.92	51.04	40.61
OMS	48.55	76.00	59.58

Tableau III.8 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) / Normes Algérienne (Réservoir: R. BERBIH).

Date de prélèvement	WQI	Qualité de l'eau
20-04-2025	33.92	Excellente
12-12-2024	36.87	Excellente
21-05-2023	51.04	Bonne

III.4.1.2.2. Normes OMS

Les résultats montrent que l'WQI varie de 48,55 à 76 avec une moyenne de 59, 58 (Tableau III.7). Les valeurs de l'WQI se répartissent en trois catégories (Excellente, bonne et admissible) (Tableau III.9).

Tableau III.9 : Indice de qualité de l'eau (WQI pondéré) / Normes OMS (Réservoir: R. BERBIH)

Date de prélèvement	WQI	Qualité de l'eau
20-04-2025	48.55	Excellente
12-12-2024	54.18	Bonne
21-05-2023	76.00	Admissible

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

III.4.2.1. Réservoir de 5 JUILLET

III.4.2.1.1. Normes Algériennes

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) varient entre 2.05 (2022) et 5,02 (2023), avec une moyenne de 4,03 (Tableau III.10). Les résultats montrent que tous les échantillons d'eau analysés appartiennent à la catégorie « excellente qualité » ($WQI \leq 25$) (Tableau III.11).

III. 4.2.1.2. Normes OMS

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI) s'échelonnent de 2,99 (2022) à 5,53 (2023), avec une valeur moyenne de 4,80 (Tableau III.10). Selon la classification de l'indice WQI, l'ensemble des échantillons analysés sont classés dans la catégorie des eaux d'excellente qualité (Tableau III.12).

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Tableau III.10 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) /Réservoir: R. 5 juillet)

WQI arithmétique	Minimum	Maximum	Moyenne
NA	2.05	5.02	4.03
OMS	2.99	5.53	4.80

Tableau 11 : Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes Algériennes (Réservoir: R. 5 juillet).

Date de prélèvement	WQI	Qualité de l'eau
20-04-2025	4.52	Excellente
12/12/2024	4.54	Excellente
21-05-2023	5.02	Excellente
18-12-2022	2.05	Excellente

Tableau III 12 : Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes OMS (Réservoir: R. 5 juillet).

Date de prélèvement	WQI (R. 5 juillet)	Qualité de l'eau
20-04-2025	5.23	Excellente
12/12/2024	5.44	Excellente
21-05-2023	5.53	Excellente
18-12-2022	2.99	Excellente

III.4.2.2. Réservoir de BERBIH

III.4.2.2.1. Normes Algériennes

Les résultats obtenus ont mis en évidence une variabilité des valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI), lesquelles se sont inscrites dans un intervalle compris entre 4,52 (2025) et 4,96 (2023), avec une moyenne de 4,68 (Tableau III.13). Selon le système de classification retenu, l'ensemble des échantillons d'eau analysés relève de la catégorie des eaux d'excellente qualité, aucune valeur du WQI n'ayant dépassé le seuil maximal fixé pour cette classe, soit 25 (Tableau III.14).

III.4.2.2.2. Normes OMS

Les résultats obtenus révèlent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) ont présenté une faible variabilité, oscillant entre 5,23 (2025) et 6,63 (2023), avec une moyenne arithmétique de 5,80 (Tableau III.13). D'après le système de classification de l'indice WQI, la totalité

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

des échantillons d'eau analysés se classe dans la catégorie des eaux d'excellente qualité, toutes les valeurs du WQI demeurant largement inférieures au seuil maximal de 25 établis pour cette classe (Tableau III.15).

Tableau III.13 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / (Réservoir R. BERBIH).

WQI arithmétique	Minimum	Maximum	Moyenne
NA	4.52	4.96	4.68
OMS	5.23	6.63	5.80

Tableau III.14 : Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes Algériennes (Réservoir: R. BERBIH).

Date de prélèvement	WQI	Qualité de l'eau
20-04-2025	4.52	Excellente
12-12-2024	4.57	Excellente
21-05-2023	4.96	Excellente

Tableau III.15: Indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) / Normes OMS (Réservoir: R. BERBIH)

Date de prélèvement	WQI (R. BERBIH)	Qualité de l'eau
20-04-2025	5.23	Excellente
12-12-2024	5.53	Excellente
21-05-2023	6.63	Excellente

III.4.3. Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI)

III.4.3.1. Réservoir de 5 JUILLET

III.4.3.1.1. Normes Algériennes

Conformément au système de classification de l'indice CCE-WQI, l'ensemble des échantillons étudiés appartient à la catégorie des eaux d'excellente qualité (CCE-WQI=100) (Tableaux III.16 et III.17).

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

Tableau III.16 : Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / (Réservoir R. 5 juillet).

CCE-WQI	Minimum	Maximum	Moyenne
NA	100	100	100
OMS	86	93	91.25

Tableau III.17 : Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes Algériennes (Réservoir: R. 5 juillet).

Date de prélèvement	CCE-WQI	NA
20-04-2025	100	Excellente
12/12/2024	100	Excellente
21-05-2023	100	Excellente
18-12-2022	100	Excellente

III.4.3.1.2. Normes OMS

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) varient entre 86 et 93, avec une moyenne de 91,25, avec une moyenne de 91,25 (Tableau III.16). Selon la classification de CCE-WQI, l'ensemble des échantillons analysés est classé dans la catégorie des eaux de bonne qualité (Tableau III.18).

Tableau III.18 : Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes OMS (Réservoir: R. 5 juillet).

Date de prélèvement	CCE-WQI	Qualité de l' Eau (OMS)
20-04-2025	93	Bonne
12/12/2024	93	Bonne
21-05-2023	93	Bonne
18-12-2022	86	Bonne

III.4.3.2. Réservoir de BERBIH

III.4.3.2.1. Normes Algériennes

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) sont comprises entre 84 et 100, avec une moyenne de 94,67 (Tableau III.19). L'analyse des résultats met en évidence la présence de deux classes de qualité d'eau, à savoir « excellente » et « bonne ». Les eaux prélevées durant les campagnes d'échantillonnages [20/04/2025] et [12/12/2024] appartiennent à la classe « excellente » qualité (Tableau III.20). Par ailleurs, l'échantillon collecté le [21/05/2023] est caractérisé par une eau de bonne qualité pour la consommation humaine et (Tableau III.20).

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

En revanche, l'échantillon collecté le [21/05/2023], correspondant à [33,33] %, se classe dans la catégorie « bonne ».

Tableau III.19: Statistique descriptive de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) /(Réservoir BERBIH).

CCE-WQI	Minimum	Maximum	Moyenne
NA	84	100	94.67
OMS	77	93	87.67

Tableau III.20 : Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes Algériennes (Réservoir: BERBIH).

Date de prélèvement	CCE-WQI	Qualité de l ' Eau (NA)
20-04-2025	100	Excellente
12/12/2024	100	Excellente
21-05-2023	84	Bonne

III.4.3.2.2. Normes OMS

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) s'inscrivent dans un intervalle allant de 77 à 93, avec une moyenne de 87,67 (Tableau III.19). L'évaluation de la qualité des eaux révèle l'existence de deux catégories, à savoir « Bonne » et « Moyenne » (Tableau III.21). Les échantillons, prélevés le 20/04.2025 et 12/12.2024 appartient à la classe « Bonne ». L'échantillon collecté le 21/05/2023 est classé dans la catégorie « Moyenne ».

Tableau III.21: Indice de qualité de l'eau (CCE-WQI) / Normes OMS (Réservoir: BERBIH).

Date de prélèvement	CCE-WQI	Qualité de l ' Eau (OMS)
20-04-2025	93	Bonne
12-12-2024	93	Bonne
21-05-2023	77	Moyenne

III.5. Conclusion

Réservoir de 05 Juillet

Chapitre III : Evaluation de la qualité des eaux par les indices de qualité de l'eau

- Le diagramme circulaire des éléments majeurs montre la distribution statistique des ions dans l'eau, les principaux cations étant ordonnés comme suit Concernant les anions, l'ordre est le suivant : SO_4^{2-} (41,8 %) > HCO_3^- (31,9 %) > Cl^- (25,2 %) > NO_3^- (1,1 %).
- Les teneurs de TDS mesurés se situent entre 477 et 585 mg/L, avec une moyenne de 521,75 mg/L, ce qui respecte les normes de qualité de l'eau potable de l'OMS (<1000 mg/L) et la réglementation algérienne (< 1500 mg/L).
- Les eaux analysées affichent une dureté (TH) variant de 386 à 431 mg/L de CaCO_3 , avec une moyenne de 408,48 mg/L, ce qui les classe comme très dures.
- L'application combinée des trois indices de qualité de l'eau (CCE-WQI, WQI arithmétique et WQI pondéré) a révélé, lors de l'évaluation de l'eau du réservoir du 5 juillet, que tous les échantillons d'eau sont d'excellente qualité selon les normes Algériennes.

Réservoir de Berbih

- La minéralisation des eaux est principalement dominée par les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} , qui représentent respectivement 41,2 % et 31 % des ions. Les principaux anions sont le SO_4^{2-} et le Cl^- , avec des pourcentages respectifs de 42,2 % et 31,9 %. Ces résultats soulignent l'importance de ces ions dans le processus de minéralisation des eaux.
- Les concentrations de TDS mesurées se situent entre 477 et 585 mg/L, avec une moyenne de 521,75 mg/L, ce qui est conforme aux normes de qualité de l'eau potable de l'OMS (< 1 000 mg/L) et à la réglementation en vigueur en Algérie (< 1 500 mg/L).
- Les valeurs de dureté (TH) des eaux analysées sont comprises entre 399,48 et 678,82 mg/L de CaCO_3 , avec une moyenne de 507,53 mg/L. Ces eaux sont classées comme très dures.
- Les résultats de classification de l'eau du réservoir Berbih selon l'indice CCE-WQI permettent de dégager deux classes de qualité de l'eau : « excellente » et « bonne ». Par ailleurs, les résultats de l'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) ont permis de mettre en évidence que tous les échantillons d'eau analysés sont d'excellente qualité. En outre, selon l'indice WQI pondéré, les échantillons prélevés le 20 avril 2025 et le 12 décembre 2024 présentent une qualité excellente pour la consommation humaine, tandis que celui du 21 mai 2023 est de bonne qualité.

***CHAPITRE IV : ÉTUDE STATISTIQUE
DES PARAMETRES PHYSICO-
CHIMIQUES DES EAUX***

IV.1. Introduction

L'utilisation des Analyses statistiques multivariées (ASM) dans la présente étude est basée sur la matrice de corrélation, l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CHA). Ces outils ont permis de mettre en évidence les relations entre les différents paramètres des eaux, d'étudier les phénomènes à l'origine de la salinisation (minéralisation) des eaux, de classer les eaux en groupes ou sous-groupes et d'identifier les facteurs responsables de ces différents regroupements. Ces approches statistiques multivariées sont les meilleurs outils, et souvent la seule solution permettant d'analyser de grandes quantités d'informations obtenues à partir des analyses physico-chimiques des eaux ([Join et al., 1997](#)).

Les variables présentant un coefficient $r > 0,7$ sont considérées fortement corrélées, tandis que celles ayant un coefficient r compris entre 0,5 et 0,7, et $r < 0,5$, sont considérées comme modérément et faiblement corrélées, respectivement ([Adams et al., 2001](#)). Au cours de la dernière décennie, l'analyse en composantes principales (ACP) est largement utilisée pour identifier l'influence des activités naturelles ou anthropiques sur la composition chimique des eaux ([Belkhiri et al., 2011](#); [Lalaoui, 2021](#); [Ani, 2023](#); [Benadela, 2023](#)). La CHA est une méthode qui permet de grouper des individus ou des variables en de nouveaux groupes, en utilisant la liaison de Ward ([Ward, 1963](#)) et la distance euclidienne au carré comme mesure de la similarité entre deux individus ou deux variables, afin de regrouper les clusters probables et d'établir des associations entre les échantillons étudiés en fonction de leur composition chimique ([Belkhiri et al., 2011](#)). La classification ascendante hiérarchique (CAH) est un outil puissant pour analyser les jeux de données en chimie de l'eau et élaborer des modèles géochimiques ([Yidana et al., 2008](#)).

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

IV.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

IV.2.1 Les paramètres physiques des eaux

IV.2.1.1 Réservoir de 05 Juillet

IV.2.1.1.1. La température (TC°)

Dans la région étudiée, les valeurs de la température varient de 16,10°C à 26,70°C, avec un écart type de 3,90, une moyenne de 21,49°C et un coefficient de variation de 18,12% (Tableau IV.1 et Figure IV.1). La comparaison des valeurs de température a montré que la majorité (70%) des échantillons d'eau sont dans les normes de l'OMS et de l'Algérie qui est fixée à (25°C).

IV.2.1.1.2. Le potentiel d'hydrogène pH

Les valeurs du pH varient de 6.80 à 8.00, l'écart type est de 0.41 avec une moyenne de 7.46 et un coefficient de variation égale 5.54 % (Tableau IV.1). Les valeurs du pH montrent que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme (OMS et Algérienne) de la potabilité (Figure IV.2).

Tableau IV.1 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir 5 Juillet (2025)

Paramètres chimiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart-type	Coefficient de Variation (CV%)	Norme OMS
T°C	16.10	26.70	21.49	15.17	3.90	18.12	25
pH	6.80	8.00	7.46	0.17	0.41	5.54	6,5- 8,5
Turb (NTU)	0.23	1.20	0.53	0.06	0.24	45.91	5
CE (25°C)	940.00	1148.00	1044.15	3952.66	62.87	6.02	1500
TDS (mg/L)	470.00	572.00	519.75	951.78	30.85	5.94	1000

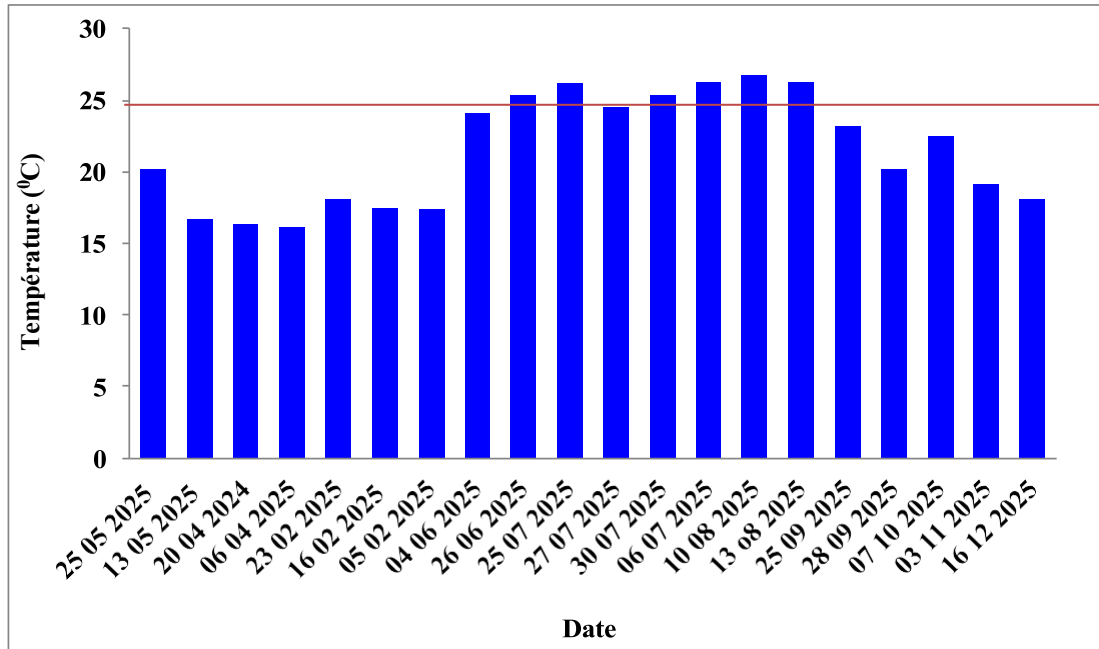


Figure IV.1: Variation de la température de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa

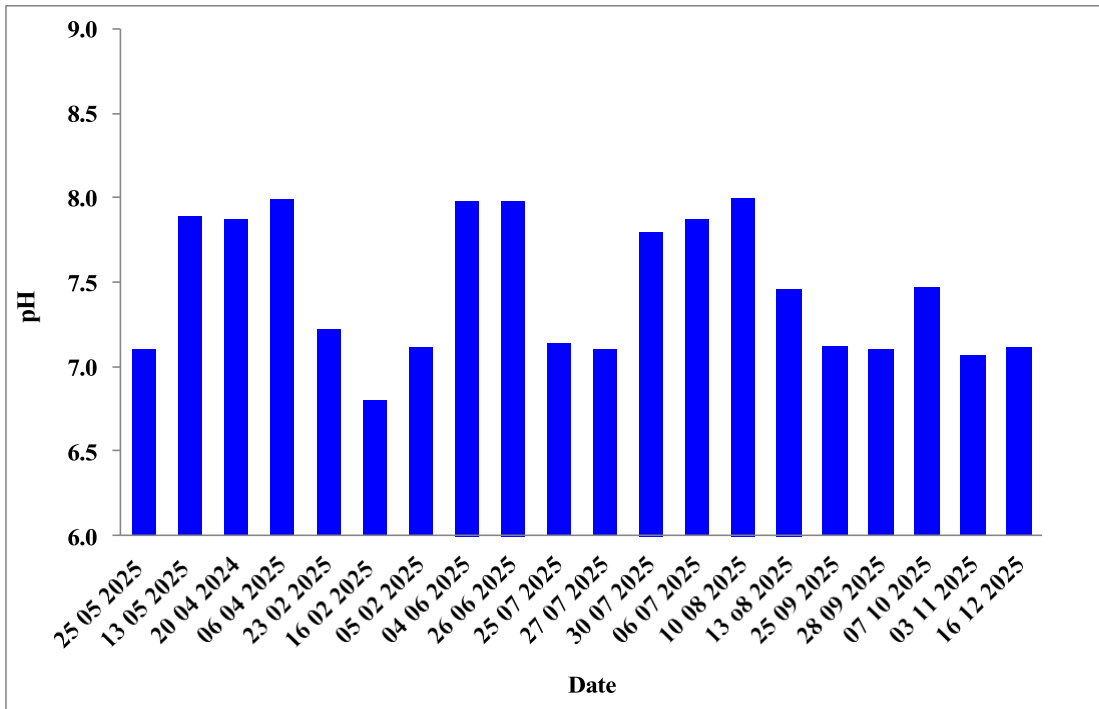


Figure IV.2: Variation de pH de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa

IV.2.1.1.3. La conductivité électrique CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Les valeurs de la conductivité électrique CE sont comprises entre 940,00 à 1148,00, avec une moyenne de 1044,15, un écart type de 62,87 et un coefficient de variation égale 6.02 %. Les valeurs du CE (Tableau IV.1) montrent que tous les échantillons d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme (OMS et Algérienne) de la potabilité (Figure IV.3).

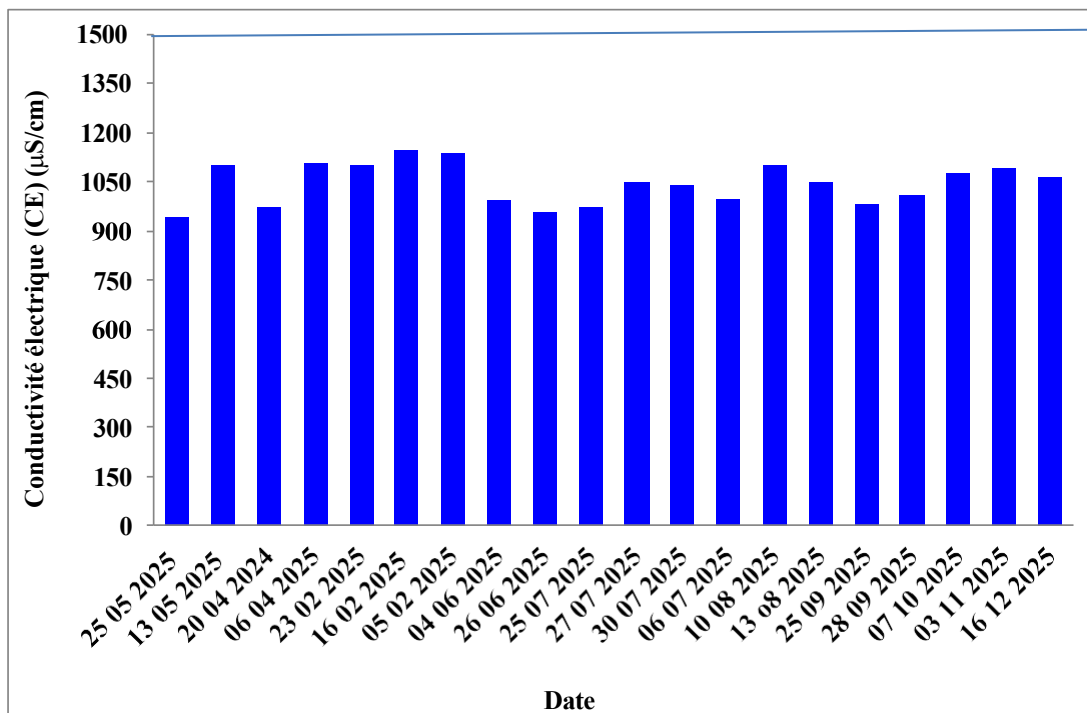


Figure IV.3: Variation de la conductivité électrique (CE) de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa

IV.2.1.1.4. Les solides dissous totaux (TDS)

Les valeurs de TDS des eaux oscillent entre 470 mg/L et 572 mg/L, avec une moyenne de 519.75 mg/L, un écart type de 30.85 mg/L et un coefficient de variation 5.94 % (Tableau IV.1). La comparaison des valeurs de TDS avec les normes de l'OMS et de l'Algérie a montré que tous les échantillons se trouvent dans l'intervalle de la norme de la potabilité (Figure IV.4).

IV.2.1.1.5. La turbidité

Les résultats obtenus de la turbidité montrent que les valeurs sont comprises entre 0,23 et 1,2 NTU, avec une moyenne de 0,53 NTU, un écart type de 0,24 et un coefficient de variation 45.91%.

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Il a signalé que les valeurs de la turbidité pour tous les échantillons d'eau sont inférieures aux normes de potabilité préconisées par l'OMS et l'Algérie (5 NTU) (Figure IV.5).

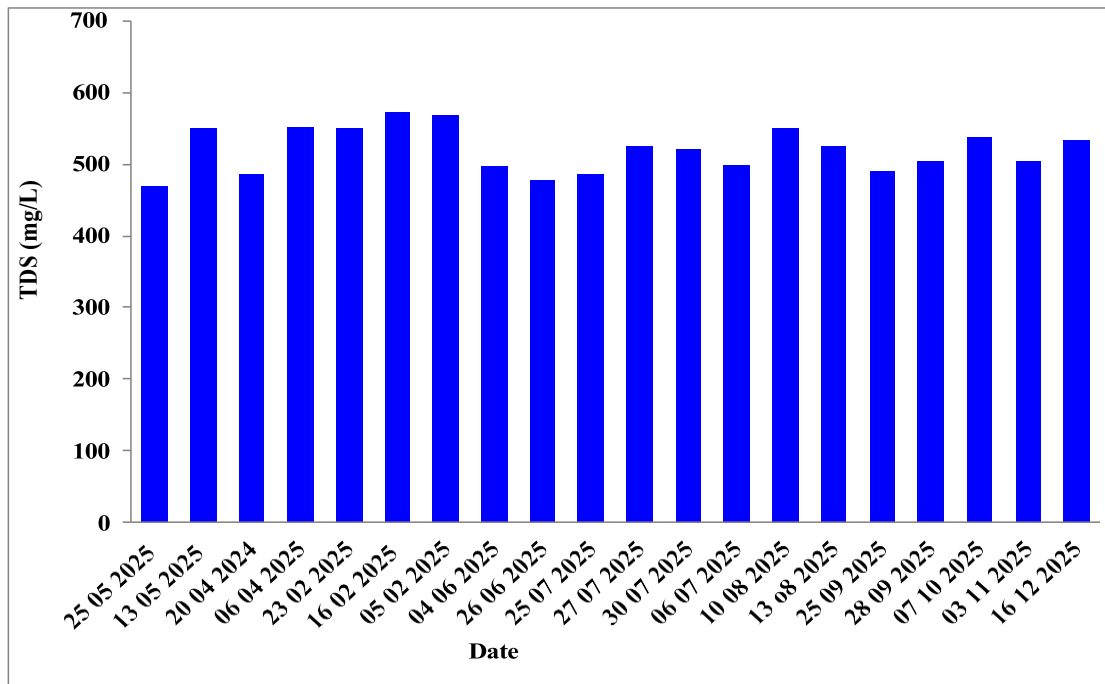


Figure IV.4: Variation de la minéralisation totale (TDS) de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa

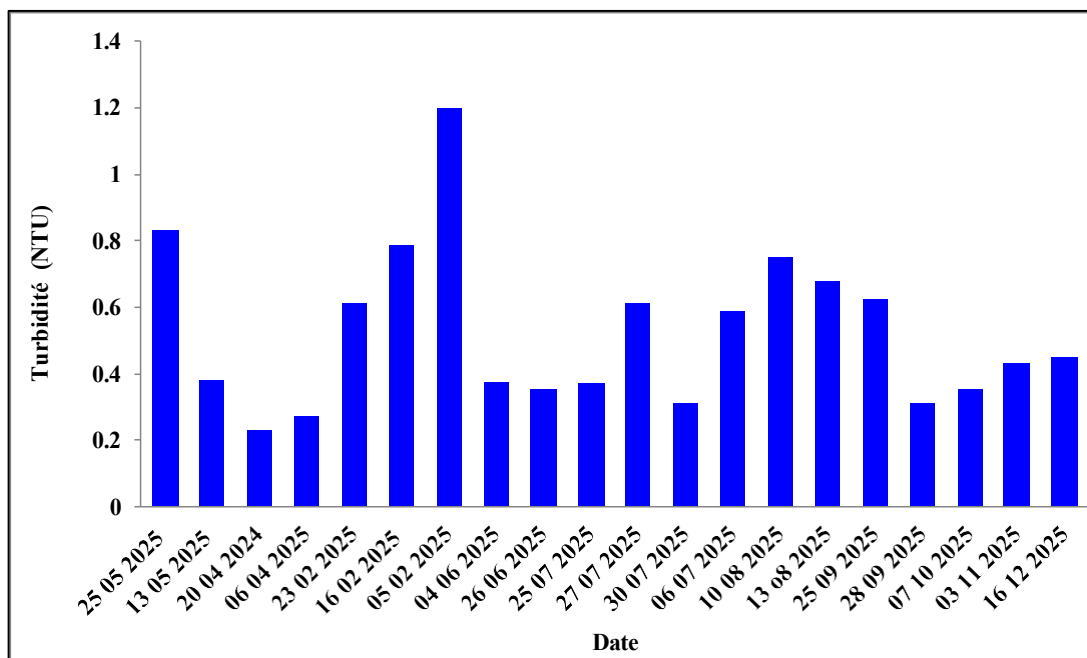


Figure IV.5: Variation de la turbidité de l'eau de réservoir 05 juillet de Djelfa

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

IV.2.1.2. Réservoir de Berbih

IV.2.1.2.1. La température (TC°)

Dans cette zone, les valeurs de la température oscillent entre 11.30°C à 26.40 °C, avec un écart type de 4.48, une moyenne de 21.56°C et un coefficient de variation de 20.80% (Tableau IV.2). Il a signalé que la majorité (65,38%) des échantillons d'eau sont dans les normes de qualité de l'eau potable. En revanche, les échantillons restants (34,17%) présentent des valeurs de la température dépassant la norme de potabilité (Figure IV.6).

Tableau IV.2 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir Berbih (2025)

Paramètres chimiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart-type	Coefficient de Variation (CV%)	Norme OMS
T°C	11.30	26.40	21.56	20.11	4.48	20.80	25
pH	6.82	7.98	7.47	0.15	0.39	5.24	6,5- 8,5
Turb (NTU)	0.26	1.12	0.46	0.05	0.22	47.41	5
CE (25°C)	955	1138	1044.16	3121.14	55.87	5.35	1500
TDS (mg/L)	477	945	554.88	14036.78	118.48	21.35	1000

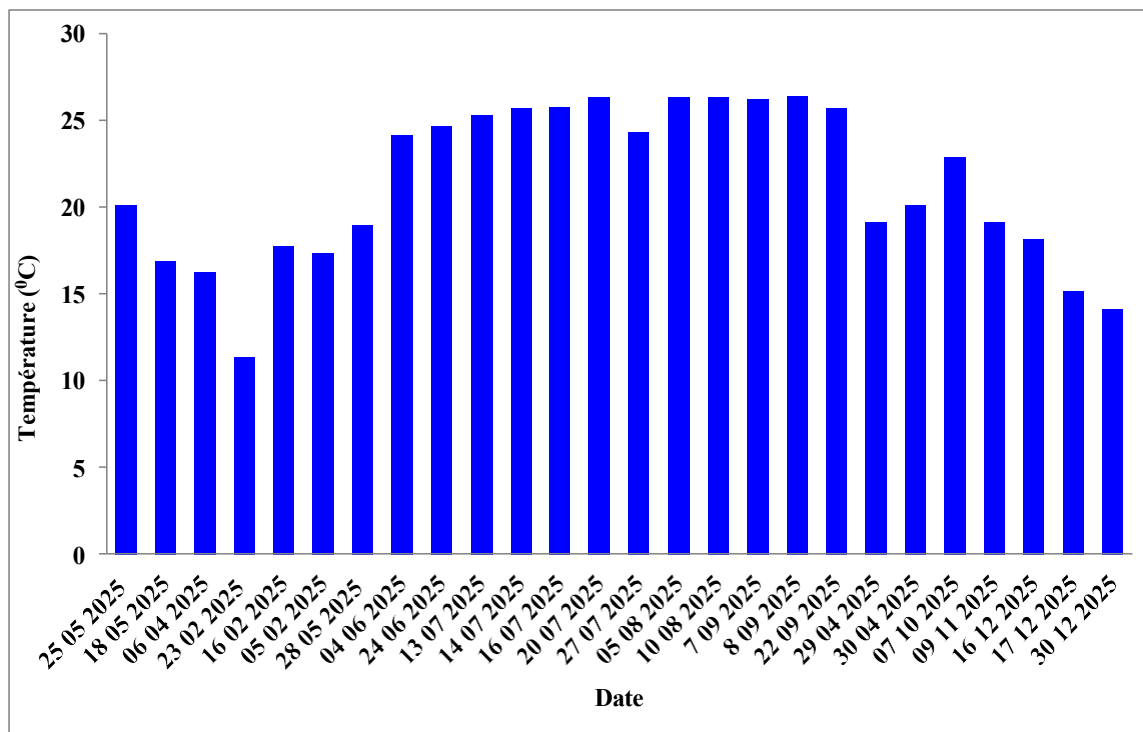


Figure IV.6: Variation de la température de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa

IV.2.1.2.2. Le potentiel d'hydrogène pH

Les valeurs de Le potentiel d'hydrogène pH sont comprises entre 6,82 à 7,98, avec une moyenne de 7,47, un écart type de 0,39 et un coefficient de variation égale 5,24 % (Tableau IV.2). Dans l'ensemble des eaux échantillonnées, les valeurs de pH mesurés ne dépassent les normes de potabilité (Figure IV.7).

IV.2.1.2.3. La conductivité électrique CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Les résultats révèlent que les eaux souterraines présentent une conductivité électrique moyenne de 1044.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un écart type de 55,87 et coefficient de variation de 5,35% (Tableau IV.2). Il est à noter que tous les échantillons d'eau analysés sont conformes aux normes de potabilité recommandées par l'OMS (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et l'Algérie (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Figure IV.8).

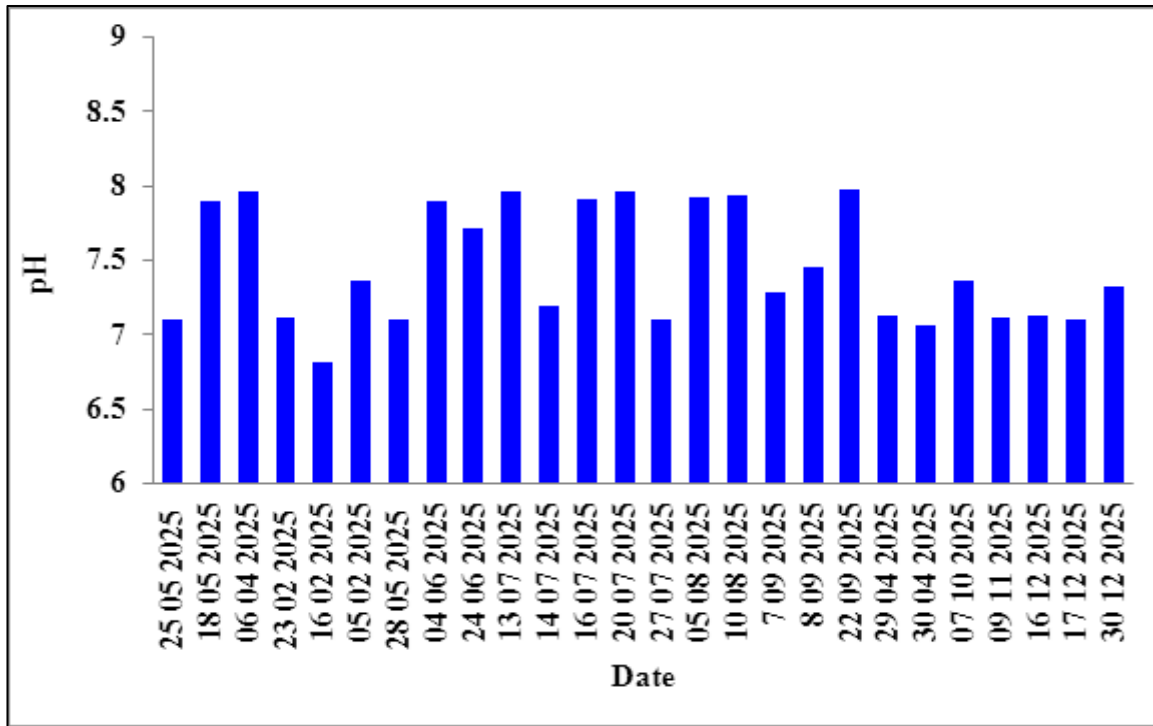


Figure IV.7: Variation de pH de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa

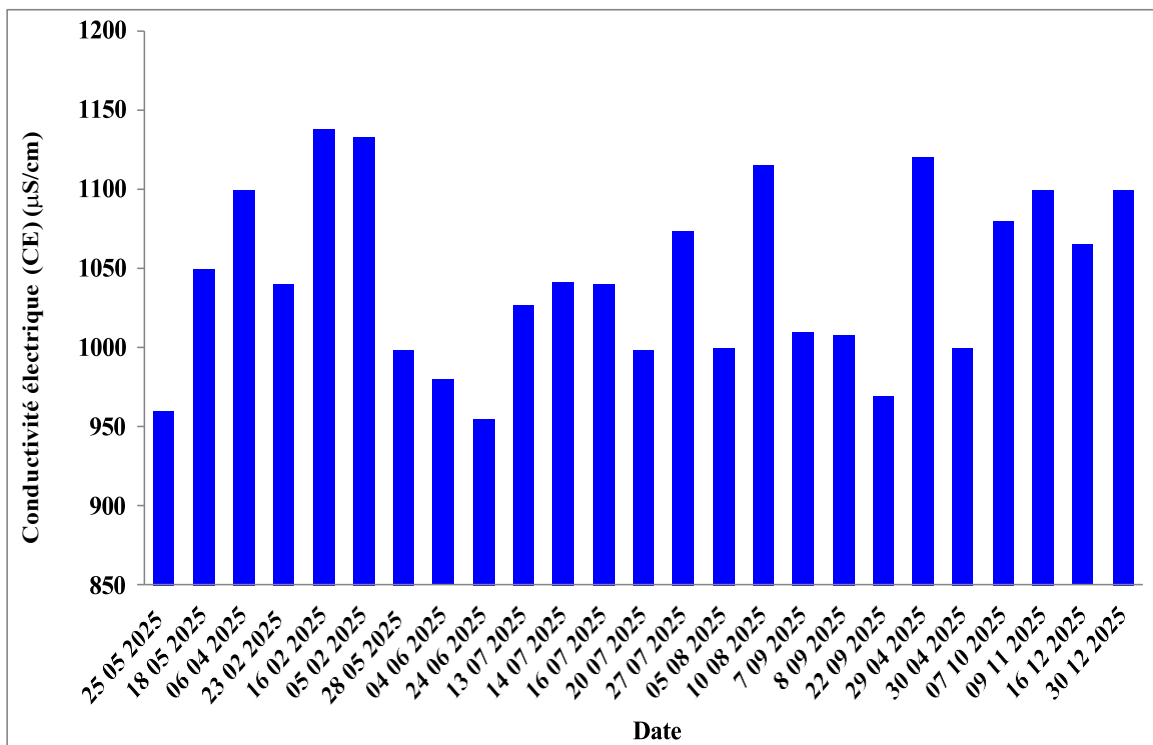


Figure IV.8: Variation de la conductivité électrique (CE) de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa

IV.2.1.2.4. Les solides dissous totaux (TDS)

Les valeurs de TDS des eaux sont comprises entre 477 mg/L et 945 mg/L, avec une moyenne de 554,88 mg/L, un écart type de 118,48 mg/L et un coefficient de variation 21,35% (Tableau IV.2). Il est signalé que tous les échantillons sont dans les normes de potabilité fixées par l'OMS (1000mg/L) et l'Algérie (1500 mg/L) (Figure IV.9).

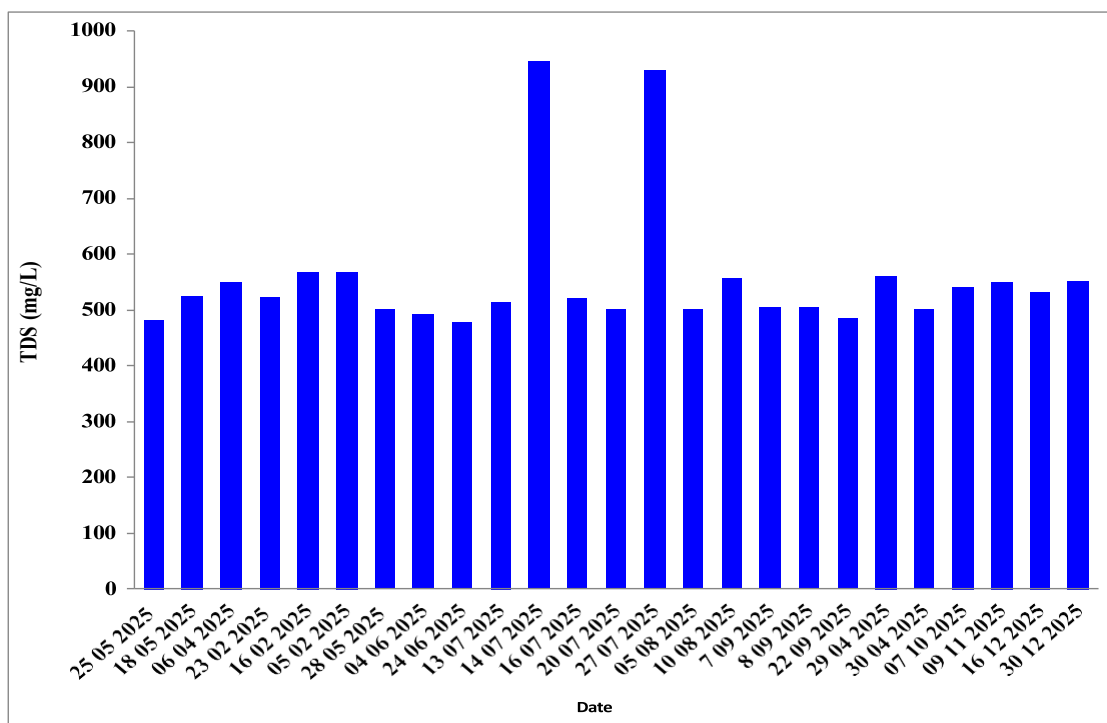


Figure IV.9: Variation de la minéralisation totale (TDS) de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa

IV.2.1.2.5. La turbidité

Les résultats obtenus de la turbidité font apparaître que les valeurs sont oscillées entre 0,26 et 1,12 NTU, avec une moyenne de 0,46 NTU, un écart type de 0,22 et un coefficient de variation 47,41 %. La comparaison des résultats obtenus montre que tous les échantillons sont caractérisés par une turbidité inférieure aux normes de potabilité (<5 NTU) (Figure IV.10).

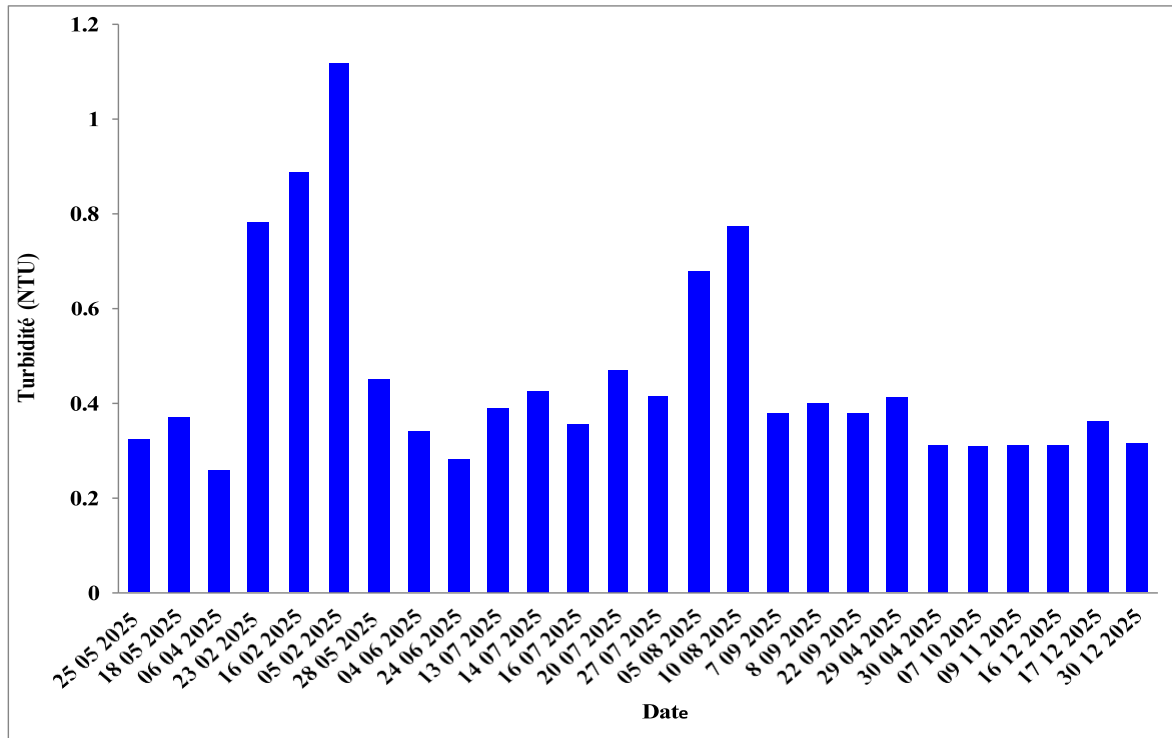


Figure IV.10: Variation de la turbidité de l'eau de réservoir Berbih de Djelfa

IV.3. Classification des eaux des réservoirs de 05 Juillet et Berbih

La classification des eaux est basée sur les paramètres suivants :

- La conductivité électrique (CE);
- Le solide total dissous (TDS) ;

IV.3.1. Classification des eaux selon la conductivité électrique (CE)

Les résultats obtenus montrent que deux classes d'eau ont été identifiées ([Tableau IV.3](#)), environ 35% des échantillons d'eau sont classés dans la classe « eau très faiblement minéralisée » et 65% des échantillons appartiennent à la classe « eau faiblement minéralisée ».

Tableau IV.3: Classification des eaux de réservoir de 05 Juillet ([Detay and Carpenter 1997](#)).

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Minéralisation	% d'échantillons
< 1000	Eau très faiblement minéralisée	35
1000-2000	Eau faiblement minéralisée	65
2000-4000	Eau légèrement minéralisée	0
4000–6000	Eau moyennement minéralisée	0

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

IV.3.2. 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.4), tous les échantillons d'eau appartiennent à la catégorie d'eau fraîche.

Tableau IV.4: Classification des eaux de réservoir de 05 Juillet (solides dissous totaux (TDS) (Freeze et Cherry (1979)

TDS (mg/L)	Classe d'eau	% d'échantillons
< 1000	fraîche	100
1000-10000	saumâtre	0
10000-100000	saline	0
>100000	saumure	0

IV.3.3. Classification des eaux selon la conductivité électrique (CE)

Les résultats obtenus montrent que deux classes d'eau ont été identifiées (Tableau IV.5), environ 24% des échantillons d'eau sont classés dans la classe « eau très faiblement minéralisée » et 76% des échantillons appartiennent à la classe « eau faiblement minéralisée ».

IV.3.4. Classification des eaux selon les solides totaux dissous (TDS)

Les résultats obtenus montrent que tous les échantillons d'eau sont classés dans la classe eau fraîche (Tableau IV.6).

Tableau IV.5: Classification des eaux de réservoir de Berbih (Detay and Carpenter 1997).

CE (µS/cm)	Minéralisation	% d'échantillons
< 1000	Eau très faiblement minéralisée	24
1000-2000	Eau faiblement minéralisée	76
2000-4000	Eau légèrement minéralisée	0
4000-6000	Eau moyennement minéralisée	0

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Tableau IV.6: Classification des eaux de réservoir Berbih (solides dissous totaux (TDS) (Freeze et Cherry (1979))

TDS (mg/l)	Classe d'eau	% d'échantillons
< 1000	fraîche	100
1000-10000	saumâtre	0
10000-100000	saline	0
>100000	saumure	0

IV.4. Etude de la qualité des eaux par approche statistique multivariée

IV.4.1. Matrice de corrélation (Réservoir 05-Juillet)

Les coefficients de corrélation des différents paramètres physico-chimiques permettent d'évaluer la relation entre deux variables. La matrice de corrélation de Pearson permet de déterminer la relation entre deux ou plusieurs des variables. Les variables caractérisées par un coefficient de corrélation $r > 0,7$ sont considéré être fortement corrélé, tandis que celles avec un coefficient ($0,5 < r < 0,7$) et $r < 0,5$ présentent des corrélations modérées et faibles respectivement (Adams et al, 2001; Saihi, 2024).

Les matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux de réservoir de 05-Juillet est illustrée par le [Tableau IV.7](#).

- Les solides dissous totaux (TDS) est positivement fortement ($r=0,96$) avec la conductivité électrique (CE) et positivement faiblement avec la turbidité ($r=0,36$). Il est à signaler que la corrélation entre TDS et CE s'explique par la contribution des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) au processus d'acquisition de la minéralisation des eaux.
- La turbidité a une corrélation négative faible ($r=-0,44$) avec le pH, ce qui indique l'influence de la variation de le pH sur la turbidité.
- La température a une corrélation négative faible avec la conductivité électrique (CE) ($-0,42$) et les solides dissous totaux (TDS) ($-0,38$), indiquant l'influence de la variation de la température sur les deux paramètres (CE et TDS).

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Tableau IV.7 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques

	pH	Turb	T	CE	TDS
pH	1				
Turb	<u>-0.44</u>	1			
T	0.24	-0.02	1		
CE	-0.17	0.34	<u>-0.42</u>	1	
TDS	-0.10	<u>0.36</u>	-0.38	<u>0.96</u>	1

IV.4.2. Analyse en Composante principale (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) constitue l'une des principales méthodes statistiques multivariées utilisées pour l'exploration et l'interprétation des données complexes. L'analyse en composantes principales des données physico-chimiques réalisée à partir de 5 des variables centrées réduites (T, pH, TDS, CE et la turbidité) à l'aide du logiciel STATISTICA (Statsoft, 2010). Il est à signaler que le choix de nombre de facteurs ACP à prendre en considération pour l'interprétation des résultats a été basé sur le critère de Kaiser (Kaiser, 1960). Selon ce critère, seulement les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données.

IV.4.2.1. Analyse en composante principale (ACP) (Réservoir 05-JUILLET)

IV.4.2.1.1. Projection des variables sur les plans factoriels

Les résultats de l'analyse statistique multivariée réalisée par l'Analyse en Composantes Principales (ACP) ont permis de mettre en évidence l'existence de deux facteurs principaux (F1 et F2), expliquant 73,46% de la variance totale (Tableau. IV.8, Figure IV.11 et Figure IV.12).

Tableau. IV.8: valeurs propres des composantes principales

	Valeur propre	% Total	Cumulative	Cumulative
1	2.48	49.65	2.48	49.65
2	1.19	23.81	3.67	73.46

Facteur 1 : Le premier facteur (F1) représente 49,56 % de cette variance, tandis que le second facteur (F2) en explique 23,81 % (Tableau IV.8).

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Facteur 1 (49,56%) : ce facteur est très fortement corrélé à la conductivité électrique (CE) et le TDS. Il est moyennement positivement corrélé à la turbidité et moyennement négativement corrélé à la température (Tableau. IV.9 et Figure IV.12). Cet axe factoriel représente le processus d'acquisition de la salinité des eaux.

Facteur 2 (23,81%) : ce facteur est moyennement positivement corrélé à la turbidité et fortement négativement corrélé au pH (Tableau. IV.9 et Figure IV.12). Cet axe factoriel représente l'impact de la matière en suspension sur la qualité ainsi que l'influence de pH sur les processus physico-chimique, régissant l'acquisition de la minéralisation des eaux.

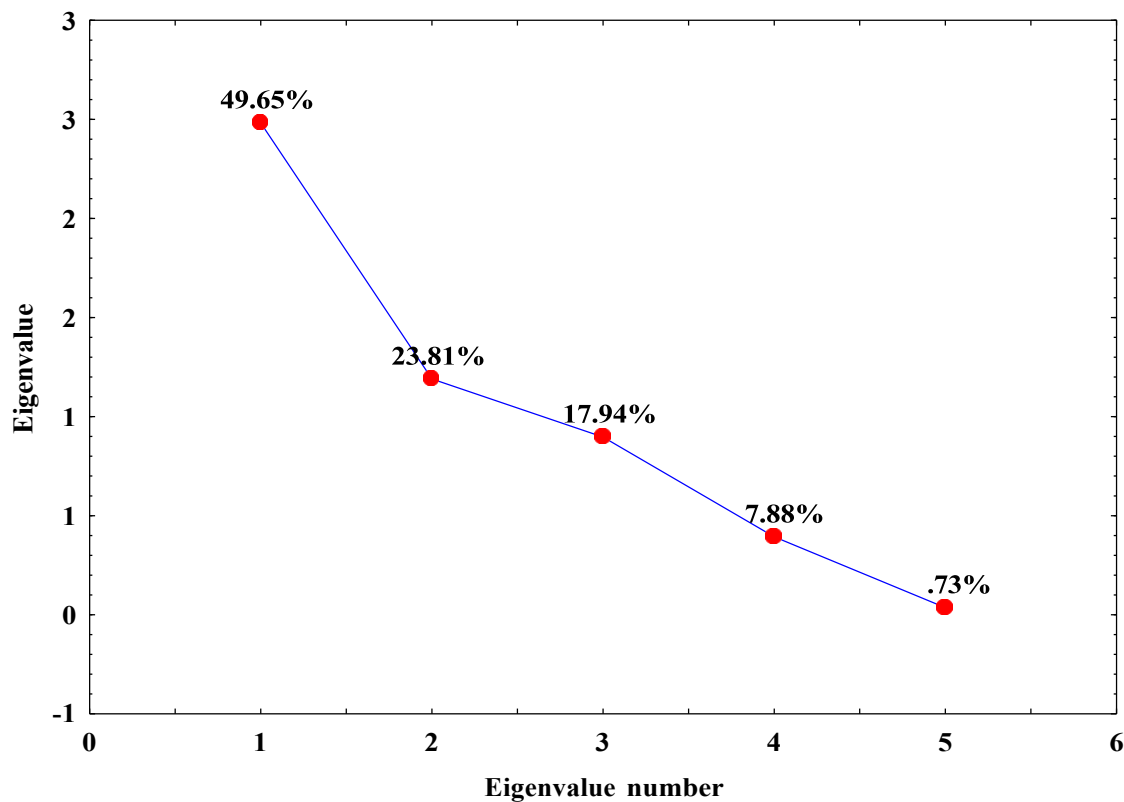


Figure IV.11 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Tableau. IV.9: Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1 et F2.

	Factor 1	Factor 2
pH	-0.42	<u>-0.75</u>
T°C	<u>-0.57</u>	0.24
CE	<u>0.92</u>	-0.28
TDS	<u>0.91</u>	-0.30
Turb	<u>0.56</u>	<u>0.63</u>

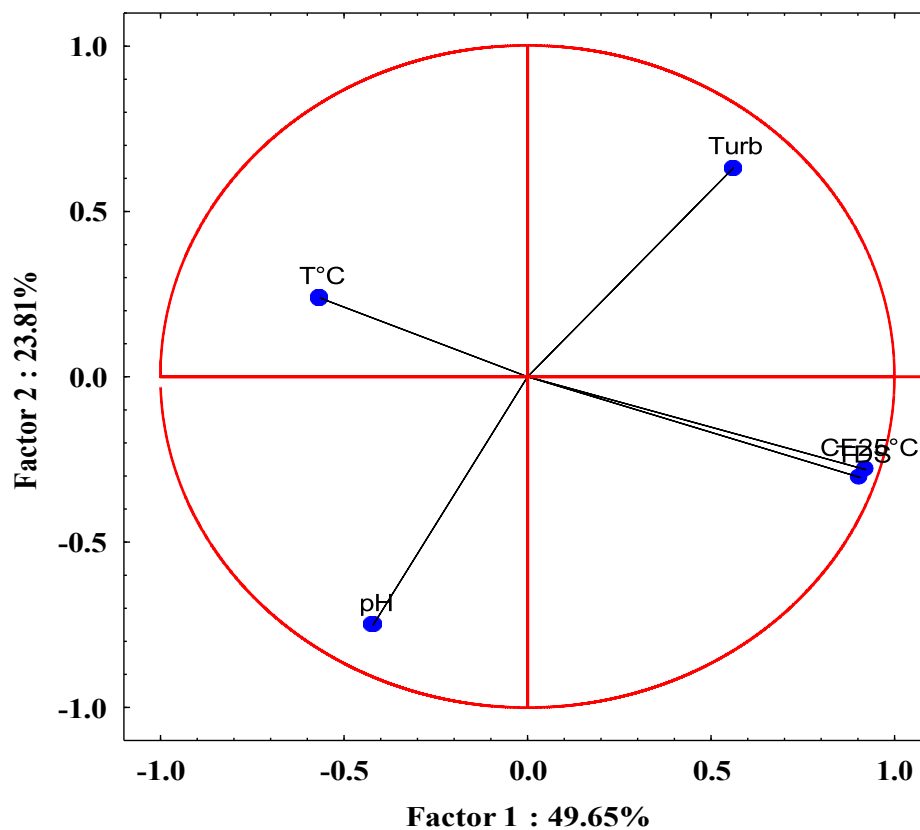


Figure IV.12 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.

IV.4.2.1.2. Projection des individus sur les plans factoriels (Réservoir 05 Juillet)

Le **groupe 1** inclut 8 échantillons d'eau (Figure IV.13) prélevés durant la période (25/05/2025, 25/07/2025, 25/09/2025, 28/09/2025, 20/04/2024, 04 06 2025, 26/06/2025 et 06/07/2025) (40%), avec une

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

conductivité électrique qui varie entre 940 et 1010 $\mu\text{S}/\text{cm}$, une moyenne de 977,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce groupe est caractérisé par des teneurs en TDS allant de 470 et 505 mg/L, avec une moyenne de 488.8 mg/L. Ce groupe représente les eaux les moins minéralisées. Le pH varie de 7,1 à 8, avec une valeur moyenne de 7,5. La température oscille entre 16,3°C et 26,3°C.

Le **groupe 2** est composé de 10 échantillons d'eau (Figure IV.13) prélevés durant la période (13/05/2025, 06/04/2025, 23/02/2025, 03/11/2025, 16/12/2025, 27/07/2025, 13/08/2025, 30/07/2025, 07/10/2025 et 10/08/2025) (50%). La conductivité électrique varie de 1040 à 1105 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec moyenne de 1077,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les teneurs en TDS sont comprises entre 505 et 552 mg/L, avec une moyenne de 534,6 mg/L. Le pH oscille de 7,1 à 8, avec une valeur moyenne de 7,5. La température varie entre 16,1°C et 26,7°C, avec une valeur moyenne de 21,3°C.

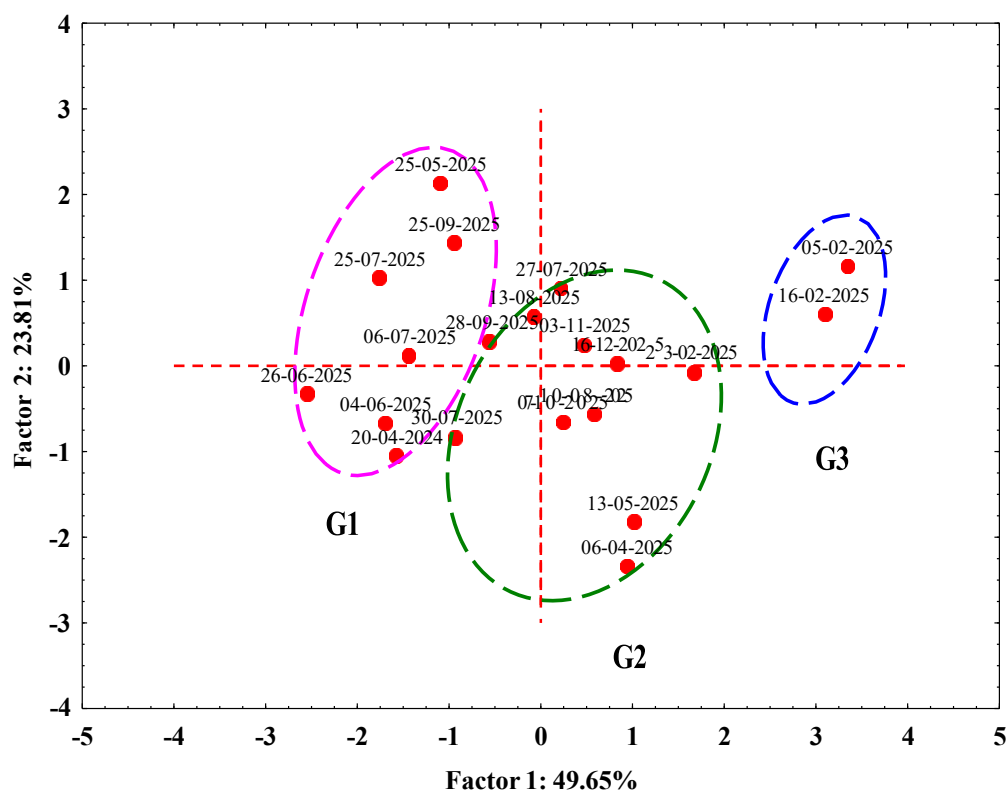


Figure IV.13 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (Réservoir 05 Juillet).

Le **groupe 3** comprend 2 échantillons d'eau (Figure IV.13) prélevés le (16/02/2025 et 05/02/2025) (10%). La conductivité électrique est comprise entre 1138 à 1148 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec moyenne de 1143 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux souterraines de ce groupe sont caractérisées par des teneurs en TDS variant de 567 mg/L à 572

mg/L, avec une moyenne de 569,50 mg/L. Le pH varie de 6,8 à 7,11, avec une valeur moyenne de 6,96. La température varie entre 16,1°C et 26,7°C, avec une valeur moyenne de 21,3°C.

IV.4.3. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

IV.4.3.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des variables

Le premier cluster est marqué par la température et le pH (Figure IV.14). Ce groupe met en évidence l'impact de ces deux paramètres sur la composition chimique des eaux. Le deuxième cluster est caractérisé par la présence de la conductivité électrique (CE) et les solides dissous Totaux (TDS). Ce cluster représente l'influence de ces deux paramètres sur les processus chimique d'acquisition (dissolution et /ou précipitation) de la minéralisation des eaux. Le troisième cluster est formé par la turbidité, indiquant l'impact de la matière en suspension sur les propriétés physique de l'eau.

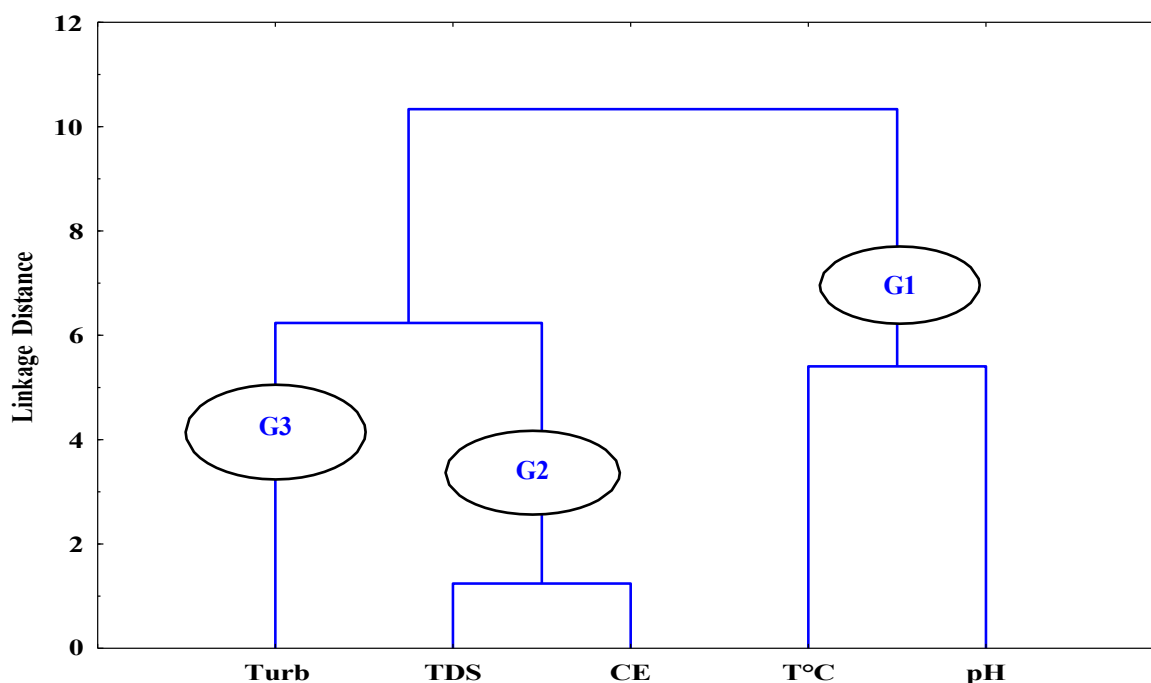


Figure IV.14 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux de réservoir de 05 Juillet

IV.4.3.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des individus

Le Cluster 1 : est composé de 8 échantillons d'eau (Figure IV.15), ce qui représente 40% du nombre total des échantillons d'eau prélevés durant les années 2024 et 2025. Les valeurs de pH oscillent entre 7.1 et 8, avec une moyenne de 7.5 ce qui est caractéristique des eaux alcalines. Ce cluster est caractérisé par des valeurs de la conductivité électrique (CE) qui varient de 940 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à

1010 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 977.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En outre, les valeurs de TDS sont comprises entre 470 mg/L et 505 mg/L, avec une moyenne de 488.8 mg/L, ce qui caractérise les eaux à faible minéralisation.

Le Cluster 2 : Ce cluster comprend 10 échantillons d'eau (Figure IV.15) et concerne 50% du nombre total des échantillons d'eau prélevés durant les années 2024 et 2025. Les valeurs de pH sont comprises entre 7.1 et 8, avec une moyenne de 7.5 ce qui est caractéristique des eaux alcalines. Ce cluster caractérise les eaux dont la conductivité électrique (CE) varie de 1040 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1105 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1077.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En outre, l'eau de ce cluster est marquée par des valeurs de TDS variant de 505 mg/L à 552 mg/L, avec une moyenne de 534.6 mg/L, caractérisant des à faible minéralisation.

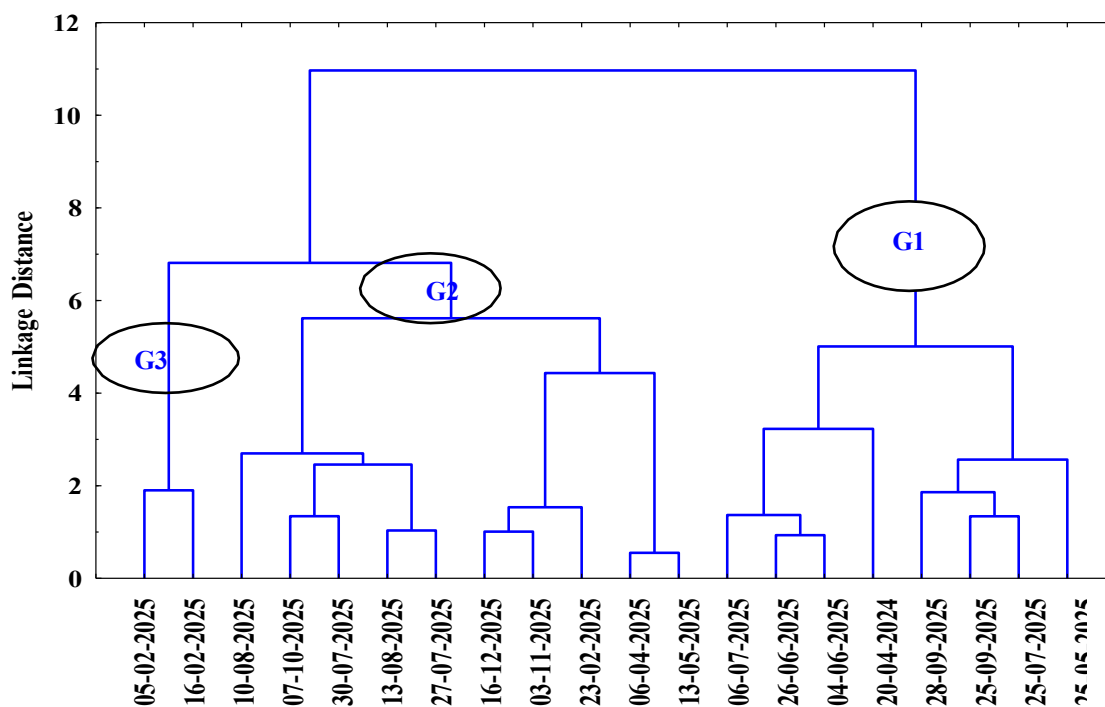


Figure IV.15 : Dendrogrammes des individus de la composition chimique des eaux des eaux de réservoir de 05 Juillet

Le Cluster 3 : Ce cluster est composé de 2 échantillons d'eau (Figure IV.15) prélevés le 05/02/2025 et le 16/02/2025 et représente 10% du nombre total des échantillons d'eau prélevés durant les années 2024 et 2025. Les valeurs de pH varient entre 6.80 et 7.11, avec une moyenne de 6.96 ce qui est caractéristique des eaux proches de la neutralité. Ce cluster est caractérisé par une conductivité

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

électrique élevée par rapport aux deux autres clusters. Les valeurs de CE oscillent entre 1138 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1148 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1143 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les teneurs en TDS varient de 567 mg/L à 572 mg/L, avec une moyenne de 569.5 mg/L

IV.4.4. Matrice de corrélation (Réservoir BERBIH)

- La matrice de corrélation montre que la température a une corrélation positive faible ($r=0,45$) avec le pH, ce qui indique l'influence de la variation de la température sur le pH.
- La turbidité a une corrélation positive faible ($r=0,42$) avec la conductivité électrique (CE), ce reflète l'impact de ces deux paramètres sur la variation de la qualité physico-chimique.
- La conductivité électrique (CE) est négativement faiblement corrélée avec la température ($r=-0,44$).
- La conductivité électrique (CE) a une corrélation positive faible avec le TDS ($r=0,30$)

Tableau IV.10: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques

	pH	Turb	T°C	CE	TDS
pH	1				
Turb	-0.12	1			
T°C	<u>0.45</u>	-0.18	1		
CE	-0.28	<u>0.42</u>	<u>-0.44</u>	1	
TDS	-0.30	0.05	0.11	0.30	1

IV.4.5. Analyse en composante principale (ACP) (Réservoir BERBIH)

IV.4.5.1. Projection des variables sur les plans factoriels

Les résultats de l'analyse statistique multivariée par l'application de l'analyse en composante principale (ACP) ont montré l'existence de deux facteurs (F1-F2), exprimant 63,26% de la variance totale (Tableau. IV.11 et Figure IV.16). Le facteur premier exprime 40,98 % et le second facteur exprime 22,28%.

Facteur 1 : les poids factoriels de la conductivité électrique (0.81) sur l'axe (F1), traduisant l'acquisition de la charge saline de l'eau (FigureIV.17). En outre, la turbidité de l'eau présente un poids factoriels moyen sur cet axe, indiquant l'impact de la présence de la matière en suspension colloïdale dans l'eau (Tableau. IV.11). Les variables T et pH ont un poids factoriel moyen et négatif,

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

suggérant l'influence de ces deux variables sur les réactions chimiques contrôlant la composition chimique de l'eau (Tableau. IV.11).

Facteur 2 : Les solides dissous totaux (TDS) ont un poids factoriel fort sur cet axe, ce qui traduit l'influence de processus d'acquisition de la minéralisation sur la qualité de l'eau (Tableau. IV.11 et Figure IV.17). En outre, la température présente un poids factoriel moyen., ce qui reflète l'influence de ce paramètre sur le processus de dissolution des minéraux sur la qualité de l'eau (Tableau. IV.11).

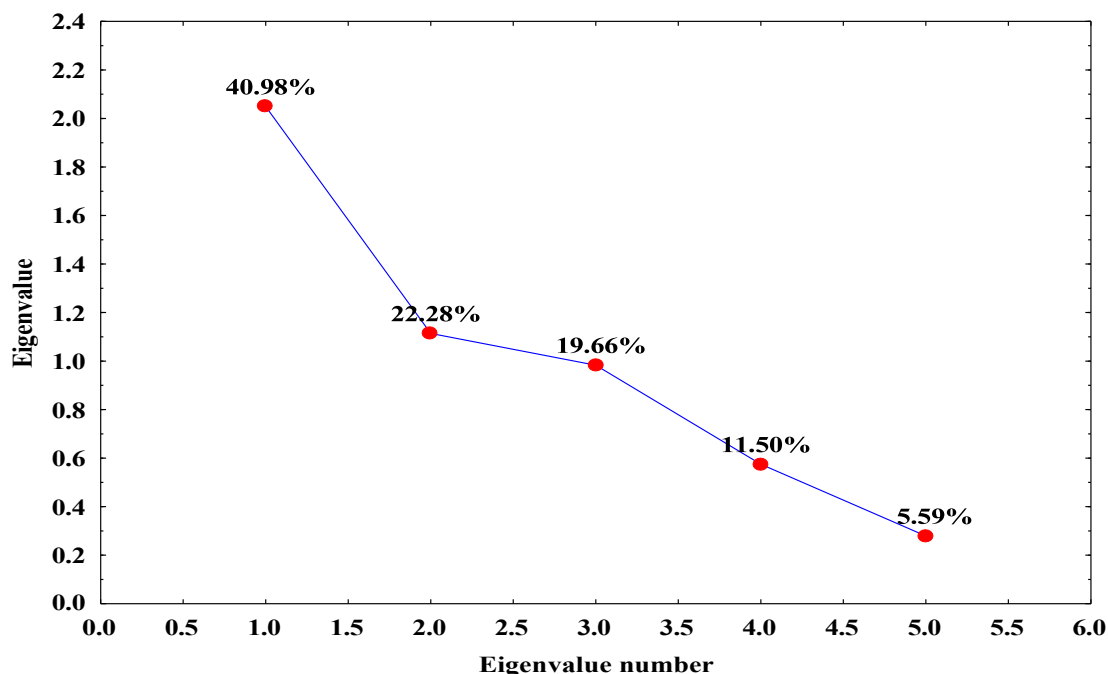


Figure IV.16 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.

Tableau. IV.11: Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1 et F2.

	Factor 1	Factor 2
T°C	-0.69	<u>0.52</u>
pH	-0.69	-0.15
CE	<u>0.81</u>	0.02
TDS	0.38	<u>0.89</u>
Turb	<u>0.54</u>	-0.19

IV.4.5.2. Projection des individus sur les plans factoriels (Réservoir Berbih)

Le **groupe 1**: constitué de 11 échantillons d'eau prélevés durant la période (25/05/2025, 28/05/2025, 06/04/2025, 30/04/2025, 18/05/2025, 10/08/2025, 29/04/2025, 09/11/2025, 16/12/2025, 07/10/2025 et 30/12/2025) correspondant à 44% des eaux analysées (Figure IV.18). Il est caractérisé par des valeurs de la conductivité électrique allant de 960 à 1120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1062,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de ce groupe ont des teneurs en TDS variant de 481 à 560 mg/L, avec une moyenne de 531,5 mg/L. Les valeurs de pH sont comprises entre 7,1 et 8, avec une valeur moyenne de 7,4. La température varie de 14,1°C à 26,3°C, avec une valeur moyenne de 19,3°C.

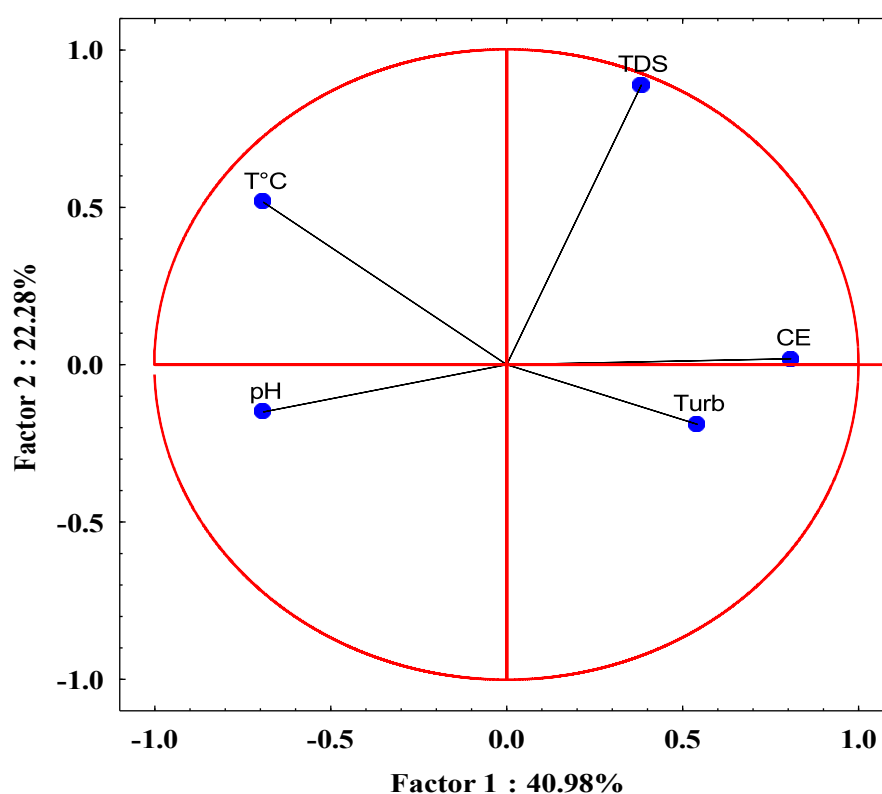


Figure IV.17 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.

Le **groupe 2**: ce groupe comprend 3 échantillons prélevés le (23/02/2025, 16/02/2025 et 05/02/2025) correspondant à 12% des eaux analysées (Figure IV.18). Les valeurs de la conductivité électrique oscillent entre 1040 et 1138 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1103,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les teneurs en TDS varient de 522 à 568 mg/L, avec une valeur moyenne de 552,3 mg/L. Le pH varie de 6,8 à 7,4, avec une valeur moyenne de 7,1. La température est comprise entre 11,3°C et 17,8°C, avec une valeur moyenne de 15,5°C.

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Le **groupe 3**: il regroupe 2 échantillons prélevés le (27/07/2025 et 14/07/2025) correspondant à 8% des eaux analysées (Figure IV.18). Ce groupe est caractérisé par une conductivité électrique variant de 1041 et 1074 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1057,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs de TDS sont comprises entre 930 et 945 mg/L, avec une moyenne de 937.5 mg/L. Le pH varie de 7,1 à 7,2. La température varie entre 24,3°C et 25,7°C, avec une valeur moyenne de 25°C.

Le **groupe 4**: Les 9 échantillons d'eau restants (04/06/2025, 22/09/2025, 20/07/2025, 24/06/2025, 13/07/2025, 16/07/2025, 05/08/2025, 7/09/2025, 8/09/2025) appartiennent au groupe 4 correspondant à 36% des eaux analysées (Figure IV.18). Les eaux de ce groupe sont caractérisées par une conductivité électrique allant de 955 à 1040 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 998,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les teneurs en TDS oscillent entre 477 et 520 mg/L, avec une valeur moyenne de 499,3 mg/L. Le pH varie de 7,3 à 8 avec une valeur moyenne de 7,8. La température varie entre 24,1°C et 26,4°C, avec une valeur moyenne de 25,6°C.

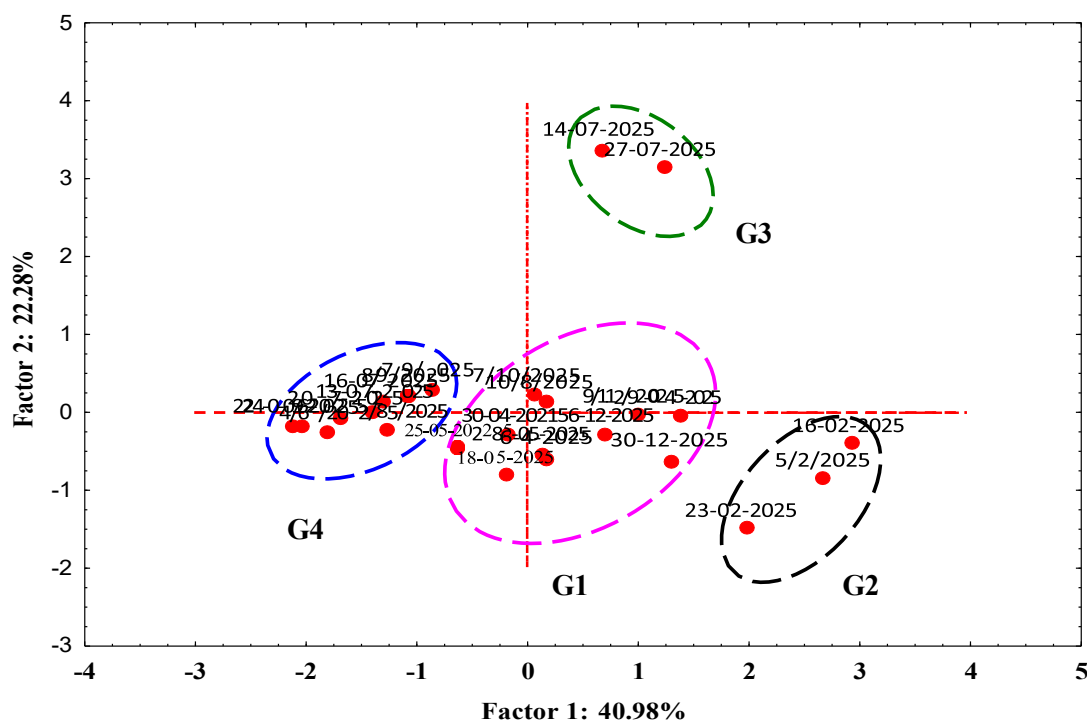


Figure IV.18 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 (Réservoir Berbih).

IV.4.6. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ((Réservoir BERBIH)

IV.4.6.1. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des variables

Les résultats obtenus par l'application de la classification ascendante hiérarchique sont représentés par le dendrogramme ci-dessous ; L'analyse de ce dendrogramme, montre deux clusters : Les

dendrogrammes des variables (Figure IV.17) permet de distinguer deux clusters ; le premier cluster (C1) est formé des variables T et pH, le deuxième cluster (C2) composé de variables CE, TDS et la turbidité.

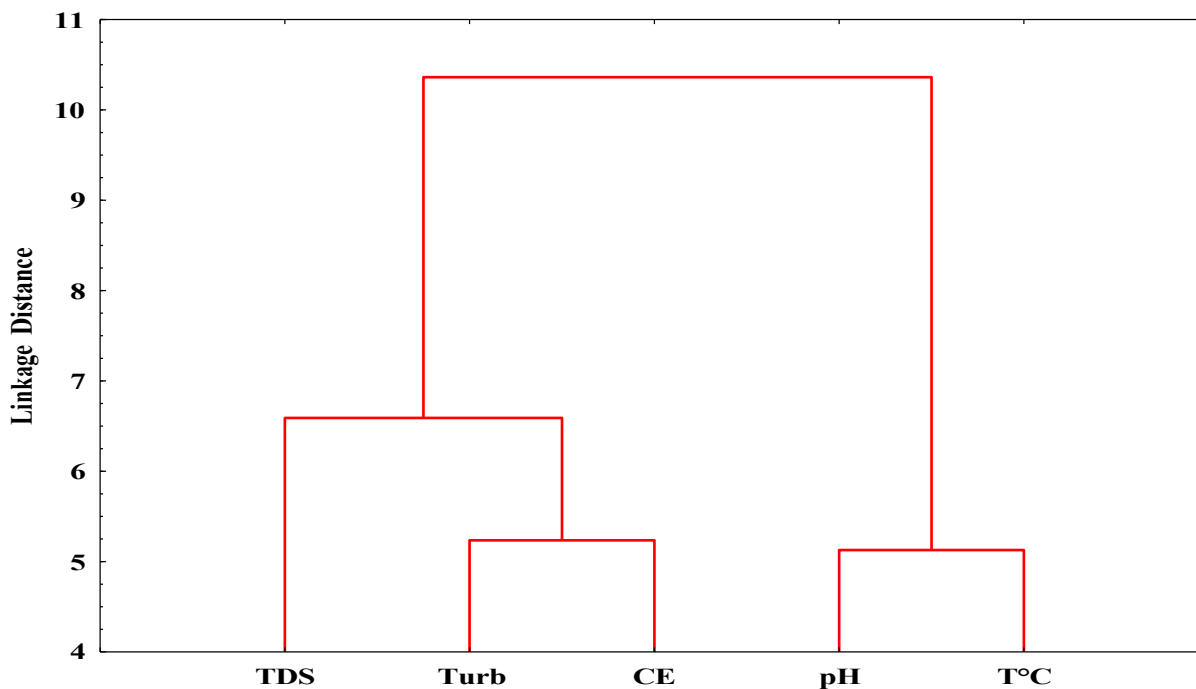


Figure IV.19 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux de réservoir de Berbih

IV.4.6.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des individus ((Réservoir BERBIH)

Cluster 1 : Ce cluster est composé de 11 échantillons d'eau correspondant à 44% des échantillons total (Figure IV.18). Il est caractérisé par des valeurs de la conductivité électrique (CE) allant de 960 à 1120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1062.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau IV.12). Les teneurs en TDS varient de 481 à 560 mg/L, avec une moyenne d'environ 531.5 mg/L. Le pH est compris entre 7,1 et 8, avec une moyenne de 7.4. La température varie de 14.1°C à 26.3°C, avec une moyenne de 19.3°C.

Cluster 2 : Il inclut 3 échantillons d'eau, ce qui représente 12% des échantillons total (Figure IV.18). La conductivité électrique (CE) varie de 1040 à 1138 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 1103.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau IV.12). Les teneurs en TDS oscillent entre 522 et 568 mg/L, avec une moyenne de 552.3 mg/L. Ce cluster est caractérisé par des valeurs de pH variant de 6.8 à 7.4, avec une valeur moyenne de 7.1. La température est comprise entre 11.3°C et 17.8°C, avec une moyenne de 15.5°C.

Cluster 3 : Il comprend 2 échantillons correspondant à 8% des échantillons total (Figure IV.18). La conductivité électrique (CE) est comprise entre 1041 et 1074 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 1057.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau IV.12). Les teneurs en TDS varient de 930 à 945 mg/L, avec une valeur moyenne de 937.5 mg/L. Le pH est compris entre 7.1 et 7.2, avec une moyenne de 7.2. La température varie de 24.3°C à 25.7°C, avec une moyenne de 25°C.

Cluster 4 : Il inclut 9 échantillons d'eau, ce qui représente 36% des échantillons total. La conductivité électrique (CE) est comprise entre 955 et 1040 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 998,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau IV.12). Les teneurs en TDS varient de 477 à 520 mg/L, avec une valeur moyenne de 499,3 mg/L. Le pH est compris entre 7,3 et 8 avec une moyenne de 7,8. La température varie de 24,1°C à 26,4°C, avec une moyenne de 25,6°C.

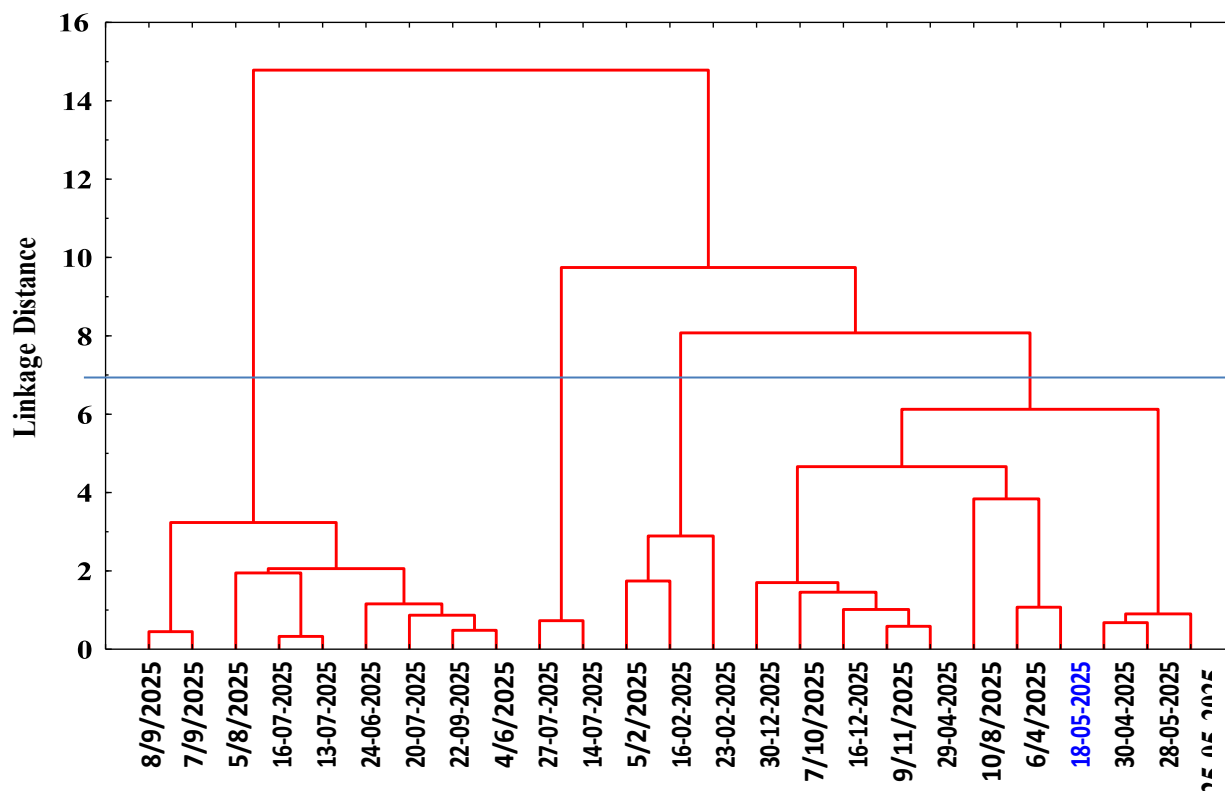


Figure IV.20 : Dendrogrammes des individus de la composition chimique des eaux des eaux de réservoir de Berbih

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

Tableau IV.12. Résumé statistique des paramètres chimiques pour les principaux groupes (Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)). (Réservoir de Berbih de la ville de Djelfa)

	Groupe 1(N=11)			Groupe 2(N=3)			Groupe 3(N=2)			Groupe 4(N=9)		
Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
T°C	14.1	26.3	19.3	11.3	17.8	15.5	24.3	25.7	25.0	24.1	26.4	25.6
pH	7.1	8.0	7.4	6.8	7.4	7.1	7.1	7.2	7.2	7.3	8.0	7.8
CE (mS/cm)	960	1120	1062.6	1040	1138	1103.7	1041	1074	1057.5	955	1040	998.8
TDS (mg/L)	481.0	560.0	531.5	522	568	552.3	930	945	937.5	477	520	499.3
Turb	0.3	0.8	0.4	0.8	1.1	0.9	0.4	0.4	0.4	0.3	0.7	0.4

IV.5. Conclusion

Réservoir 05 Juillet

Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) indiquent l'existence de deux facteurs principaux (F1 et F2), qui expliquent 73,46% de la variance totale. Le **facteur 1 (49,56 %)** présente une forte corrélation avec la conductivité électrique (CE) et le TDS, ainsi qu'une corrélation positive moyenne avec la turbidité et une corrélation négative moyenne avec la température, soulignant l'acquisition de la salinité des eaux. Le **facteur 2 (23,81 %)** montre une corrélation positive moyenne avec la turbidité et une forte corrélation négative avec le pH, soulignant l'impact des matières en suspension et l'influence du pH sur la minéralisation des eaux. L'ACP des individus montre trois groupes. Le **groupe 1** comprend 8 échantillons d'eau dont la conductivité moyenne est de 977,9 $\mu\text{S/cm}$, la teneur TDS moyenne est de 488,8 mg/L, le pH moyen est de 7,5 et la température moyenne est de 21,3 °C. Le **groupe 2**, composé de 10 échantillons, se caractérise par une conductivité moyenne de 1077,4 $\mu\text{S/cm}$, une TDS moyenne de 534,6 mg/L, un pH moyen de 7,5 et une température moyenne de 21,3 °C. Le **groupe 3**, constitué de deux échantillons, révèle une conductivité moyenne de 1143 $\mu\text{S/cm}$, une TDS moyen de 569,5 mg/L, un pH moyen de 6,96 et une température similaire de 21,3 °C. L'application de la CAH des variables a permis d'identifier trois clusters, (**C1** : T et pH) ; (**C2** : CE et TDS); (**C3** : Turbidité). En outre, la CAH des individus permet de classer les échantillons en 03 clusters distincts. Le **cluster 1** présente une conductivité électrique variant de 940 à 1010 $\mu\text{S/cm}$ (moyenne de 977.9 $\mu\text{S/cm}$) et des valeurs de TDS entre 470 et 505 mg/L (moyenne de 488.8 mg/L), indiquant des eaux à faible minéralisation. Le **cluster 2** comprend 10 échantillons d'eau. Le pH varie de 7.1 à 8 (moyenne de 7.5), indiquant des eaux alcalines. La conductivité électrique est entre 1040 $\mu\text{S/cm}$ et 1105 $\mu\text{S/cm}$ (moyenne de 1077.4 $\mu\text{S/cm}$), et les valeurs de TDS varient de 505 mg/L à 552 mg/L (moyenne de 534.6 mg/L), caractérisant une faible minéralisation. Le **cluster 3**, composé de deux échantillons d'eau (10%). Le pH, presque neutre, varie de 6.80 à 7.11 (moyenne de 6.96). La conductivité électrique est élevée, de 1138 $\mu\text{S/cm}$ à 1148 $\mu\text{S/cm}$ (moyenne de 1143 $\mu\text{S/cm}$), tandis que les TDS sont entre 567 mg/L et 572 mg/L (moyenne de 569.5 mg/L).

Réservoir de Berbih

Les résultats de l'analyse en composante principale (ACP) révèlent deux facteurs (F1-F2) qui expliquent 63,26 % de la variance totale, avec le premier facteur représentant 40,98 % et le second 22,28 %. **Facteur 1** : les poids factoriels indiquent que la conductivité électrique influence fortement

Chapitre IV : Étude statistique des paramètres physico-chimiques des eaux

l'acquisition de charge saline de l'eau. La turbidité a un poids factoriel moyen, montrant l'impact des matières en suspension. Les variables T et pH présentent un poids factoriel moyen et négatif, suggérant leur influence sur les réactions chimiques de la composition de l'eau. **Facteur 1** : les solides dissous totaux (TDS) ont un fort impact sur la qualité de l'eau et indiquent un lien avec la minéralisation. La température a un poids factoriel moyen et influence également la dissolution des minéraux dans l'eau. La CAH des variables identifie deux clusters : le premier (C1) inclut les variables T et pH, tandis que le deuxième (C2) comprend CE, TDS et la turbidité. Par ailleurs, la CAH des individus a mis en évidence quatre clusters. Le cluster 1 comprend 44 % des échantillons. Il se caractérise par des valeurs de conductivité électrique variant de 960 et 1120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1062,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les teneurs en TDS variant de 481 à 560 mg/L, avec une moyenne d'environ 531,5 mg/L. Le cluster 2 comprend 2% des échantillons. La conductivité électrique varie de 1040 à 1138 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 1103,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les teneurs en TDS oscillent entre 522 et 568 mg/L, avec une moyenne de 552,3 mg/L. Le groupe 3, représentant 8 % des échantillons, dont la conductivité électrique varie de 1041 à 1074 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (moyenne de 1057,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$), les niveaux de TDS de 930 à 945 mg/L (moyenne de 937,5 mg/L). Le groupe 4 comprend 36 % des échantillons. La conductivité électrique varie de 955 à 1040 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 998,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les niveaux de TDS varient de 477 à 520 mg/L, avec une moyenne de 499,3 mg/L.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La ville de Djelfa, qui se caractérise par un climat sec et de faibles précipitations, dépend des eaux souterraines pour la satisfaction des besoins en eau de la population. L'objectif de l'étude était d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux des réservoirs d'AEP de la ville de Djelfa. Pour cela, le suivi de la qualité physico-chimique des eaux en se basant sur les paramètres clés (Température, pH, conductivité, turbidité, éléments majeurs) a été réalisée, afin de garantir la conformité et la sécurité de l'eau pour le consommateur.

Les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

Réservoir de 05 Juillet

- Le diagramme circulaire montre la distribution des cations principaux dans l'eau : Ca^{2+} (45,9 %) > Na^+ (28,2 %) > Mg^{2+} (24,6 %) > K^+ (1,3 %). Pour les anions, l'ordre est le suivant : SO_4^{2-} (41,8 %) > HCO_3^- (31,9 %) > Cl^- (25,2 %) > NO_3^- (1,1 %). Les teneurs de TDS de l'eau sont conformes aux normes de l'OMS (<1000 mg/L) et à la réglementation Algérienne (<1500 mg/L). La dureté des eaux analysées les classant comme très dures (>300 mg/L de CaCO_3).
- Les indices de qualité de l'eau (CCE-WQI, WQI arithmétique et WQI pondéré) ont montré que tous les échantillons d'eau prélevés au niveau du réservoir de 5 juillet étaient d'excellente qualité selon les normes Algériennes.
- Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) montrent que deux facteurs (F1 et F2) expliquent 73,46 % de la variance totale. Le facteur 1 est lié à la conductivité électrique et au TDS, avec une corrélation positive avec la turbidité et négative avec la température, soulignant la salinité. Le facteur 2 est positivement corrélé à la turbidité et négativement au pH, indiquant l'influence des matières en suspension et du pH sur la minéralisation des eaux. L'ACP des individus révèle trois groupes.

Réservoir de Berbih

- La minéralisation de ces eaux est caractérisée par la prédominance des cations Ca^{2+} (41,2 %) et Mg^{2+} (31,9 %). Les concentrations de TDS de l'eau sont conformes aux standards de l'OMS et à la norme Algérienne. La dureté de l'eau est très élevée (moyenne de 507,53 mg/L), ce qui classe l'eau dans la catégorie des eaux très dures.
- Les résultats de classification de l'eau du réservoir Berbih selon l'indice CCE-WQI indiquent deux classes de qualité : « excellente » et « bonne ». L'indice de qualité de l'eau (WQI arithmétique) montre que tous les échantillons analysés sont d'excellente qualité. En outre,

Conclusion générale

l'indice WQI pondéré permet de classer tous les échantillons analysés dans les catégories « excellente » et « bonne ».

- La CAH des variables révèle deux clusters : C1 avec les variables T et pH, et C2 avec CE, TDS et turbidité. De plus, la CAH des individus identifie quatre clusters.

Recommandations

- Surveillance continue de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des réservoirs de stockage pour les maintenir et les protéger contre la contamination ;
- Le nettoyage et la désinfection des réservoirs d'eau potable sont essentiels pour empêcher la croissance bactérienne et l'accumulation de dépôts, assurant ainsi la qualité et la sécurité de l'eau distribuée.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abbasi T., Abbasi S.A. (2012):** Water Quality Indices. Water-Quality Indices: Looking Back, Looking Ahead. Elsevier, pp. 353–356.
- Aboubakar, M. (2012).** Caractérisation D'un Système Aquifère Volcanique Par Approche Couplée Hydrogéochimique Et Modélisation Numérique. Exemple De L'aquifère Des Basaltes De Dalha, Sud-Ouest De La République De Djibouti. Thèse De Doctorat 'Université De Poitiers 239p.
- Adams S, Tredoux G, Harris C, Titus R, Pietersen K. (2001).** Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. J Hydrol 241:91–103.
- ADE, (2010).** Etude de diagnostic et de réhabilitation des systèmes AEP des villes de Blida et Djelfa, Djelfa.
- ADE. (2026).** Algérienne des Eaux de Djelfa. (Méthodes des analyses physico-chimiques des eaux (rapport interne)
- AFNOR (1997).** Qualité de l'Eau (Tome 1) : Terminologie, échantillonnage et évaluation des Méthodes (3e éd.). Afnor : Paris (France), 34 p.
- Amiri, A. (2023).** Essai d'établissement d'un nouveau indice de qualité des eaux souterraines (Applications à la région de Ouargla). Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ouargla, 86 p.
- Ani, M. (2023).** Fonctionnement des aquifères de socle par une approche combinée : hydroclimatologie, hydrogéologie et hydrogéochimie. Application au bassin versant de la Kara au nord du Togo. Thèse en Co-Tutelle. Université de Lomé (Togo) et Université de Reims Champagne-Ardenne (France), 394.
- ANRH, (2018).** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Djelfa.
- 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>.
- Baaziz, S. (2025).** Caractérisation hydrogéochimique des nappes d'eaux souterraines de la région d'El-Menia. Mémoire de master. Université Kasdi Merbah – Ouargla, 72 p.
- Belkhir, L; Boudoukha, A; Mouni, L (2011).** A multivariate Statistical Analysis of Groundwater Chemistry Data. International Journal of Environmental Research 5(2): 537-544.
- Belkendil, A.(2021).** Les ressources hydriques dans les zones arides, caractérisation, dynamique et durabilité (cas du sud – ouest Algérien). Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 225 p.
- Benadela L. (2023).** Apport des outils géochimiques et isotopiques à l'étude du fonctionnement de l'aquifère Karstique du Bassin d'Oued Fékan. Université Mascara, 224 p.
- Ben Melouka M.I.(2021).** Application du modèle weap et du processus d'hierarchie analytique a la durabilité de la gestion des ressources en eau. Mémoire de Master Université Ziane Achour –Djelfa 61p
- Bouderbala A., (2017):** Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain Algeria . Journal of the Geological Society of India 90(3): 347-356
- Boudiaf, Z et Kamel, H.F (2018)** Vulnérabilité des ressources en eaux souterraines à la pollution, cas de la nappe du Mio-plio-quaternaire du Synclinal de Djelfa. Mémoire de Master. Université Ziane Achour - Djelfa, 129 p.
- Brown, R.M, McClelland, N.I., Deininger, R.A.& Tozer, R.G. 1970** A-water quality index: how dare? Water and Sewage Works 117 (10), 339-343.
- Brown R.M., McClelland N.I., Deininger R.A., O'Connor M.F. (1972).** A Water Quality Index - Crashing the Psychological Barrier. In: Thomas W.A. (eds) Indicators of Environmental Quality. Environmental Science Research, vol 1, 173-182. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15

Références bibliographiques

- Chatterji, C., Raziuddin, M. (2002).** Determination of water quality index of a degraded river in Asanol Industrial area, Raniganj, Burdwan, West Bengal. *Nature, Environment and Pollution Technology*, 1 (2) (pp. 181-189).
- Chevalier F et Le Billac J. (2012).** Classification 2. Fac.des Sci. Economiques. Univ. Rennes. 44p.
- Chibane B, Boutaleb A, Lacroix M. (2010).** Etude hydrochimique et approche isotopique en région semi-aride : cas du synclinal de Djelfa. *European Journal of Scientific Research*.ISSN1450-216X Vol.45No.2(2010). pages 270-290.
- Conseil Canadien Des Ministres De L'environnement (CCME). (2001).** Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : Indice de qualité des eaux du CCME 1.0 Rapport technique dans Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, 1999, le Conseil.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M.M. (2008).** Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology* 353, 294–313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>
- Cornet, G . (1952) :** Etude hydrogéologique du bassin fermé des Zahrez Gharbi et Chergui XIX° congr .Géol . Inst . Alger , la géologie et les problème de l'eau en Algérie, t.2 . données sur l'hydrogéologie, Alger . 20 pages
- Davis, J.C. (1986).** Statistics and Data Analysis in Geology. Wiley, 606p
- Detay, M., & Carpenter, M. (1997).** Water wells: implementation, maintenance and restoration: Wiley London.
- Dinius, S.** Social accounting system for evaluating water resources. *Water Resour. Res.* 1972, 8, 1159–1177
- DPAT, 2010.** Monographie de la wilaya de Djelfa. Vol.1. 211 p.
- DRE, (2018).** Direction des Ressources en Eau, Djelfa
- Dunnette, D. 1979.** A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal (Water Pollution Control Federation)*. 51: 53-61.
- Elguizi, T. A., & Zeddouri, A. (2019).** Caractérisation hydrogéologique et qualité des eaux du champ captant d'Oued Seddeur El Djelfa. Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement (SIHE 2019), Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie.
- El Yaouti, F., et al. (2008).** Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied. Geochemistry*, 24 (1),16–31.
- Emberger, L., 1931 :** Sur une formule climatique applicable en géographie botanique. *Compt. Rend. Séances Acad. Sci.* 191 : 389-390
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979).** Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA
- Gonzalez, P.L. l'analyse en composantes principales (A.C.P.), 37 p.** <https://maths.cnam.fr/IMG/pdf/A-C-P-.pdf> (consulté le 25/05/2026)
- 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 Mostefa Benboulaïd –Batna 2, 192p.
- Green CE, Freeman D, Kuipers E, Bebbington P, Fowler D, Dunn G, Garety PA. (2008).** Measuring ideas of persecution and social reference: the Green et al. Paranoid Thought Scales (GPTS). *Psychol Med.* Jan;38(1):101-111. doi: 10.1017/S0033291707001638. Epub 2007 Oct 1. PMID: 17903336.

Références bibliographiques

- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, K.A. (2002).** Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10, 455–474. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- Chevalier F et Le Billac J. (2012).** Classification 2. Fac.des Sci. Economiques. Univ. Rennes. 44p.
- Hennia K ., (2007) :** Contribution à la gestion qualitative des eaux souterraines dans les zones semi-arides Application au moyen Cheliff occidental mémoire de Magister Université de Hassiba BenBouali Chlef .
- Hennia K. (2023).** Utilisation Des SIG Dans La Préservation Et La Protection Des Ressources En Eau Souterraines Dans Les Zones Semi-Arides - Application Au Bassin Du Moyen Cheliff Occidental Nord Algérie - Thèse de Doctorat. Université Hassiba Benbouali de Chlef 133p
- Horton, R.** An Index Number System for Rating Water Quality. *J. Water Pollut. Control Fed.* 1965, 37, 300–306.
- I.N.C.T. (2009).** Institut National de Cartographie et de Télédétection
- Imessaoudene Y (2014).** Calcul de l'eau virtuelle agricole dans La wilaya de Djelfa en vue de la détermination de son efficience d'utilisation Mémoire de Magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach - Alger.106p
- Join, JL; Coudray, J; Longworth, K. (1997).** Using principal components analysis and Na/Cl ratios to trace groundwater circulation in a volcanic island: the example of Reunion. *Journal of Hydrology*, 190, 1-18.
- JORA. (2011).** « journal officiel de la république algérienne ». N °18. P7-9.
- Kaiser H. F., (1960).** The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151.
- 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.
- 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 .
- Lalaoui, M. (2021).** Contribution à l'Etude Biogéochimique des Eaux du Barrage Hammam Grouz. Thèse de Doctorat. Centre Universitaire de Mila, 227p.
- Leizou K ., et al . (2017).** Evaluation of Water Quality Index of the Brass River Bayelsa State South-South Nigeria .*International Journal of Research Granthaalayah* 5(8):277-287.
- Leroy J.B. (1999).** La pollution des eaux (4ème édition). Presses Universitaires de France.
- Louarghi A,K,M. (2022).** Changements Climatiques : Impacts Sur Les Ressources En Eau De La Wilaya De Djelfa. Mémoire de Master Université Ziane Achour – Djelfa.78p
- Mahdid, B. (2024).** Effet de la qualité des eaux d'irrigation sur le sol et les plantes des terres agricoles au Nord-est Algérien (Cas de Oued k'sob région de M'sila). Thèse de Doctorat. Université 8 Mai 1945 Guelma, 165 p.
- Mellouk S Et Bentchich R 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 – Djelfa.71p

Références bibliographiques

- Mezrag, M. (2018).** Dynamique Environnementale Des Zones Steppiques A Djelfa (Algérie). Caractérisation Par Télédétection Des Changements Du Couvert Végétal Et Des Processus D'ensablement.. These De Doctorat, 'Université Lumière Lyon 2. France 333p
- Monographie de la wilaya de Djelfa 2017**
- Mohammedi S & Yahlali N.(2017)** Caractérisations, classification et statistique multivariable des eaux de l'aquifère alluvionnaire du fossé de SEBDOU (NW Algérie). Memoire de Master. Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –106p
- OMS. (2011).** Normes internationales applicables à l'eau de boisson, Genève.
- Ouanouki, B.(2012).** Modélisation de la demande en eau dans une région aride. Cas de la Wilaya de Djelfa. Revue « Nature & Technologie ». n° 06/Janvier 2012. Pages 93 à 105
- Pouget Marcel. (1977).** Cartographie des zones arides : géomorphologie, pédologie, groupements végétaux, aptitude du milieu à la mise en valeur à 1/100 000 : région de Messaad-Ain El Ibel (Algérie). Paris : ORSTOM, 90 p.
- Rahmani, B. (2016).** Approche Hydrogéologique Et Hydrochimique Des Eaux Souterraines Dans Une Zone Semi Aride. Cas De La Nappe Mio-Plio-Quaternaire Du Synclinal De Djelfa, Mémoire De Magister, Université Larbi Tebessi-Tebessa, 108p
- Ramakrishnaiah C.R., Sadashivaiah C. & Ranganna G., (2009).** Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. E-Journal of Chemistry, 6(2): 523-530.
- Reghais A.(2023)** . Etude Du Fonctionnement Hydrodynamique Et Hydrochimique De La Nappe Du Complexe Terminal De La Région De Biskra (Sud-Est Algérie) Thèse De Doctorat. Université Mohammed Seddik Benyahia- De Jijel
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N et coll. (2009).** L'Analyse de l'eau. Paris:Dunod, 1526 p. ISBN 978 2-10-054179-9.
- 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. Université Ziane Achour –Djelfa, 173p.
- StatSoft, Inc. (2011).** STATISTICA (Data Analysis Software System), Version 8. <http://www.statsoft.com>
- Soro G., Soro T D ., Fossou N M R ., ADJIRI O I., Soro N ., (2019)** : Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences 13(3): 1870-1889.
- Talhaoui, A; El Hmaidi, A; Jaddi, H; Ousmana, H; Manssouri, Imad. (2020).** Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Superficielles De L'Oued Moulouya' (NE, Maroc). European Scientific Journal Edition Vol.16, No.2 ISSN: 1857 – 7881.
- Todd D.K. (1980).** Groundwater Hydrology (2nd edn). Wiley. New York. 552pp.
- Ward, J.H. (1963).** Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association 58, 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- 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
- Yidana, S.M., Ophori, D. & Banoeng-Yakubo, B. (2008).** Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. Environ Geol 53, 1213–1223. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0710-1>

Références bibliographiques

- 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>
- Zegrab. A ,Zeghaiche. K et Seddoud. M.K(2021).** Gestion des ressources en eaux de la région de Djelfa. mémoire de Master. Université Ibn Khaldoun –Tiaret–87p

ANNEXES

ANNEXE

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

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 non abrasif.
- Déposez l'électrode dans une solution tampon dont le pH est de 4,00. Attendez que le pH-mètre se 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 ≈ 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)

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 cm³ de solution. Sa mesure s'effectue par l'utilisation d'une cellule de conductivité couplée à un conductimètre, et la conductivité s'exprime en µS/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).

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

- **S** sa section en cm² et **l** sa longueur en cm.

- Solution étalon de conductivité connue **P**

1 est appelé constante de l'élément de mesure.

S

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

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 : (Toledo, 2022)

- 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 la 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 (µS/cm) ou bien milli siemens par centimètre (Figure 1).

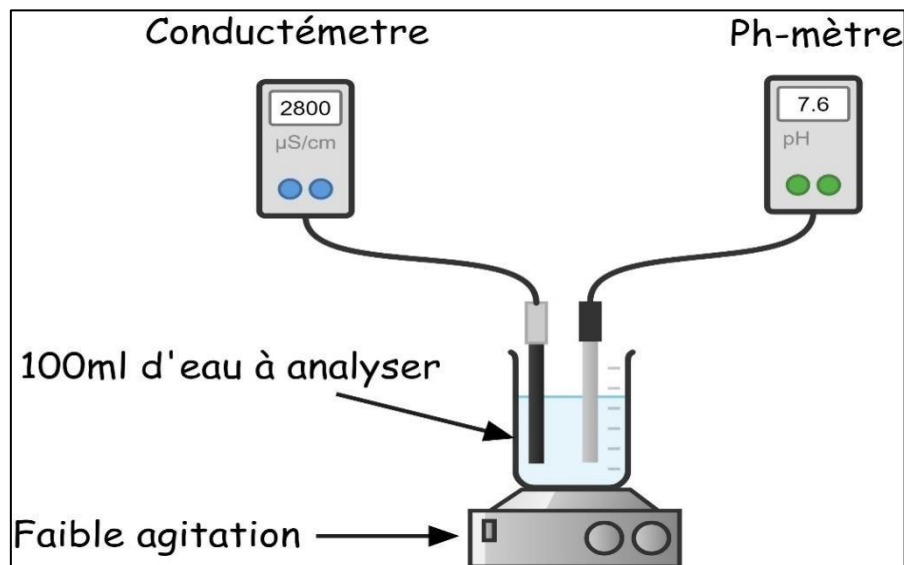


Figure 1 : Mesure de pH et conductivité (Saihi, 2024).

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 éthylènediamine tétracétique 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. H_2O
distillée..... 1000ml.

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

NaOH (pastilles) 80 g.
 H_2O 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
 H_2O 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 carbonate soit dissous. Éviter un excès d'acide. Ajouter 200ml d'eau et porter à ébullition quelques minutes afin d'éliminer le dioxyde de carbone. 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 distillée 1ml 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).

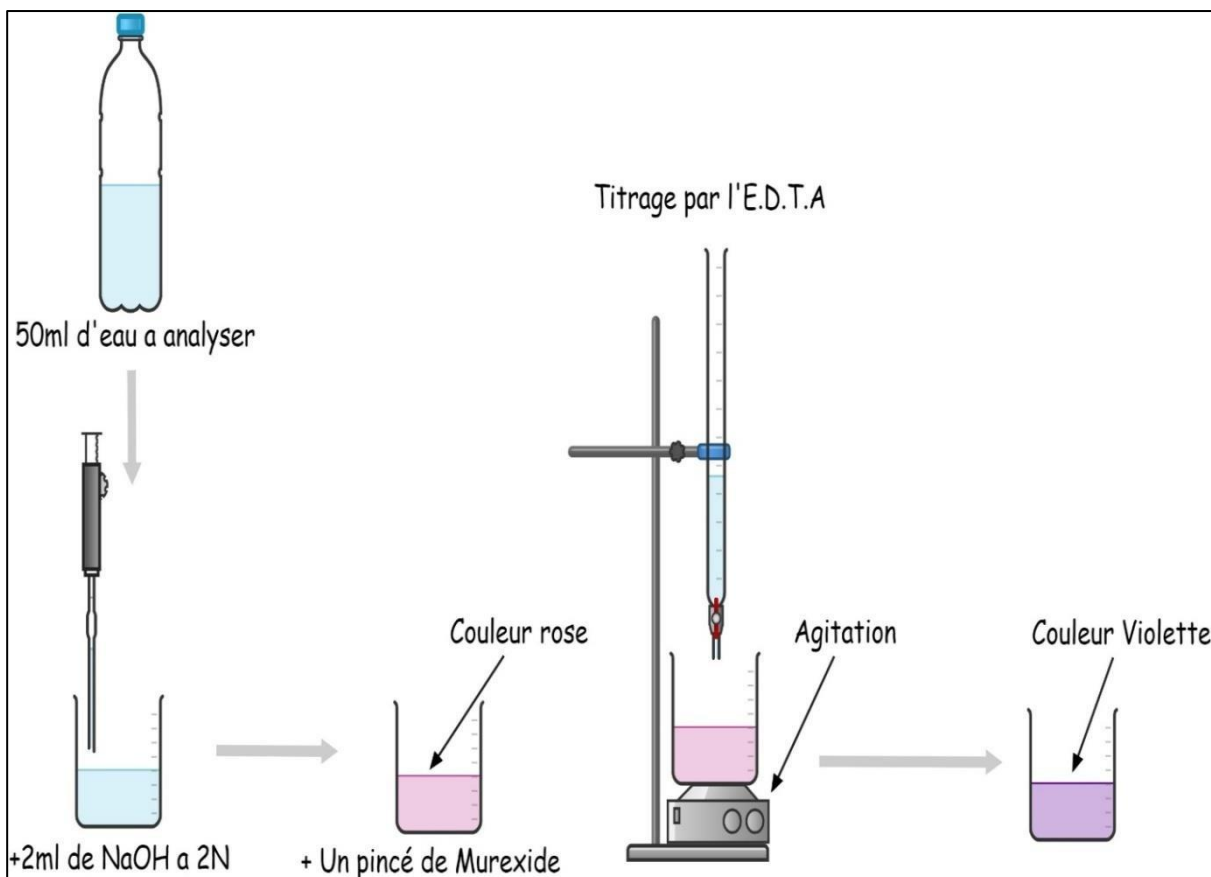


Figure 2 : Dosage de Calcium (Ca^{2+}) (Saihi, 2024)

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).

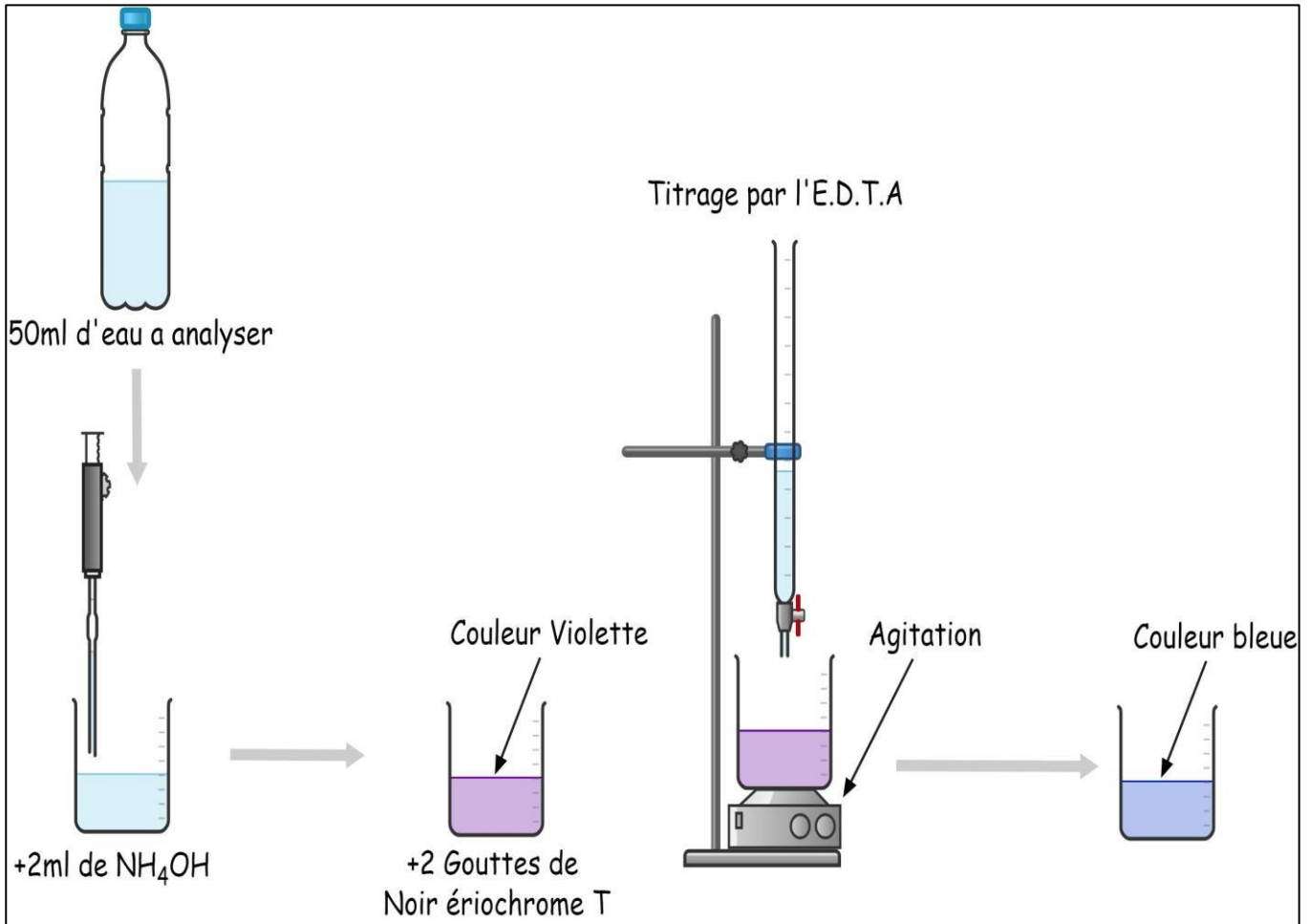


Figure 3 : Dosage de Magnésium (Mg^{2+}) (Saihi, 2024)

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

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

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)

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

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

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).

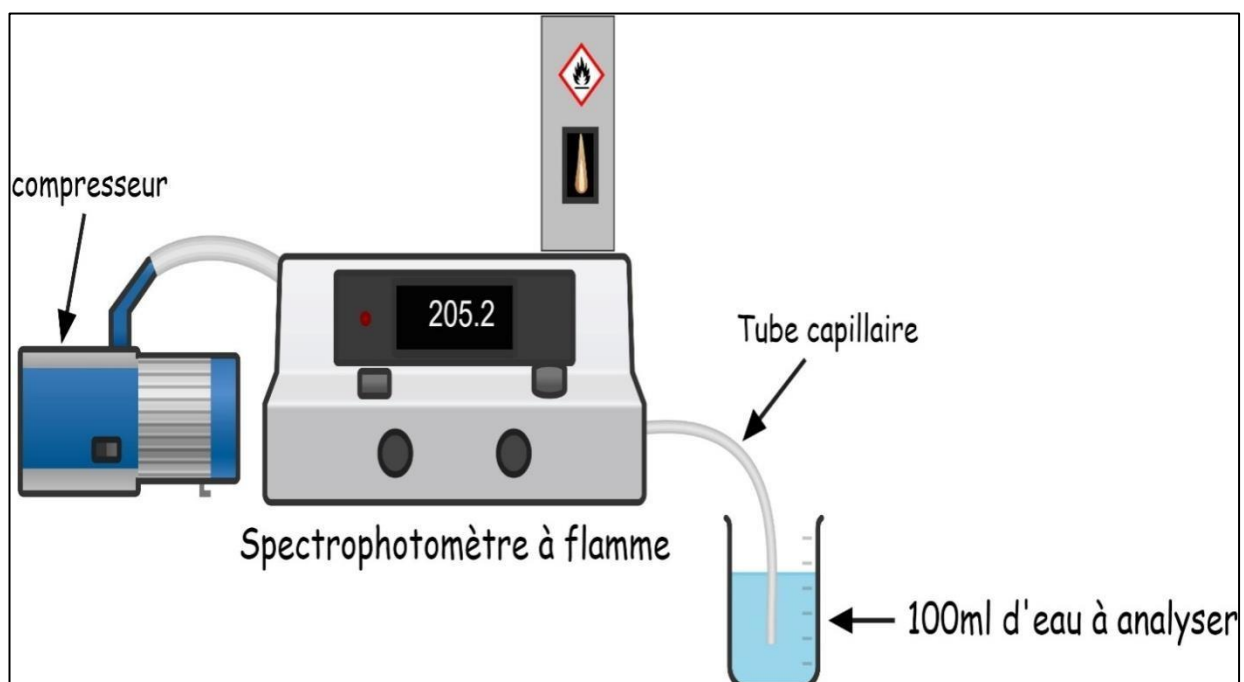


Figure 4 : Dosage de Sodium (Na^+) et Potassium (K^+) (Saihi, 2024)

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, AgNO_3 (0,01N).

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).

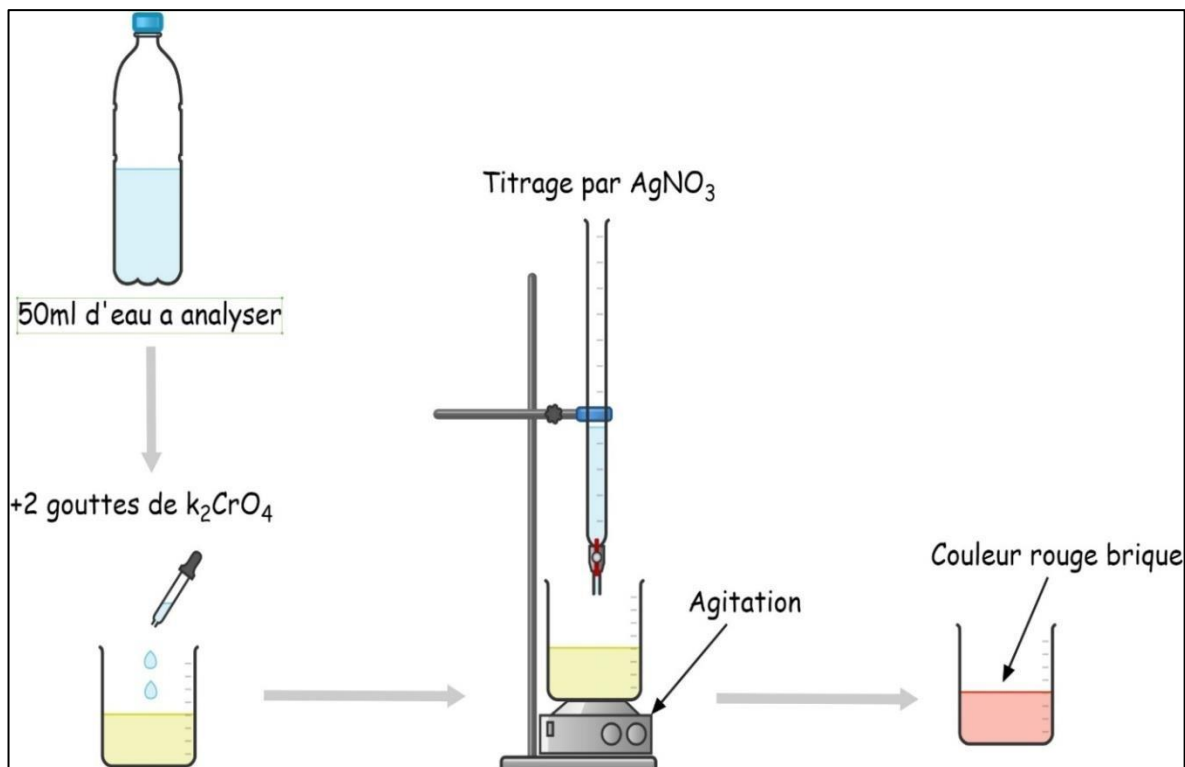


Figure 5 : Dosage de chlorures (Cl^-) (Saihi, 2024)

Expression des résultats :

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

Où :

$V(AgNO_3)$: Chute de la burette (ml).

$N(AgNO_3)$: Normalité de $AgNO_3$ ($N=0.01$).

MCl : Masse équivalente de Cl^- (mg/l).

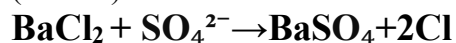
F : Facteur de correction ($F=0.83$).

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

1.6 Dosage des sulfates (SO_4^{2-})

Principe :

Pour doser les sulfates dans une solution, une méthode courante est l'utilisation d'une solution de chlorure de baryum ($BaCl_2$) pour précipiter les ions sulfate sous forme de sulfate de baryum ($BaSO_4$).



Réactifs :

Solution stabilisante, (100mL d'eau distillé + 60ml HCl pur + 200 mL éthanol + 150g chlorure de sodium + 100 mL 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 sue le spectrophotomètre, l'absorbance à la longueur d'onde $\lambda=420$ nm.(Figure n°6).

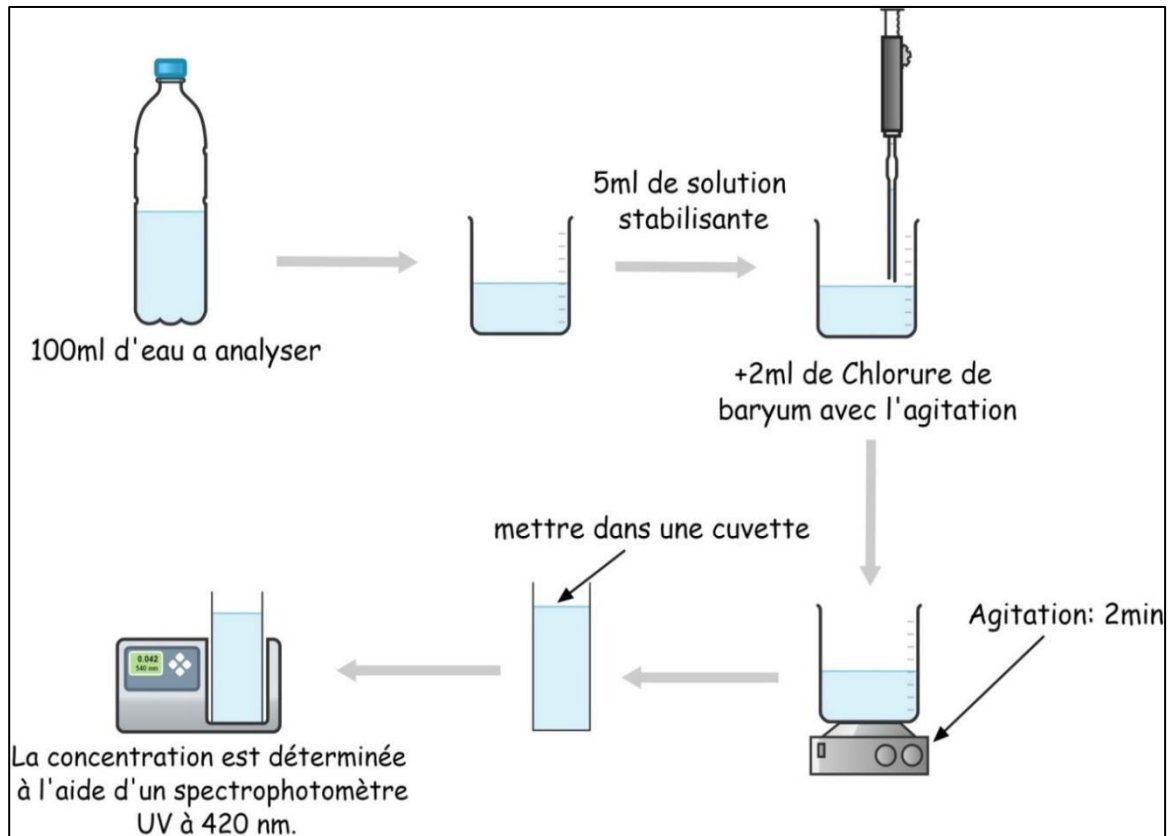


Figure 6 : Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) (Saihi, 2024)

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 paranitrosnylate 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

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 :

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).

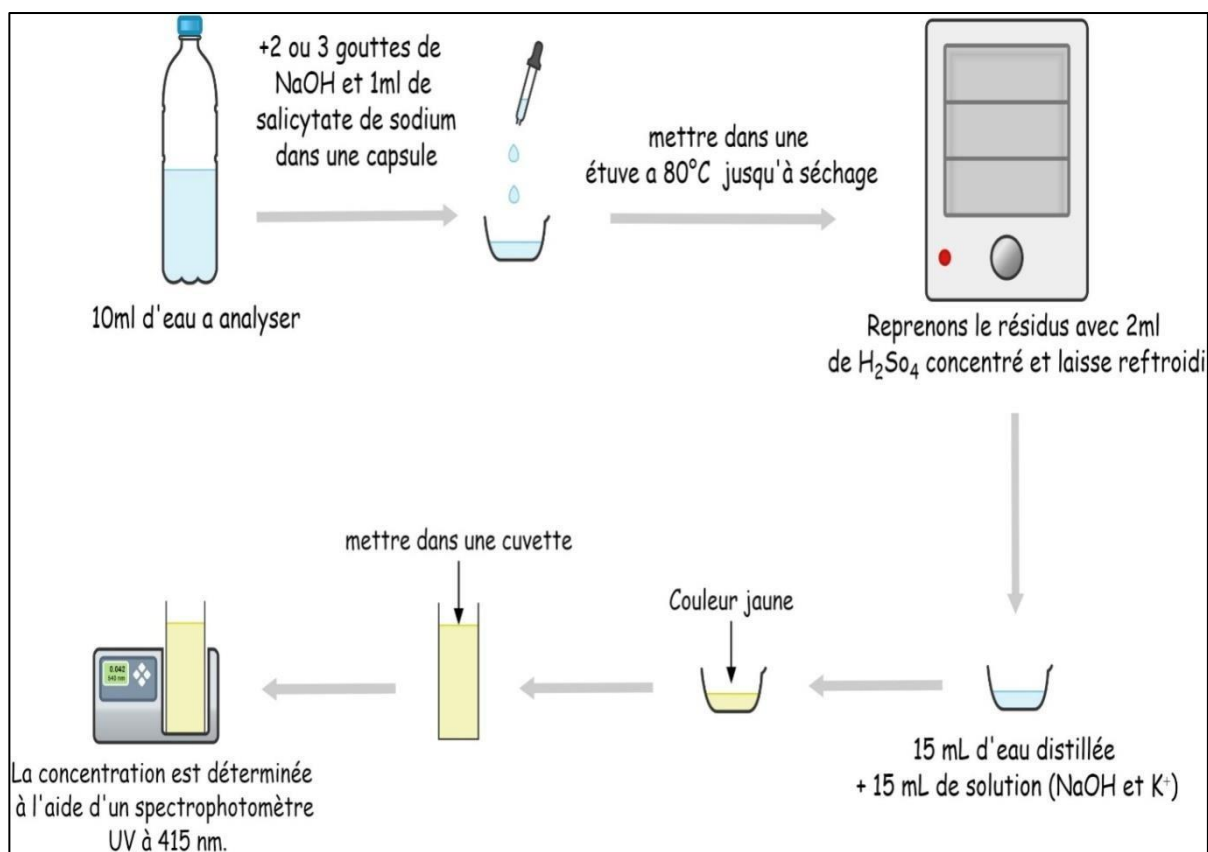


Figure 7 : Dosage des nitrates (NO_3^-) (Saihi, 2024)

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-1,2 éthane donne un complexe coloré pourpre susceptible d'un 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 (NO₂) 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 :

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).

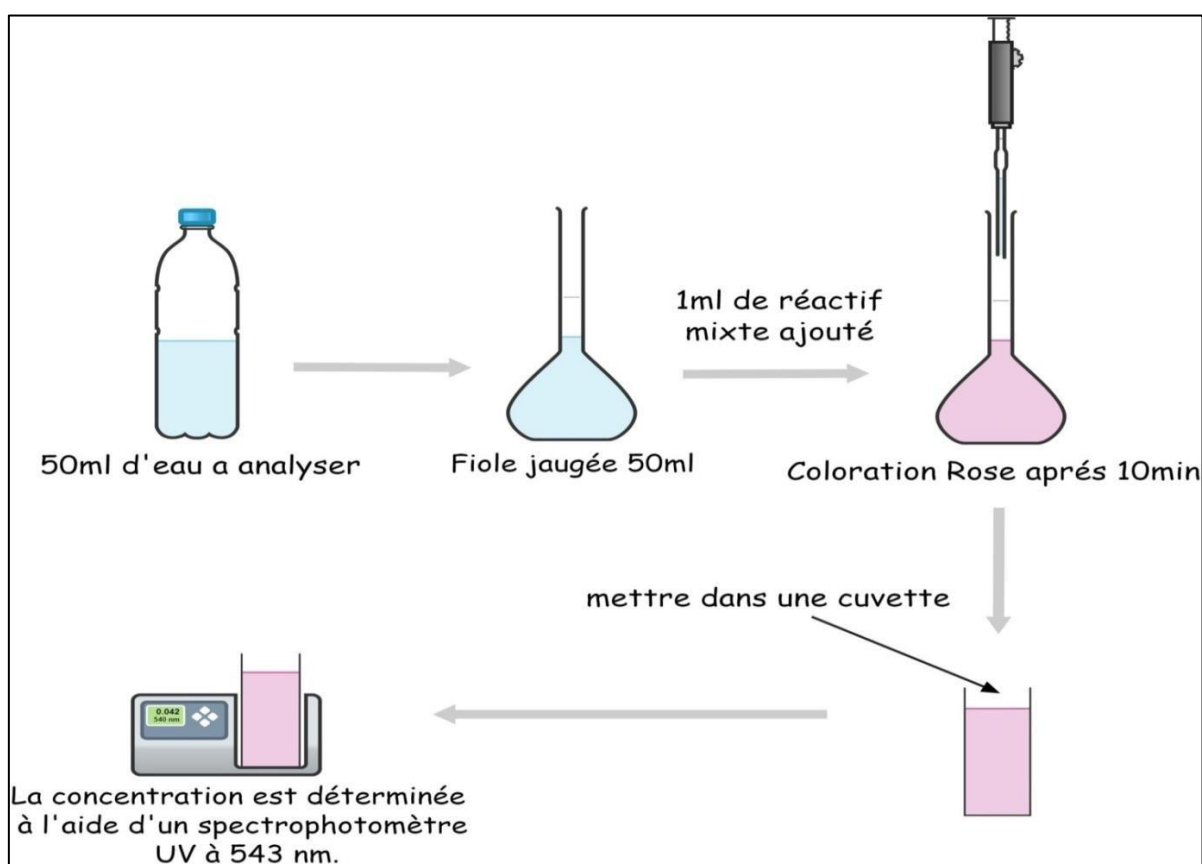


Figure °8 : Dosage des nitrites (NO₂⁻) (Saihi, 2024)

Expression des résultats :

Pour une prise d’essai de 50 mL, la courbe donne directement la teneur en azote nitreux (NO₂), 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_2O 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_2O 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 H_2O distillée et attendre 1h. 30

L'apparition de la coloration verdâtre indique la présence de : NH_4^+ Effectuer la lecture à 655 nm (Figure 9).

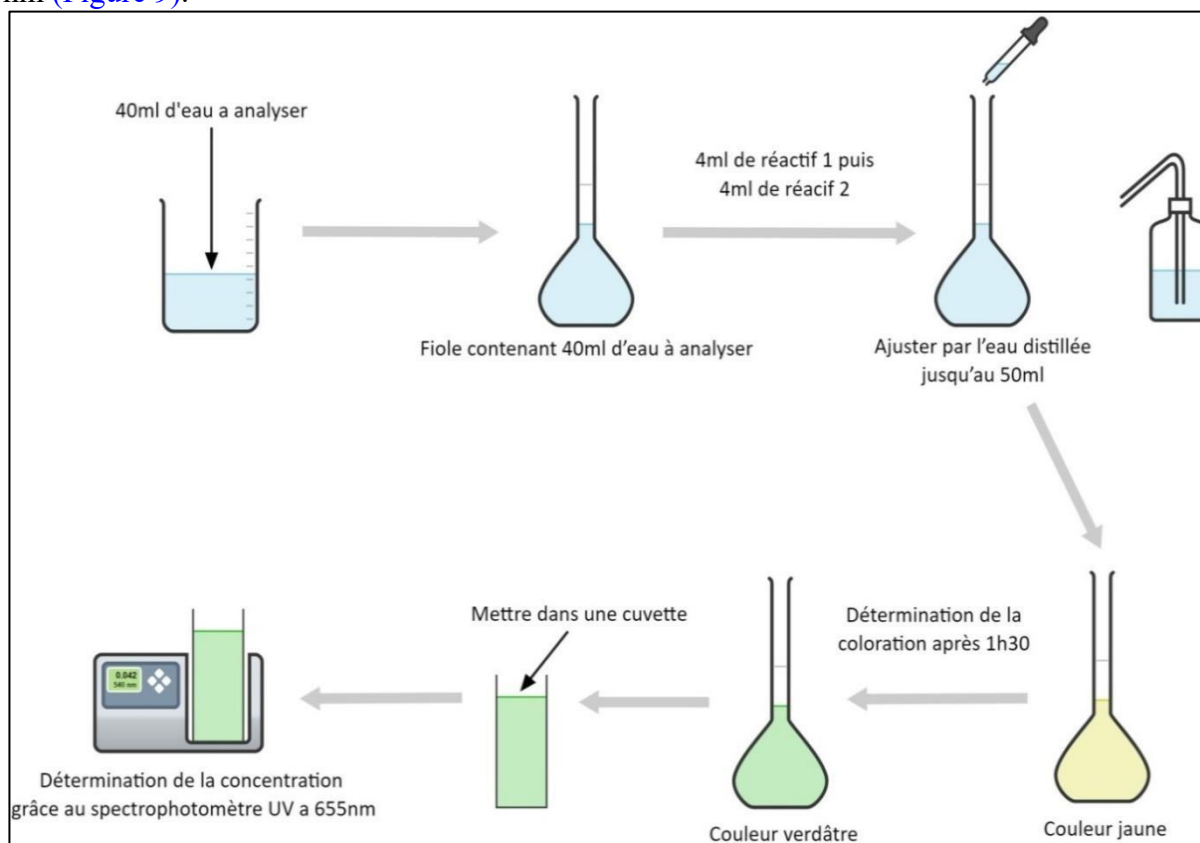


Figure 09 : Dosage de l'ammonium (NH_4^+) (Saihi, 2024)

Expression des résultats :

Le résultat est donné directement en mg/l

1.10 Dosage des phosphate (PO_4^{3-})

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 PO_4^{3-}

Solution fille à 2 mg/l PO_4^{3-}

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

N° Fiole	0	1	2	3	4	5
fille 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 n°10).

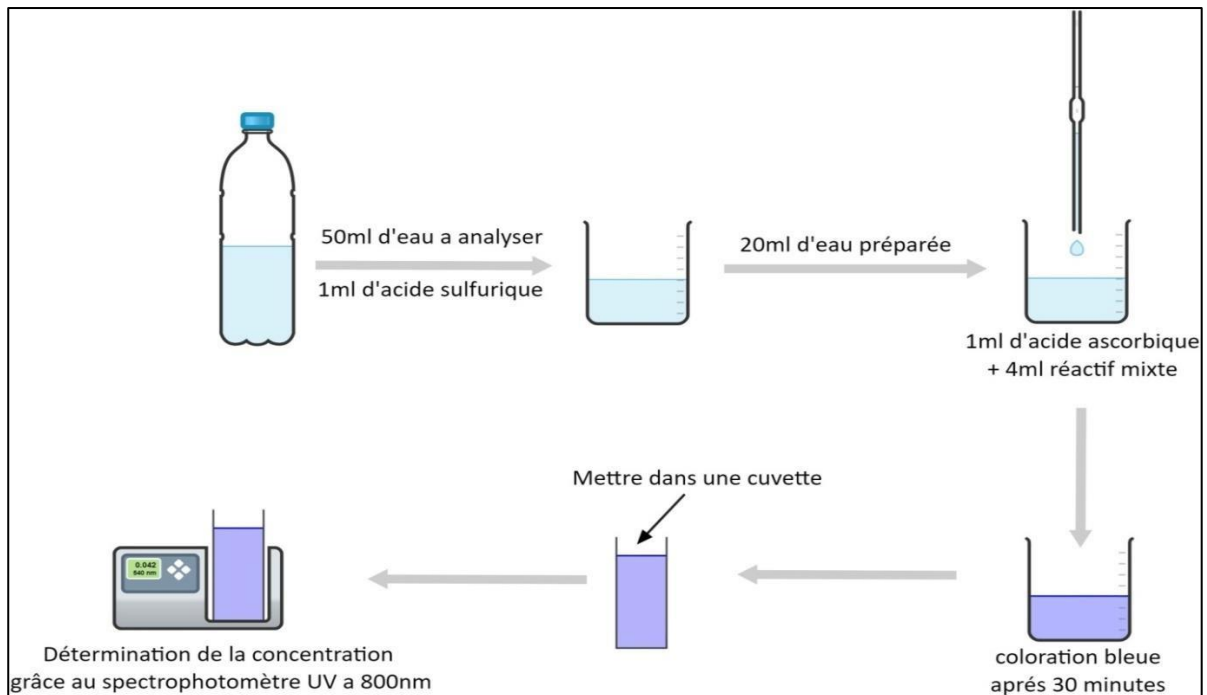


Figure 10 : Dosage des phosphate (PO_4^{3-}) (Saihi, 2024)

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'Ain-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.

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.

Saihi, A.I. (2024). Etude 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. Université de Djelfa, 173 p.

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