

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Sciences Biologiques

Option: Ecotoxicologie Animale

Intitulé

Qualité des eaux d'Oued El Rhezal (Commune d'Aïn Kechra, wilaya de Skikda)

Présenté Par:

Bousselsal Hanine Berbadj Hanida
Bouafia Boutayna Lamda Rahma

Membres de Jury

Dr. Boudeffa Khaled	MCA	Président	Université 20 août 1955- Skikda
Dr. Kahit Z.	MCB	Examinatrice	Université 20 août 1955- Skikda
Pr. Fekrache Fadila	Pr.	Encadreur	Université 20 août 1955- Skikda

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Tout d'abord, nous louons Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la patience, la force et la détermination nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à ma directrice de recherche, Madame Dr. Fekrach Fadhila, qui a été un véritable soutien et une guide précieuse tout au long de ce projet. Madame, vous avez été un exemple d'exigence scientifique et de bienveillance humaine, et vous nous avez accompagnés même dans les moments les plus difficiles. Que Dieu vous récompense pour tout ce que vous avez apporté.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer ce mémoire et d'y apporter leurs remarques enrichissantes.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes chers parents et à mes frères, pour leur soutien constant et leurs encouragements durant les moments éprouvants. Une pensée particulière également pour mes amis proches, qui ont été d'un précieux réconfort tout au long de cette aventure.

Je remercie enfin toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Pour conclure, j'adresse mes plus sincères remerciements à l'ensemble des enseignants et formatrices du département de biologie, pour leur accompagnement et leurs efforts depuis nos premières années d'étude jusqu'à la fin de ce parcours universitaire.

Dédicace

Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Je dédie ce travail

à ma mère, la source de tendresse et la lumière qui guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite, pour tous ses sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon père que je le remercie énormément pour ses efforts, ses conseils et sa surveillance.

À mes chers frère et sœurs:

À tout ce que je connais sans exceptions.

À tous mes enseignants sans exception

Enfin, j'offre mes bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail

Dédicace

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

Louange à Dieu pour Ses bienfaits innombrables et Son soutien tout au long de ce parcours.

À mes chers parents, Ma source d'amour, de soutien et de motivation. Merci pour vos prières, vos encouragements, vos sacrifices et votre présence inestimable. Cette réussite vous est dédiée.

À mes enseignants et encadreurs, Je vous remercie sincèrement pour votre disponibilité, vos conseils avisés et votre accompagnement tout au long de ce mémoire.

À toutes les personnes qui m'ont soutenue, de près ou de loin, par un mot, un geste, un sourire ou une pensée...

Je vous suis profondément reconnaissante.

Enfin, à ceux qui ont cru en moi quand je doutais, Merci du fond du cœur

Dédicace :

A ceux qui ont quitté cette vie, mais jamais quitté mon cœur ma mère et mon père.

Sans vos prières et votre présence dans mon cœur, je ne serais jamais arrivé jusqu'ici.

*Que dieu accorde sa miséricorde à la hauteur de mon amour pour vous, et fasse de cette
réussite une lumière dans vos tombes.*

A mes frères : Abed Salam ; Hamza et Boubakr, et mes sœurs : Souhaila et ses filles

Kounouz Ayat EL Rahma et Nadjah, a Nour est ses enfants Arwa Serin, Wassim et

Abed El Hai, a Khadija ; wahida et mon cœur Basma.

Lamda Rahma

Dédicace :

Au nom de Dieu, par Sa grâce les bonnes œuvres s'accomplissent, et par Sa louange, les réussites se réalisent et s'achèvent.

À ceux dont les prières ont été une lumière sur mon chemin et un soutien dans mes moments de faiblesse...

À ma mère Wahiba et à mon père Ourid,

Vous qui avez cultivé en moi l'amour de l'ambition, et m'avez appris que placer sa confiance en Dieu est le commencement de toute réussite,

Je vous dédie ce diplôme en témoignage de loyauté et d'amour, avec une reconnaissance que les mots ne peuvent exprimer.

À tous ceux qui m'ont soutenu par une parole, un sourire ou une prière dans le silence...

À mes frères et sœurs qui ont cru en moi, même lorsque j'ai douté de moi-même,

Vous avez été la lumière dans l'obscurité de mon chemin. Qu'Allah vous récompense pour tout le bien.

Et Merci pour ta patience et ton combat sur une route qui n'a pas été facile,

Merci pour tes larmes silencieuses et tes nuits blanches à poursuivre le savoir,

Je demande à Dieu que ce diplôme soit un commencement de bénédictions, et l'ouverture vers un avenir meilleur.

Ô mon Dieu, tout comme Tu m'as accordé cette réussite,

Fais-en une source de joie pour ceux que j'aime, et fais de mon savoir un moyen d'être utile à Ta création, et une voie vers Ta satisfaction. t à moi-même...

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la qualité des eaux de l'Oued El Ghezal, situé dans la région de Boudoukha (commune de Aïn Kechra), à travers l'analyse d'un ensemble de paramètres physico-chimiques, dans le but d'évaluer leur aptitude à différents usages et de mettre en évidence les effets des facteurs naturels et anthropiques sur cette ressource hydrique. L'étude a porté sur plusieurs paramètres physiques tels que la dureté, la couleur, le pH, la conductivité électrique, dureté et des paramètres chimiques tels que : l'oxygène dissous, la dureté totale, la concentration en ions : calcium, magnésium, chlorures, nitrates et nitrite. Les échantillons ont été prélevés à différentes périodes et analysés selon une méthodologie scientifique rigoureuse. Les résultats ont révélé des variations dans la qualité de l'eau, influencées par des facteurs naturels et l'activité humaine locale.

En conclusion, l'étude recommande le renforcement du suivi régulier de la qualité des eaux de l'oued, ainsi que la mise en œuvre de mesures préventives pour sa protection, dans le cadre d'une approche environnementale scientifique intégrée, visant à préserver les ressources hydriques et à assurer leur exploitation rationnelle.

Mots clés: l'Oued El Ghezal, Skikda, physicochimiques, eaux

Abstract

This thesis focuses on the study of the water quality of the Ghezal wadi, located in the Boudoukha region (commune of Aïn Kechra), through the analysis of a set of physicochemical parameters, with the aim of assessing their suitability for different uses and highlighting the effects of natural and anthropogenic factors on this water resource. The study focused on several physical parameters such as turbidity, color, pH, electrical conductivity, and chemical parameters such as dissolved oxygen, total hardness, and ion concentration: calcium, magnesium, sodium, potassium, chlorides, and nitrates. Samples were taken at different times and analyzed using a rigorous scientific methodology. The results revealed variations in water quality influenced by natural factors and local human activity. In conclusion, the study recommends strengthening regular monitoring of the wadi's water quality, as well as implementing preventive measures for its protection, as part of an integrated scientific environmental approach, aimed at preserving water resources and ensuring their rational exploitation.

Keywords: Oued El Ghezal, Skikda, physicochemical, waters

المخلص

تركز هذه الرسالة على دراسة جودة مياه وادي غزال، الواقع في منطقة بودوخة (بلدية عين قشرة)، من خلال تحليل مجموعة من المعايير الفيزيائية والكيميائية، بهدف تقييم مدى ملاءمتها للاستخدامات المختلفة وتسلط الضوء على آثار العوامل الطبيعية والبشرية على هذا المورد المائي. ركزت الدراسة على العديد من المعايير الفيزيائية مثل العكارة واللون ودرجة الحموضة والتوصيل الكهربائي. والمعايير الكيميائية مثل الأكسجين المذاب والصلابة الكلية وتركيز أيونات الكالسيوم والمغنيسيوم والصوديوم والبوتاسيوم والكلوريدات والنترات. تم أخذ العينات في فترات زمنية مختلفة وتحليلها وفقاً لمنهجية علمية دقيقة. كشفت النتائج عن اختلافات في جودة المياه، متأثرة بالعوامل الطبيعية والنشاط البشري المحلي وفي الختام توصي الدراسة بتعزيز المراقبة الدورية لجودة مياه الوادي، وتنفيذ التدابير الوقائية لحمايتها، في إطار مقارنة بيئية علمية متكاملة، تهدف إلى الحفاظ على الموارد المائية وضمان استغلالها الرشيد .

الكلمات المفتاحية: وادي الغزال، سكيكدة، فيزيائية، مياه

Liste des abréviations

pH : potentiel d'hydrogène

CE : Conductivité Electrique

TDS : total des solides dessous

TH : Titre Hydrotimétrique (dureté totale)

Ca⁺² : Calcium

Mg⁺² : Magnésium

O₂ : oxygène dessous

NO₂⁻ : Nitrite

NO₃⁻: Nitrate

Cl⁻: Chlore

DCO : Demande Chimique en Oxygène

Fe totale : Fer

TAC: Titre Alcalimétrique Complet

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de La zone d'étude.....	8
Figure 2. Localisation des stations de prélèvement.....	9
Figure 3. pH-mètre.....	10
Figure 4. Spectrophotomètre UV.....	13
Figure 5. L'analyseur de la demande chimique en oxygène	15
Figure 6. Spectrophotomètre de type DR 6000	16
Figure 7. Statistique descriptive des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal (Moy moyenne, CV coefficient de variation, Min= minimum et Max= maximum)	18
Figure 8. Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal	19
Figure 9. Tracés de réseau entre les paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal	21
Figure 10. L'Analyse en Composante Principale des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal	22

Liste des tableaux

Tableau 1. Classes de turbidité usuelles (NTU)	3
Tableau 2. Statistique descriptive des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal (Moy moyenne, CV= coefficient de variation, Min= minimum et Max= maximum)	17

Sommaire

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I : Qualité des eaux

1. Qualité organoleptiques des eaux.....	3
1.1 La couleur.....	3
1.2 L'odeur.....	3
1.3 Goût et saveur.....	3
1.4 Turbidité.....	3
2. Qualité physico-chimiques des eaux	4
2.1 Les matières en suspension	4
2.2 La conductivité électrique (CE)	4
2.3 Le potentiel d'hydrogène (pH)	4
2.4 L'oxygène dissous	4
2.5 Magnésium (Mg^{+2})	4
2.6 Le Calcium (Ca^{+2})	5
2.7 Le taux de sels dissous (TDS)	5
2.8 La dureté.....	5
2.9 Nitrate et nitrite (NO_3^- et NO_2^-)	5
2.10 Demande Chimique en Oxygène (DCO)	5
2.11 Chlorures (Cl^-)	5
2.12 Titre alcalimétrique complet (TAC)	5
2.13 Fer (Fe)	5
3. Pollution des eaux	6
3.1 Définition Pollution des eaux.....	6
3.2 Les sources de pollution des eaux	6
3.3 Types de la pollution des eaux	6
3.3.1 Classification selon l'origine des polluants	6
3.3.1.1 Pollution d'origine domestique.....	6
3.3.1.2 Pollution d'origine agricole	6
3.3.1.3 Pollution d'origine industrielle	6
3.3.2 Classification selon la nature des polluants.....	7
3.3.2.1 Pollution de nature physique	7
3.3.2.2 Pollution de nature chimique.....	7
3.3.2.3 Pollution de nature biologique	7

Chapitre II: Matériel et Méthodes

1. La zone d'étude	8
--------------------------	---

2.	Echantillonnage et technique de prélèvement	9
3.	Méthode d'analyse d'eau.....	9
3.1.	Potentiel d'Hydrogène (pH)	9
3.2.	La conductivité électrique (CE)	9
3.3.	Total des solides dissous (TDS)	10
3.4.	Dureté totale (TH)	10
3.5.	Calcium et Magnésium.....	10
3.6.	L'oxygène dissous.....	11
3.7.	Nitrates (NO ₃ ⁻)	11
3.8.	Nitrite (NO ₂ ⁻)	12
3.9.	Chlorure (Cl ⁻)	12
3.10.	La Demande Chimique en Oxygène (DCO)	13
3.11.	Fer totale.....	14
3.12.	Titre alcalimétrique complet (TAC)	15

Chapitre III: Résultats et discussion

1.	Statistique descriptive	16
2.	Corrélation.....	18
2.1.	La matrice de corrélation.....	18
2.2.	Tracés de réseau	20
3.	L'Analyse en Composante Principale (ACP)	21
	Conclusion.....	23
	Références bibliographiques	24



Introduction

Introduction

L'expansion démographique et l'essor économique que connaissent les pays du monde sans occulter ceux de l'Afrique ont des conséquences sur l'environnement et sur les plans d'eau. Ainsi, les ressources sont soumises à une forte pression exercée par l'activité anthropique (agriculture, industrie, élevage, pêche, domestique, hôpitaux, etc.). Les activités anthropiques à caractère socio-économique couplées à celles des processus naturels (érosion des sols, précipitation, évaporation, ruissellement des caux fluviales) accélèrent la dégradation des ressources en eau de surface (Aw *et al.*, 2011).

Elles provoquent des perturbations de l'équilibre naturel et accroissent la charge organique de l'eau et des sédiments, puis l'encombrement des ressources en eau, avec des problèmes d'eutrophisation, l'asphyxie de l'environnement aquatique ainsi que les problèmes sanitaires des populations (Ado *et al.*, 2000).

Depuis plus d'une décennie d'année, les eaux de surface (fleuve, lac, étang, mer, rivière, lagune), sont exploitées pour l'arrosage des produits maraîchers et agricoles. Ainsi, l'eau source de vie, peut devenir un danger pour l'environnement et pour les utilisateurs si elle n'est pas de qualité acceptable (Agassounon Tchibozo *et al.*, 2012).

La qualité de l'eau d'une zone géographique donnée dépend de ses caractéristiques physiques et chimiques, qui jouent un rôle crucial dans l'évaluation et le suivi de son aptitude à des usages spécifiques. Lorsque les valeurs de ces paramètres dépassent les seuils autorisés, cela peut constituer une menace pour l'environnement et la santé humaine (Pulak et Patra, 2020). La qualité de l'eau en Algérie a été considérablement altérée ces dernières années en raison de la croissance démographique, passée de 11 millions en 1960 à près de 40 millions d'habitants en 2015, et également en raison de l'expansion industrielle (Benkaddour *et al.*, 2019). En Algérie, de nombreuses études sur la détérioration de la qualité de l'eau dans certaines régions ont montré un enrichissement de l'eau en composants chimiques et organiques ainsi qu'en nutriments d'origine anthropique (Saadali *et al.*, 2022 ; Saadali *et al.*, 2019; Hallouz *et al.*, 2022; Yebdri *et al.*, 2021 ; Reggam *et al.*, 2017).

Dans notre zone d'étude, Boudoukha, les eaux de surface représentent l'une des principales ressources hydriques sur lesquelles la population locale s'appuie fortement. Elles sont utilisées comme source essentielle pour satisfaire les besoins domestiques ainsi que pour l'irrigation, notamment dans le cadre de l'agriculture traditionnelle. Parmi ces ressources de surface, l'Oued El Rhezal se distingue en tant que cours d'eau naturel situé dans la région de Boudoukha, relevant de la commune de Aïn Kechra, dans la wilaya de Skikda. Cet oued constitue une composante essentielle de l'environnement naturel local, contribuant à la préservation de la biodiversité de la région et jouant un rôle vital dans la vie quotidienne des habitants.

L'objectif de ce travail est l'étude de la qualité des eaux d'Oued El Rhezal Par la mesure des paramètres physiques et chimiques. À cet effet, nous avons effectué 10 stations de mesure et de contrôle de la qualité physiques et chimiques.

Introduction

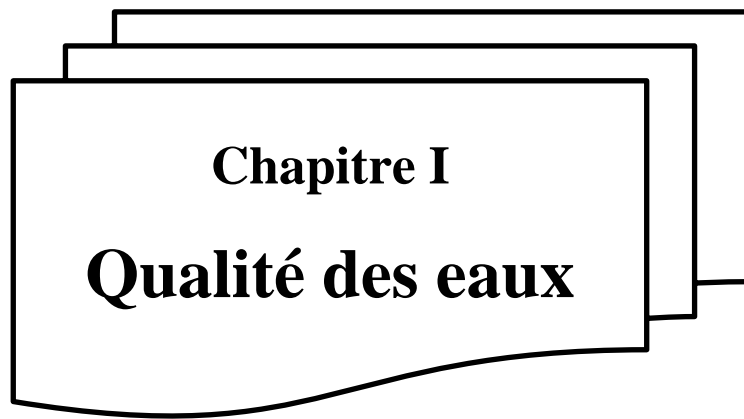
Le mémoire sera subdivisé en trois chapitres précédés par une introduction qui décrit l'origine du sujet, les objectifs visés et l'approche méthodologique utilisée pour atteindre l'objectif.

Le premier chapitre du mémoire présente une recherche bibliographique sur la qualité des eaux.

Le deuxième sera consacré aux matériel et méthodes d'analyses.

Dans le dernier nous exposerons les résultats obtenus lors de la recherche ainsi la discussion

Enfin, le document sera finalisé par une conclusion.



Chapitre I
Qualité des eaux

1. Qualité organoleptiques des eaux

1.1 La couleur

La coloration de l'eau est dite « vraie » ou « vraie » lorsqu'elle résulte uniquement de substances dissoutes. On parle d'« apparent » lorsque la présence de matières en suspension ajoute une couleur supplémentaire.

Les couleurs réelles et apparentes sont presque identiques dans une eau claire et peu turbide (RODIER 2005). La couleur de l'eau est souvent considérée comme un indicateur de la présence de matière organique dissoute, de solides en suspension, de fer (III) précipité sous forme d'hydroxyde colloïdal, de fer (III) lié à des complexes organiques et de divers matériaux colloïdaux (Mizi Botta et al. 2001).

1.2. L'odeur

Les odeurs indiquent une contamination ou la présence de matière organique en décomposition. L'odeur est un ensemble de sensations ressenties par le nez lorsqu'il sent certaines substances volatiles. La qualité de cette sensation dépend de ces matériaux (Rodier. 2005)

1.3. Goût et saveur

Le goût est la somme des sensations gustatives, olfactives et chimiques que nous ressentons lorsqu'un liquide est dans la bouche. La saveur est l'ensemble des sensations que nous éprouvons après que des substances solubles ont stimulé les papilles gustatives (Rodier, 2005)

1.4. Turbidité

La turbidité est le degré de trouble de l'eau. Elle est causée par des matières en suspension telles que la boue, le sable, la matière organique, le plancton et les micro-organismes. Elle est également causée par des substances colloïdales organiques ou minérales. Une turbidité élevée empêche la lumière de pénétrer dans l'eau. La variabilité de la turbidité dépend des facteurs locaux et des conditions spécifiques. L'état des sols avant les chutes de pluies et le degré de cohésion des particules, la fréquence et l'intensité des pluies et l'arrivée d'une grande quantité de boue liée au rôle du ruissellement de surface et celle ramenée par les Oueds affluents et les effondrements locaux des berges en périodes de hautes eaux se qui augmente la turbidité des eaux (Garet et al, 2005).

Tableau 1. Classes de turbidité usuelles (NTU)

Classe	Turbidité	Observation
1	NTU<5	Eau claire
2	5<NTU<30	Eau clairement trouble
3	NTU<50	Eau trouble

2. Qualité physico-chimiques des eaux**2.1. Les matières en suspension**

Les matières en suspension (MES) comprennent toutes les particules minérales et/ou organiques présentes dans les eaux naturelles ou polluées. Elles peuvent être constituées de grains de sable, de terre et de sédiments arrachés par l'érosion, de débris divers apportés par les eaux usées ou pluviales, ces dernières étant particulièrement riches en MES, et d'organismes planctoniques (dont les algues). Elles correspondent à la concentration des éléments non dissous dans l'échantillon. L'abondance de matières en suspension dans l'eau réduit la luminosité et diminue la production biologique, notamment en raison de la diminution de l'oxygène dissous résultant de la réduction de la photosynthèse (Bouanani, 2005).

2.2. La Conductivité Electrique (CE)

L'eau pure présente une faible conductivité électrique en raison de la rareté des particules chargées électriquement (ions) aptes à se déplacer sous l'influence d'un champ électrique. L'unité de mesure de la conductivité est le micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La conductivité est un indicateur de la minéralisation globale de l'eau, et sa valeur est dépendante de la température. Elle est directement liée à la présence d'ions en solution, et augmente avec la température et la concentration en sels dissous (Bara, Y. 2016)

2.3. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH mesure la concentration des ions hydrogène dans l'eau. Le pH doit être mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre. Par définition, le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en H^+ .

PH-Log $[\text{H}^+]$. L'échelle de pH varie de 0 à 14 en fonction de la force ionique, si:

$[\text{H}^+] < [\text{OH}^-] = \text{pH} > 7$: l'eau est basique.

$[\text{H}^+] > [\text{OH}^-] = \text{pH} < 7$: l'eau est acide.

$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] \text{ pH} = 7$: l'eau est neutre. (DEBBIH H et al., 2015)

2.4. L'oxygène dissous

est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité de l'eau, servant d'indicateur clé. Il est particulièrement sensible à la pollution. Sa valeur nous informe sur le niveau de pollution et le potentiel d'auto-épuration du cours d'eau. (Kaboul M et Touhami M 2014).

2.5. Magnésium (Mg^{+2})

Le magnésium, un élément commun dans la nature, se trouve dans la plupart des eaux naturelles. Il influence la dureté de l'eau et joue un rôle crucial dans la croissance et la production hormonale (Savary., 2010).

2.6. Le Calcium (Ca^{+2})

Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potable et sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés (terrain calcaire ou gypseux) (Rodier et Al. 2009)

2.7. Le Taux de Sels Dissous (TDS)

Total des solide dissous sont par définition les sels minéraux, les matières organiques et d'autres dissoutes dans l'eau (US/EPA, 2001)

2.8. La dureté (Titre Hydrotimétrique)

La dureté de l'eau, ou Titre Hydrotimétrique (TH), est principalement causée par les ions calcium et magnésium. Cela permet de distinguer différents types de dureté (Bouridi *et al.*, 2017)

2.9. Nitrate et nitrite (NO_3^- , NO_2^-)

La contamination des sources d'eau potable par les nitrates et nitrites est fréquente en raison de leur stabilité environnementale. Ils contaminent facilement les cours d'eau et les nappes souterraines. La principale cause de cette contamination est l'utilisation intensive d'engrais chimiques en agriculture (Bouridi *et al.*, 2017)

2.10. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La DCO (Demande Chimique en Oxygène) est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toutes les matières organiques et les matières minérales contenues dans l'eau. (Baumont, 1997).

2.11. Chlorures (Cl^-)

Le chlorure est un anion inorganique important contenu dans la concentration variable dans l'eau naturelle, généralement sous forme de sel de sodium (NaCl) et Potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme indices de pollution. Ils sont influents À propos des animaux et des plantes aquatiques et de la croissance des plantes. (Hadeff *et al.*, 2017)

2.12. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Il correspond à la teneur en ions OH^- , et, pour des pH inférieurs, à 8.3, la teneur en ions OH^- est négligeable ($\text{TA}=0$), dans ce cas la mesure de TAC correspondant au dosage des bicarbonates seuls. (Hadeff *et al.*, 2017)

2.13. Fer (Fe)

Le fer dans les eaux de surface peut provenir du sol, mais est souvent issu du lessivage des sols et de la contamination minière ou métallurgique. Dans les eaux de surface aérées, le fer redevient ferrique et précipite sous forme d'hydroxyde de fer se combinant avec les solides en suspension. Dans les eaux souterraines réductrices, le fer existe sous forme de Fe^{2+} ferreux soluble. Le fer peut également être complexé, formant des complexes avec la silice d'origine minérale ou les acides humiques ou fulviques d'origine organique (Guermah *et al.*, 2017).

3. Pollution des eaux

3.1 Définition Pollution des eaux

La pollution de l'eau se définit comme une dégradation de la qualité de l'eau, consécutive à l'introduction d'éléments indésirables résultant de son utilisation. Ces éléments, d'origines diverses, englobent les rejets chimiques, les déchets industriels et les infiltrations provenant du sol. Il est indéniable que la problématique de la pollution aquatique constitue un enjeu majeur de la détérioration environnementale. (Chambet-Hezerdja, 2015).

3.2. Les sources de pollution des eaux

L'utilisation intensive d'engrais et de pesticides en agriculture, ainsi qu'aux rejets d'eaux usées domestiques et industrielles, affectant la qualité des eaux de surface et souterraines. Le transfert de ces polluants se produit par infiltration ou drainage des eaux pluviales (Madi Bamdou, 2010).

3.3. Types de la pollution des eaux

Il existe de nombreux types de pollution susceptible de provoquer des perturbations dans la biocénose. Elles peuvent être classées soit selon la nature des polluants soit selon l'origine des polluants.

3. 3.1. Classification selon l'origine des polluants

3. 3.1.1. Pollution d'origine domestique

La pollution domestique, inhérente à la vie des ménages, a toujours existé. Dans les zones rurales, les déchets ménagers et les déjections animales étaient des sources de pollution. Actuellement, cette pollution prend une autre forme : les eaux usées des éviers, salles de bain et toilettes, canalisées par les égouts et rejetées dans l'environnement, contribuent à la pollution (Djilani, 2006).

3.3.1.2. Pollution d'origine agricole

L'agriculture est la principale cause de pollution diffuse des ressources en eau. Les pollutions d'origine agricole incluent celles liées aux cultures et à l'élevage. Les activités agricoles contribuent fortement aux apports d'azote, notamment ses dérivés (nitrates et nitrites), présents en forte concentration dans les engrais, les lisiers et les purins d'élevage. Les pesticides utilisés pour les cultures sont également une source de dégradation des ressources en eau (Gros, 1998).

3.3.1.3. Pollution d'origine industrielle

Pollution industrielle est très diversifiée, contrairement à la pollution domestique qui est relativement constante.

Selon le type d'industrie, on distingue différentes matières polluantes :

- Matières organiques et graisses (abattoirs, industrie agroalimentaire...)
- Hydrocarbures (industries pétrolières, transports)
- Métaux (traitements de surface, métallurgie)
- Acides, bases, produits chimiques divers (industries chimiques, tanneries...)

- Eaux chaudes (circuits de refroidissement des centrales thermiques)
- Matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs) (Gros, 1998; Valiron et Tabuchi, 1992).

3.3.2. Classification selon la nature des polluants

3.3.2.1. Pollution de nature physique

Pollution thermique Selon Pesson 1980 cette pollution est due aux rejets d'eaux chaudes, provenant des systèmes de refroidissement des centrales électriques classiques ou nucléaires. Le réchauffement des eaux conduit à une baisse sensible de la teneur en oxygène dissous et aussi il exacerbe la toxicité de certaines substances.

3.3.2.2. Pollution de nature chimique

Actuellement, la grande majorité des nuisances sont causées par ce type de rejet, cette pollution est due au déversement des rejets industriels apportant de grandes quantités de substances chimiques dont certaines sont non dégradables (Ficher, 1999).

3.3.2.3. Pollution de nature biologique

Ce type s'agit de la pollution organique par les micro-organismes (bactéries, virus, parasites, champignons...etc.), leur présence dans l'eau indique la présence d'une pollution d'origine organique (Rodier, 2005)



Chapitre II

Matériel et méthodes

1. La zone d'étude

Oued el Rhezal, situé à Boudoukha (commune d'Aïn Kechra, wilaya de Skikda, coordonnées approximatives 36°49'N, 6°42'E, serpente dans un bassin versant encaissé entre les collines calcaires des monts de Collo et les plaines agricoles d'Aïn Kechra. Cet oued méditerranéen à régime temporaire connaît des contrastes hydrologiques marqués, son lit, quasi asséché en été, se transforme en torrent lors des crues hivernales (débits >50 m³/s), alimentant l'agriculture locale et les nappes phréatiques. Sa ripisylve mêle peupliers, saules et lauriers roses aux berges, tandis que genêts et romarin colonisent les zones arides. Malheureusement, l'oued subit une pollution multifactorielle: rejets d'eaux usées domestiques non traitées, accumulation de déchets plastiques, et lessivage de pesticides agricoles, et de métaux lourds (plomb, zinc) issus des zones minières avoisinantes. Ces pressions, aggravées par la sécheresse chronique et l'érosion des berges, provoquent un déclin écologique (disparition d'espèces comme les écrevisses) et sanitaires (risques bactériens). Malgré son rôle vital pour l'irrigation de plus 300 hectares, l'absence de station d'épuration et de protection coordonnée menace sa pérennité, symbolisant les défis des cours d'eau ruraux algériens.

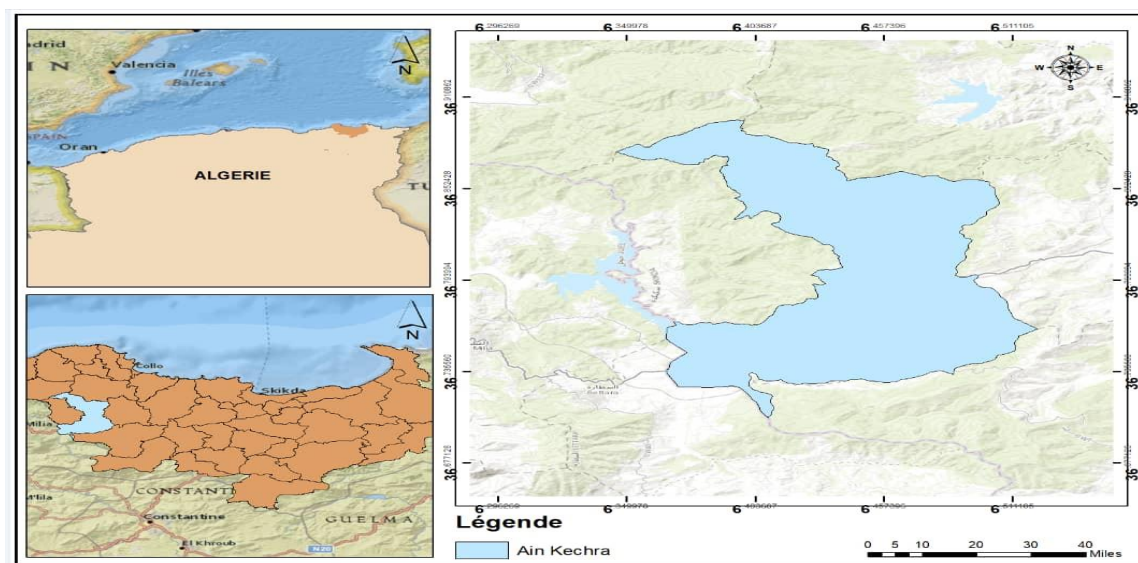


Figure 1. Situation géographique de La zone d'étude

2. Echantillonnage et technique de prélèvement

Notre étude vise à caractériser les eaux de surface autour de la mine abandonnée de Boudoukha. Nous avons effectué 10 prélèvements d'eau pendant une période pluvieuse pour maximiser la détection des contaminants. Cette approche permet d'évaluer l'impact environnemental des résidus miniers, en analysant divers paramètres chimiques et physiques des échantillons recueillis. Pour effectuer l'échantillonnage de l'eau, nous avons utilisé des bouteilles jetables en plastique de 1,5 L. Les flacons ont été débouchés au moment de la collecte, puis lavés et remplis avec l'eau du site

d'échantillonnage. Une fois remplis, les flacons ont été rebouchés, étiquetés et conservés à 4°C dans des glacières. Les échantillons ont été transportés au laboratoire.

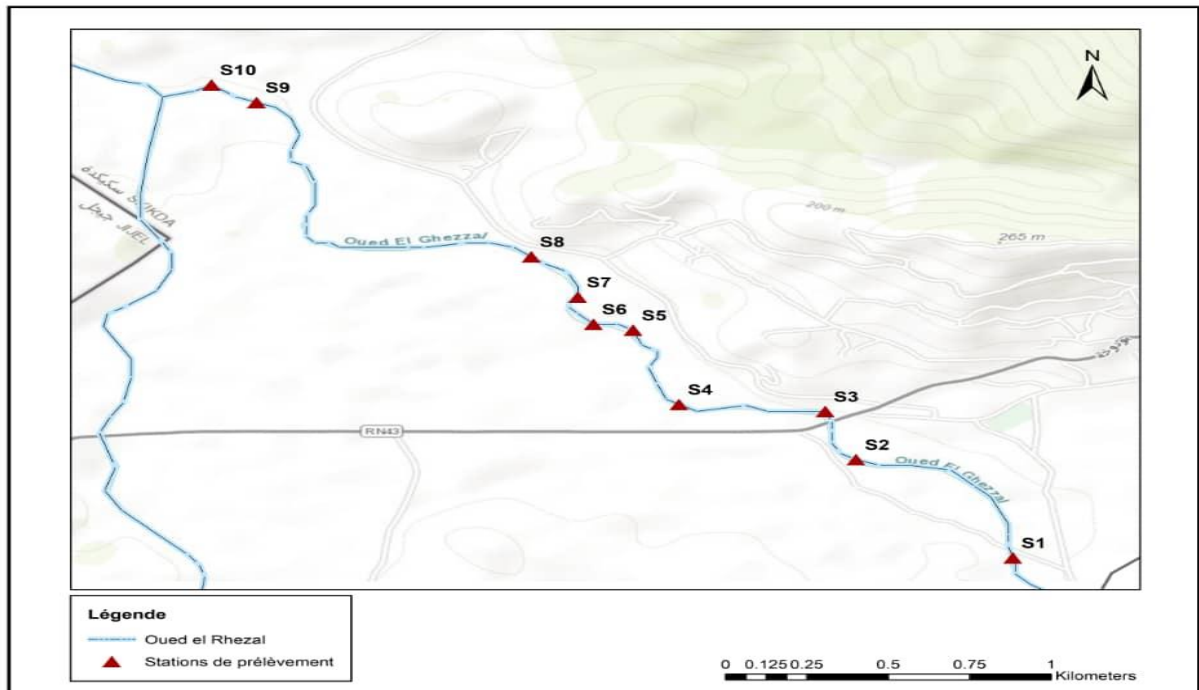


Figure 2. Localisation des stations de prélèvement

3. Méthode d'analyse d'eau

3.1. Potentiel d'Hydrogène (pH)

Détermination de la concentration des ions hydrogène dans l'eau. Le principe est basé sur la différence de potentiel de l'électrode immergée par rapport à une référence et à une température donnée (ASTM International, 2017).

Mode opératoire

- Laver soigneusement les électrodes avec l'eau distillée
- Immerger les électrodes dans l'échantillon agité.
- Effectuer la lecture du pH.



Figure 3. pH-mètre

3.2. La Conductivité Electrique (CE)

La conductivité électrique de l'eau, déterminée par le passage d'un courant entre des électrodes, reflète directement la concentration ionique de la solution. Cette mesure indirecte permet ainsi d'estimer la quantité de substances dissoutes, comme l'indique (Rodier, 2009).

Mode opératoire

- Allumer l'appareil en appuyant sur l'interrupteur servant la face de l'équipement.
- Laver soigneusement les électrodes de pH et conductivité avec de l'eau distillée.
- Mettre l'échantillon dans un bécher approprié sur l'agitateur magnétique.
- Allumer l'agitateur magnétique et réglé l'agitateur à une vitesse modérée.
- Immerger les électrodes de pH et conductivité dans l'échantillon sous agitation.
- Appuyer sur le Botton mesure.

3.3. Total des Solides Dissous (TDS)

La détermination potentiométrique des ions salins dans l'eau (Rodier, 2009).

Mode opératoire

- Mettre l'appareil sous tension.
- Allumer l'appareil en appuyant sur l'interrupteur se trouvant devant de l'équipement.
- Laver soigneusement les électrodes avec l'eau distillée.
- Immerger les électrodes dans l'échantillon agité.
- Sélectionner la range avec le bouton approprié.
- Lire la TDS sur l'échelle.
- Le résultat est exprimé en mg/L.

3.4. Dureté totale (TH)

L'analyse de la dureté totale (Titre Hydrotimétrique TH) est effectuée par titrage direct. On utilise le sel disodique de l'acide éthylène-diamine tétraacétique (EDTA) pour complexer les ions calcium et magnésium. La réaction se déroule en présence de l'indicateur Eriochrome noir T. Cet indicateur, en présence des ions Ca^{+2} et Mg^{+2} prend une couleur rouge cerise. Lorsque l'EDTA a suffisamment complexé tous ces ions, la solution vire au bleu (ASTM International, 2017).

Mode opératoire

- Prendre 100 ml d'échantillon dans une fiole de 300 ml.
- Ajouter 2 ml de la solution tampon.
- Ajouter une pince de l'indicateur noir d'urochrome (NET).
- En présence de la dureté la solution se colore en rouge cerise.
- Titrer avec l'EDTA à 0.01 M jusqu'au virage bleu de l'indicateur.
- Calcule: TH en mg /l de $\text{CaCO}_3 = V \times 10$

3.5. Calcium et Magnésium

L'analyse de Ca^{+2} repose sur l'utilisation du murexide (purpurate d'ammonium) comme indicateur colorimétrique. Cet indicateur, de couleur rose en présence d'ions Ca^{++} , vire au violet lorsque la quantité d'EDTA est suffisante pour complexer tous les ions calcium (ASTM International, 2017).

- **Mode opératoire**
- Prendre une prise d'essai de 100 cc d'échantillon dans un Erlenmeyer.
- Ajouter 2 cc de Noah 1N.
- Agiter et ajouter une pincée d'indicateur Murexide.
- En présence d'ions Ca^{+2} , la solution vire au rose foncé.
- Titrer avec l'EDTA 0.01 M jusqu'au virage de la solution au violet pâle ou Mauve clair et noter le volume EDTA (V)

Calcul :

Ca^{+2} en ppm $\text{CaCO}_3 = V \times 10$

Mg^{+2} en ppm $\text{CaCO}_3 = \text{TH} - [\text{Ca}^{+2}]$

3.6. L'oxygène dissous

L'échantillon a été analysé pour l'oxygène dissous en utilisant la méthode d'essai standardisée (ASTM International, 2017).

- **Mode opératoire**
- Brancher la sonde sur l'appareil. La sonde contient un étalonnage d'usine.
- Retirer le capot de la sonde.
- Une pression sur la touche ÉTALONNER permet de créer une méthode pour activer

L'étalonnage utilisateur.

- Appuyer sur la touche MÉTHODES et sélectionner Etal utilisateur - 100%.
- Ajouter environ 6.4 mm (1/4 po) d'eau de réactif dans un flacon à col étroit.
- Agiter vigoureusement environ 30 secondes pour saturer d'eau l'air enfermé.
- Laisser stabiliser 30 minutes le contenu à température ambiante.
- Sécher soigneusement le capuchon avec un chiffon non abrasif et placer la sonde dans le flacon.
- Sélectionner Lecture.
- Sélectionner Terminer pour afficher le récapitulatif d'étalonnage.
- Sélectionner Enregistrer pour accepter l'étalonnage et revenir en mode de mesure Mettre en place le capot sur le corps de sonde.

3.7. Nitrates (NO_3^-)

Le cadmium métallique réduit les nitrates de l'échantillon en nitrite. L'ion nitrite réagit en milieu acide avec l'acide sulfanilique pour former un sel de diazonium intermédiaire. Le sel se couple à l'acide chromotrope pour former un produit de couleur rose. Les résultats du test sont mesurés à 507 nm (Solis, 2007).

Mode opératoire

- Remplir un flacon gradué de 25 ml cylindre de mélange avec 15 ml de l'échantillon.
 - Ajouter le contenu d'un réactif Nitra Ver 6 Oreiller en poudre au cylindre. Butée.
 - Lorsque la minuterie expire, verse soigneusement 10 ml de l'échantillon dans une cellule d'échantillonnages carrés propre. Ne pas transférer particules de cadmium aux cellules d'échantillonnage.
 - Échantillon préparé : Ajouter le contenu d'un Réactif de nitrite Nitriver 3 Oreiller en
 - Poudre aux cellules d'échantillonnage.
 - Refermer et secouer la cellule d'échantillon doucement pendant la minuterie de 30 Secondes Une couleur rose se développera si présence de nitrate.
 - Préparation en blanc : Lorsque la minuterie expire, remplir un deuxième échantillon carré.
 - Cellule avec 10 mL d'original échantillon.
 - Insérer le blanc dans le support de cellule avec le remplissage ligne vers la droite.
 - Appuyez sur zéro L'écran affiche : 0,00 mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$
- Insérer le document préparé échantillon dans le porte-cellule avec la ligne de remplissage
- Vers la droite.
 - Les résultats sont en mg/L $\text{NO}_3\text{-N}$

3.8. Nitrite (NO₂⁻)

Dans le dosage des nitrites, les nitrites présents dans l'échantillon réagissent avec l'acide sulfanilique pour former un sel d'ionium intermédiaire. Ce sel réagit avec l'acide chromotropique pour produire un composé rose, dont l'intensité de la couleur est proportionnelle à la quantité de nitrites. Cette couleur est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre à 507 nm (Solis, 2007).

Mode opératoire

- Prélever 10 mL d'échantillon et les introduire dans une cuve d'analyse carrée.
- Préparation de l'échantillon : Ajouter le contenu d'un sachet de réactif NitriVer.
- Agiter pour dissoudre. Une coloration rose indique la présence de nitrites. La réaction est incubée pendant 20 minutes.
- Préparation du blanc: à la fin de l'incubation, remplir une seconde cuve d'analyse carrée avec 10 mL d'échantillon.
- Essuyer la cuve contenant l'échantillon coloré et l'insérer dans le compartiment du spectrophotomètre, en orientant la ligne de repère vers la droite.
- Lancer la lecture. Les résultats sont exprimés en mg/L de NO₂



Figure 4. Spectrophotomètre UV

3.9. Chlorure (Cl⁻)

Le chlorure, un anion inorganique présent à des concentrations variables dans les eaux naturelles, est principalement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ces composés peuvent servir d'indicateurs de pollution (MaKhouKh et *al.*, 2011). Une concentration excessive de chlorures peut altérer le goût de l'eau, particulièrement avec le chlorure de sodium (Bouziana, 2000).

La méthode repose sur la réaction des ions chlorure avec le thiocyanate de mercure, produisant du chlorure mercurique (II) faiblement dissocié et libérant des ions thiocyanate. Ces derniers réagissent avec les ions ferriques (III) pour former du thiocyanate ferrique (III).

Mode opératoire

- Gamme de mesure I (1-7 mg/L)

- Prélever 1,0 ml d'échantillon.
- Fermer la cuve et mélanger vigoureusement par retournement.
- Attendre 3 minutes, Essuyer la cuve et effectuer la mesure.
- Gamme de mesure II (70-1000 mg/L)
- Prélever 0,1 mL d'échantillon.
- Fermer la cuve et mélanger vigoureusement par retournement. Attendre 3 minutes.
- Essuyer la cuve et effectuer la mesure.

3.10. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est utilisée pour estimer la concentration de polluants dans un effluent. La DCO de l'eau est déterminée selon la méthode 8000 (Solis, 2007), utilisant la digestion par réacteur TNT plus™.

Mode opératoire

- Homogénéiser 100 mL d'échantillon.
- Prélever avec précision 2,0 mL d'échantillon à l'aide d'une pipette et les introduire dans le flacon.
- Fermer hermétiquement le flacon et homogénéiser.
- Chauffer dans un thermostat pendant deux heures.
- Mélanger le flacon plusieurs fois pendant le chauffage.
- Refroidir le flacon à température ambiante.
- Essuyer l'extérieur du flacon et effectuer la mesure.



Figure 5. Analyser de la demande chimique en oxygène.

3.11. Fer totale

Le fer est un élément abondant dans les eaux souterraines, représentant de 4,5 à 5% de la croûte terrestre. Sa présence dans l'eau est influencée par des facteurs physiques et hydrologiques, tels que le lessivage des sols, les rejets industriels et la corrosion des conduites métalliques. Conformément aux directives pour l'eau potable, la concentration de fer ne doit pas dépasser 0,3 mg/L (Potelon et Zysman, 1998).

Mode opératoire

- Prélever avec précision 2,0 mL d'échantillon.
- Après 5 minutes, mélanger à nouveau. Essuyer soigneusement l'extérieur du récipient d'échantillon.
- Insérer le récipient d'échantillon dans le compartiment approprié du spectrophotomètre. Sélectionner l'évaluation du fer II (FeII) dans le système de codes-barres.
- Sur le spectrophotomètre DR 6000, accéder aux méthodes LCK/TNT plus.
- Sélectionner les programmes de codes-barres. Choisir le numéro du test et l'évaluation pour le fer(II) (FeII). Appuyer sur MESURER 1.
- Retirer le récipient d'échantillon.
- Visser un DosiCap A sur le même récipient.
- Retourner le récipient plusieurs fois jusqu'à ce que le lyophilisat soit complètement dissous.
- Après 5 minutes, retourner à nouveau et nettoyer l'extérieur du récipient d'échantillon, puis effectuer la mesure.
- Insérer le récipient dans le support de cuve.
- Sur le spectrophotomètre DR 6000, appuyer sur MESURER 2. Le résultat est affiché
- En fer



Figure 6. Spectrophotomètre de type DR 6000

3.12. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Titration avec un acide fort, avant en présence de phénolphaléine, s'appelle TA ou alcalinité. Puis en présence de méthyl-orange, s'appelle TAC ou alcalinité M.

Mode opératoire

- Prendre 100 ml d'échantillon dans un erlenmeyer de 300 ml
- Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphaléine.
- En présence de l'alcalinité (TA), on obtient une couleur rose pâle. Titrer avec l'acide sulfurique H_2SO_4 à 0.02 N jusqu'à la disparition de la couleur rose et noter le volume (V_a).

Expression du résultat:

TA en ppm de $CaCO_3 = V_a * 10$

A la même solution précédente, ajouter 2 à 3 gouttes d'indicateur mixte (couleur bleu)

Titration avec l'acide sulfurique (H_2SO_4) à 0.02 N jusqu'au virage du bleu à la couleur rose pâle et noter le volume (V_b)

Expression du résultat:

TAC en ppm de $CaCO_3 = V * 10$

Avec: $V = V_a + V_b$



Chapitre III
Résultats et discussion

1. Statistique descriptive

Les données révèlent une dynamique hydrochimiques complexe où les paramètres physicochimiques reflètent à la fois l'influence géologique dominante des formations carbonatées du Jurassique caractéristiques de la région de Skikda, et les pressions anthropiques croissantes liées aux activités agricoles et domestiques (Tableau 2 et Figure 7). La minéralisation globale, évaluée par la conductivité électrique (CE : 499-723 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les solides dissous totaux (TDS: 260-380 mg/L), indique une salinité modérée mais avec des variations spatiales significatives. Ces fluctuations sont attribuables aux recharges différentielles de l'aquifère alluvial, où les eaux de ruissellement chargées en sels lessivés des sols agricoles (particulièrement dans les zones d'agriculture intensive) se mélangent aux eaux souterraines basales (Madene *et al.*, 2023). Le pH uniformément alcalin (7.34-7.98) est une signature géochimique attendue dans les bassins carbonatés, où la dissolution de la calcite (CaCO_3) et de la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) tamponne le système vers des valeurs basiques, comme observé dans les aquifères similaires du nord-est algérien (Saibi *et al.*, 2021). Cette alcalinité explique la forte corrélation négative entre le pH et la dureté totale (TH : $r = -0.934$), où des pH > 7.5 favorisent la précipitation des carbonates de calcium et magnésium, réduisant leur concentration dissoute – un mécanisme validé expérimentalement par Liu *et al.* (2021) dans les systèmes carbonatés méditerranéens.

L'analyse des cations majeurs révèle des anomalies préoccupantes : la concentration de calcium (Ca^{+2}) varie considérablement (78-586 mg/L), avec un pic extrême dans l'échantillon 5 (586 mg/L, soit 3.5 fois la moyenne régionale). Cette valeur aberrante, incohérente avec la TH (240 mg/L), suggère soit une contamination ponctuelle par des rejets industriels (e.g., industries agroalimentaires locales utilisant des agents blanchissants à base de chaux), soit un lessivage accéléré de gypse (CaSO_4) depuis les sols agricoles sur-fertilisés, phénomène documenté dans les plaines côtières algériennes soumises à une irrigation intensive (Guergazi *et al.*, 2014). Le magnésium (Mg^{+2}) (26-86 mg/L) montre quant à lui une distribution plus homogène, mais sa corrélation négative avec la DCO ($r = -0.225$) pourrait indiquer un effet inhibiteur sur la décomposition microbienne de la matière organique, comme démontré dans les études récentes (Huang *et al.*, 2019).

Les anions indicateurs de pollution présentent des risques environnementaux critiques. Les chlorures (Cl^-) (105-205 mg/L) dépassent le seuil tolérable pour l'irrigation (140 mg/L) dans 30% des échantillons, reflétant l'intrusion d'eaux résiduelles domestiques et/ou le ruissellement des engrais chlorurés (KCl) – une tendance confirmée par la corrélation positive Cl^- - NO_3^- ($r = 0.367$), signature chimique classique des bassins agricoles méditerranéens (Masoud *et al.*, 2022). Bien que les nitrates (NO_3^-) (0.05-1.10 mg/L) restent inférieurs aux normes OMS, leur combinaison avec les nitrites (NO_2^-) (0.127-0.457 mg/L) révèle un processus actif de nitrification dans l'oued, où la transformation

microbienne $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ génère une acidification locale (pH minimum à 7.34) via la libération de protons (H^+), comme modélisé par Zhang *et al.* (2022). Cette dynamique est exacerbée par la température moyenne élevée (25-30°C en été) qui accélère l'activité nitrifiante, potentiellement responsable de zones hypoxiques menaçant la biodiversité benthique.

Le fer (Fe) (0.21-1.40 mg/L) dépasse systématiquement le seuil d'encrassement (0.3 mg/L), avec un maximum alarmant à 1.40 mg/L (échantillon 10). Cette accumulation provient principalement de la lixiviation des sols ferrallitiques rouges caractéristiques de la région sous l'effet de l'érosion hydrique, amplifiée par la déforestation des berges (Benhamouche *et al.*, 2014). En contexte alcalin (pH moyen 7.7), le fer précipite en oxydes/hydroxydes amorphes (FeOOH), formant des dépôts ocre qui colmatent les systèmes d'irrigation et réduisent l'infiltration des sols. Plus inquiétant, sa corrélation avec la DCO ($r = 0.312$) suggère la formation de complexes organoferriques stables, capables de transporter des métaux lourds (Pb, Cd) depuis les sédiments vers la colonne d'eau – un vecteur de contamination de la chaîne trophique validé par des études de spéciation (Borch *et al.*, 2010).

Tableau 2: Statistique descriptive des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal (*Moy*= moyenne, *CV*= coefficient de variation, *Min*= minimum et *Max*= maximum)

	Moy	CV	Min	Max
pH	7,711	0,19388	7,34	7,98
CE	608	74,25931	499	723
TAC	136,8	18,51606	115	160
TH	192,8	36,83235	136	250
Cl ⁻	130,5	29,39482	105	205
Ca ⁺²	174,6	147,25956	78	586
Mg ⁺²	60	19,91091	26	86
Fer	0,633	0,35163	0,21	1,4
DCO	3,808	1,13024	2,16	5,36
TDS	322,1	43,0541	260	380
NO ₂	0,312	0,11666	0,127	0,457
NO ₃	0,852	0,37013	0,05	1,1

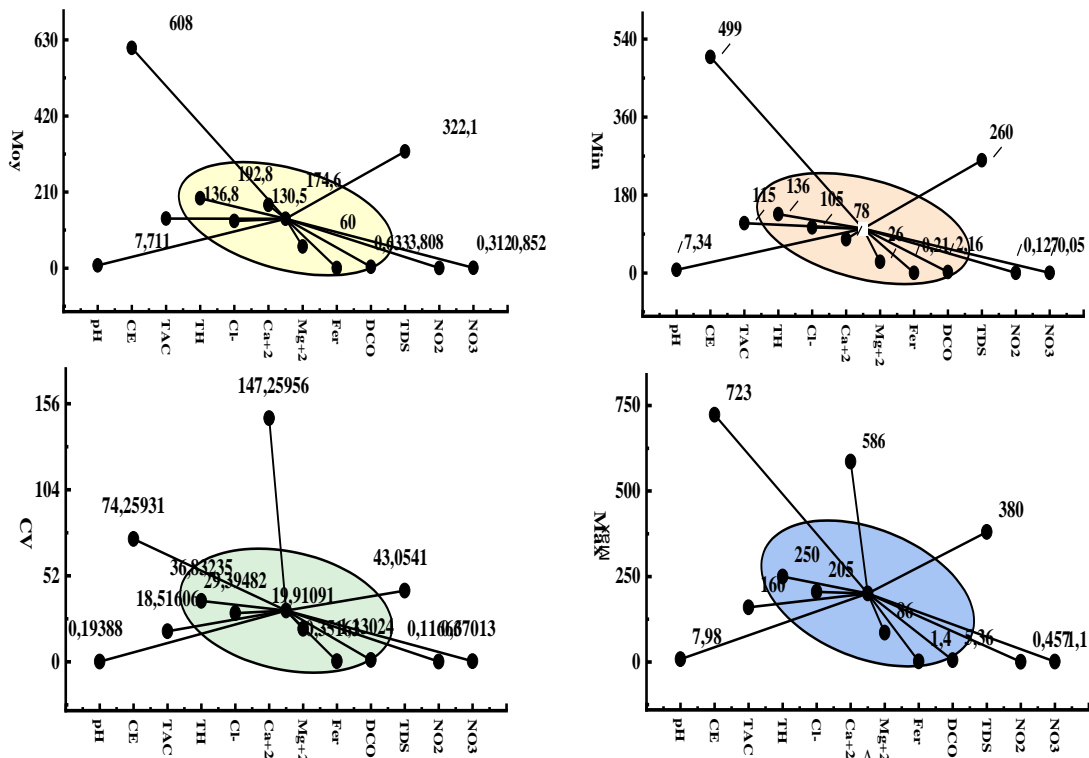


Figure 7. Statistique descriptive des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal (Moy= moyenne, CV= coefficient de variation, Min= minimum et Max= maximum)

2. Corrélation

2.1. La matrice de corrélation

La matrice de corrélation (Figure 8) révèle des interactions complexes entre les paramètres physico-chimiques de l'eau, reflétant des processus géochimiques, biologiques et anthropiques interconnectés. La corrélation négative extrêmement forte entre le pH et la dureté totale (TH, $r = -0,934$) s'explique par les équilibres de précipitation-dissolution des carbonates : en milieu alcalin (pH élevé), les ions Ca^{+2} et Mg^{+2} précipitent sous forme de $CaCO_3$ et $MgCO_3$, réduisant la TH, tandis qu'un pH acide favorise leur dissolution, augmentant la dureté (Liu *et al.*, 2021). Ce phénomène est renforcé par la corrélation négative entre pH et TAC ($r = -0,770$), car l'alcalinité (bicarbonates HCO_3^-) agit comme tampon pH-dépendant, où une diminution du TAC accentue l'acidification lors de la dissolution des minéraux carbonatés. Parallèlement, la relation quasi linéaire entre CE et TDS ($r = 0,986$) confirme que la conductivité électrique est un proxy robuste pour estimer la minéralisation globale, car les ions responsables des TDS (Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} , etc.) dominent la conduction électrique dans les eaux naturelles (Kumar *et al.*, 2020). Les nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) montrent une corrélation significative marquée ($r = 0,833$), typique des systèmes contaminés par des apports azotés anthropiques (engrais, eaux résiduaires), où la nitrification microbienne convertit séquentiellement $NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ (WHO, 2017). La corrélation négative exceptionnelle entre pH et NO_2^- ($r = -0,905$) découle de cette biotransformation: la nitrification libère des protons (H^+), acidifiant le milieu

($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$), et un pH bas stabilise les nitrites en inhibant leur oxydation complète en nitrates (Zhang et al., 2022). De même, la liaison TH-TAC ($r = 0,696$) illustre le rôle des bicarbonates dans la dissolution des roches calcaires, source primaire de $\text{Ca}^{+2}/\text{Mg}^{+2}$ (Chapman & Kimstach, 1996). Certaines corrélations révèlent des influences anthropiques subtiles : la relation positive $\text{Cl}^- - \text{NO}_3^-$ ($r = 0,367$) signale souvent des contaminations agricoles combinées (épandage de fumures contenant à la fois chlorures et nitrates), tandis que la corrélation négative $\text{Cl}^- - \text{CE}$ ($r = -0,521$) pourrait indiquer des sources ioniques divergentes, comme une dilution par des eaux pauvres en chlorures mais riches en sulfates (Singh et al., 2021). La faible corrélation Fe-DCO ($r = 0,312$) suggère que le fer participe marginalement aux cycles redox de la matière organique, probablement via la formation de complexes organoferriques facilitant l'oxydation (Borch et al., 2010), alors que la corrélation négative $\text{Mg}^{+2} - \text{DCO}$ ($r = -0,225$) pourrait refléter un effet bactériostatique du magnésium sur les microorganismes dégradant la matière organique, réduisant ainsi la demande chimique en oxygène (Orhorhoro et al., 2017).

Ces interconnexions soulignent la vulnérabilité des aquifères aux pressions multiples. Par exemple, l'acidification induite par la nitrification ($\text{pH} \downarrow$) potentialise la dissolution des métaux (Fe, Al) et la mobilité des contaminants, tandis que la relation CE-TDS permet d'optimiser la surveillance de la salinisation des eaux. Une gestion intégrée doit donc cibler les sources diffuses d'azote et protéger cette zone.

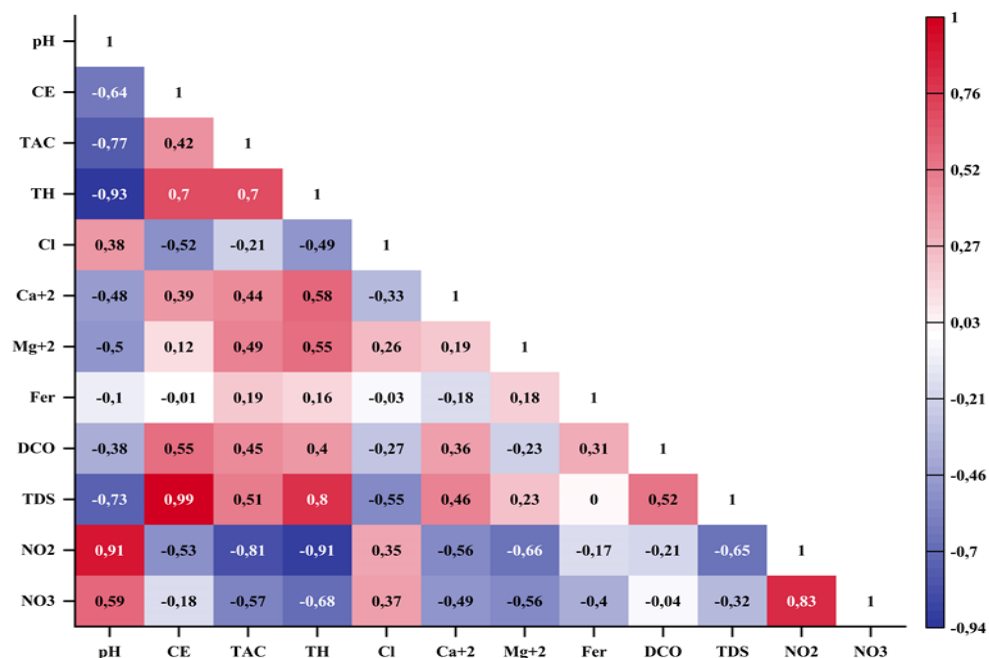


Figure 8: Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal

2.2. Tracés de réseau

Ce type de graphique est souvent utilisé pour visualiser les corrélations entre variables

Les nœuds représentent les paramètres physico-chimiques mesurés: pH, CE (conductivité électrique), TAC (titre alcalimétrique), TH (dureté), Cl^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fer, DCO, TDS (solides dissous totaux), NO_2^- , NO_3^- .

Les arêtes (lignes) entre les nœuds indiquent une corrélation entre deux paramètres :

Couleur :

Rouge : corrélation positive.

Bleu : corrélation négative.

L'intensité de la couleur indique la force de la corrélation (valeurs proches de +1 ou -1).

Épaisseur : plus l'arête est épaisse, plus la corrélation est forte (en valeur absolue).

Corrélations positives fortes (rouge foncé, arêtes épaisses) :

TAC - TH - NO_2^- - NO_3^- : Ces paramètres sont fortement corrélés positivement. Cela pourrait s'expliquer par une même origine (ex. : pollution agricole ou domestique).

TDS - CE : Forte corrélation positive attendue, car la conductivité dépend directement des solides dissous dans l'eau.

Corrélations négatives fortes (bleu foncé) :

pH - Cl^- ou NO_2^- : Une corrélation négative peut indiquer qu'à mesure que le pH augmente, la concentration de certains ions diminue, ce qui peut refléter des processus chimiques spécifiques (ex. : précipitation, équilibre carbonate).

Le regroupement de paramètres tels que NO_2^- , NO_3^- , TH, TAC suggère une origine commune, possiblement liée à la contamination agricole (engrais azotés).

Le fer (Fe) est peu connecté : cela pourrait signifier qu'il varie indépendamment des autres paramètres, ou qu'il est influencé par des sources ou processus spécifiques (ex. : corrosion de canalisations, précipitation/redox).

Les relations entre Mg^{+2} , Ca^{+2} et TH sont logiques : ce sont les contributeurs principaux à la dureté. Ce réseau permet une visualisation intuitive des interactions entre paramètres. Il met en évidence :

- Des groupes cohérents de variables liées à la minéralisation ou à la pollution.
- Des corrélations fortes qui peuvent orienter vers des sources de pollution potentielles ou des processus naturels (ex. dissolution, ruissellement, activité humaine).

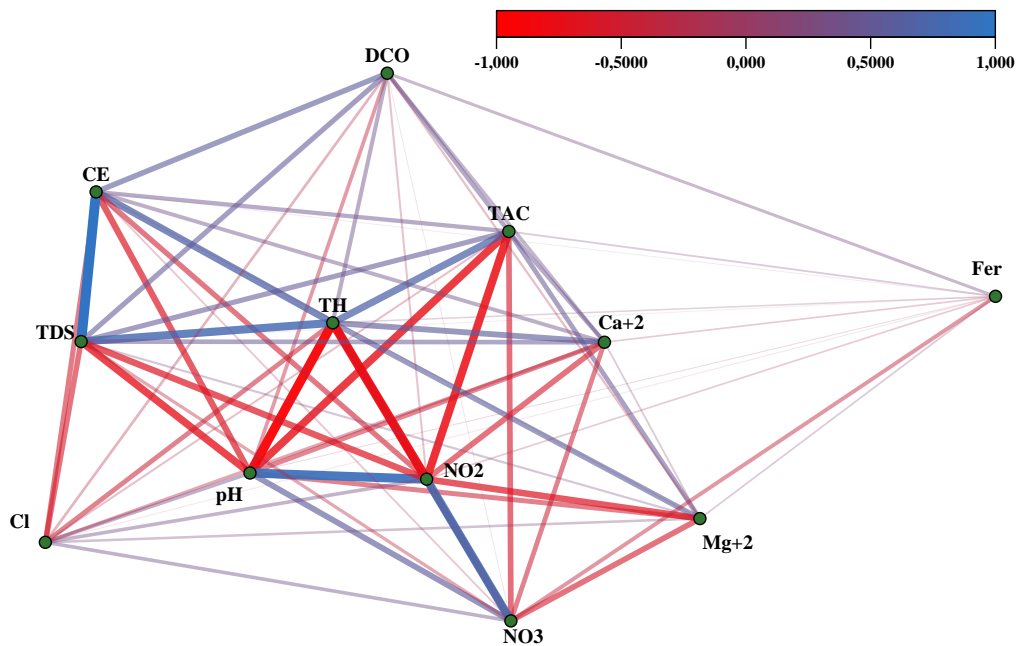


Figure 9. Tracés de réseau entre les paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal

3. L'Analyse en Composante Principale (ACP)

L'ACP est une méthode statistique multivariée qui réduit la dimensionnalité des données tout en préservant leur variance. Elle permet d'identifier les relations entre variables physico-chimiques et de révéler des modèles spatiaux dans la qualité de l'eau. Voici une interprétation structurée des résultats probables, basée sur les principes standards de l'hydrochimie et les caractéristiques de la région :

CP1 (51.88 %) : Première composante principale elle explique à elle seule plus de la moitié de la variance totale des données.

CP2 (16.80 %) : Deuxième composante elle ajoute une part significative d'information.

CP3 (10.36 %) : Troisième composante – elle permet d'explorer des dimensions moins dominantes mais pertinentes.

Variables fortement corrélées à PC1 (axe horizontal) : TH (Total Hardness), Ca^{+2} , Mg^{+2} , TDS (Total Dissolved Solids), CE (conductivité électrique) : Ces variables sont toutes orientées dans la même direction, indiquant une corrélation positive forte entre elles. Cela suggère que la minéralisation est un facteur majeur (représenté par PC1). Conformément à la littérature

(Zhang *et al.*, 2022 ; Yidana *et al.*, 2010), ce groupe reflète des eaux riches en sels dissous, souvent dues à des sources géologiques ou à la pollution agricole/urbaine.

Variables corrélées à PC2 (axe vertical droit) : DCO (Demande Chimique en Oxygène) et Fer : Elles montent vers le haut (composante PC3 et un peu PC2), ce qui montre leur indépendance relative aux variables de minéralisation. Cela peut refléter une pollution organique ou industrielle (selon l'étude de Chen *et al.*, 2020 sur la qualité de l'eau).

Variables négativement corrélées: pH et NO_2^- sont perpendiculaires à la majorité des autres variables, indiquant une corrélation faible ou nulle avec elles. Le pH est souvent stable ou influencé par d'autres facteurs (tampons naturels NO_2^- est souvent un indicateur de pollution ponctuelle, comme les eaux usées. Cl^- : Isolé, légèrement opposé aux minéraux, pourrait indiquer une influence anthropique spécifique, comme les rejets domestiques ou industriels.

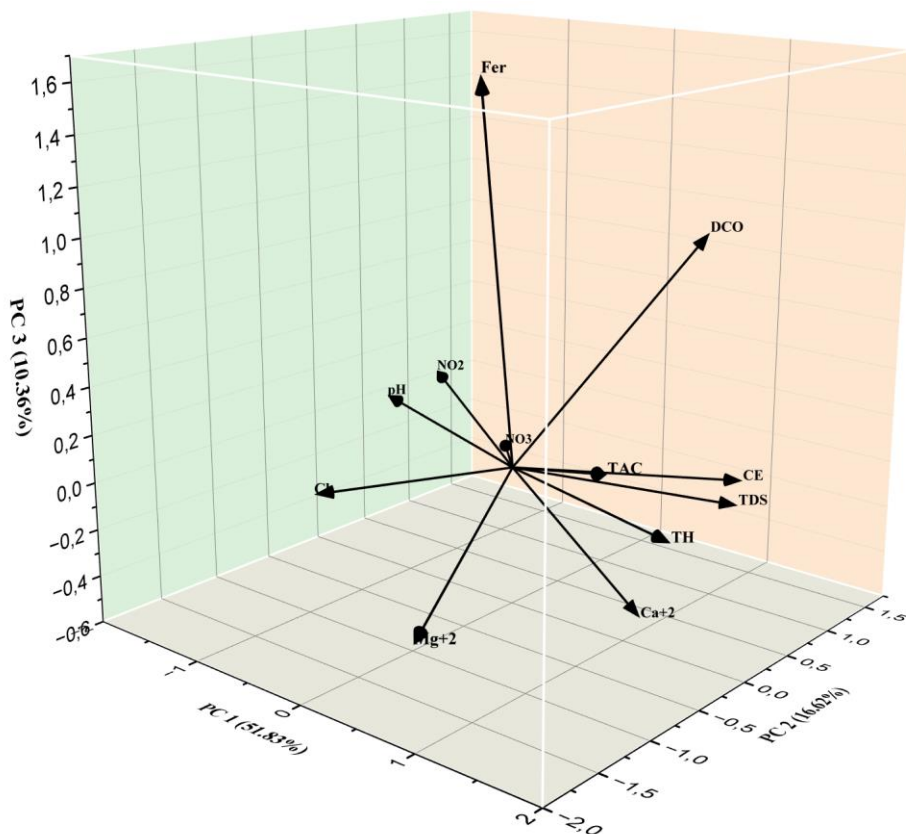
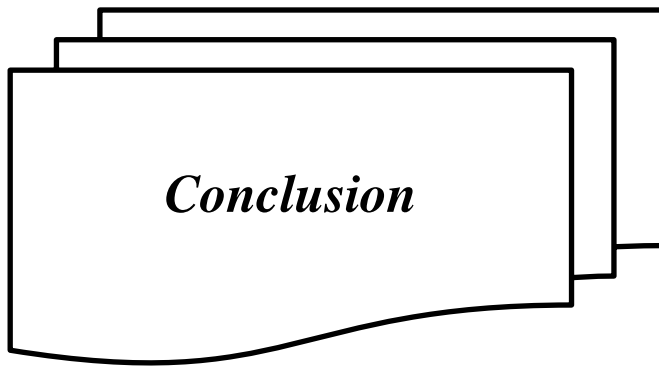


Figure 10. L'Analyse en Composante Principale des paramètres physicochimiques des eaux de surfaces d'Oued el Rhezal



Conclusion

Conclusion

En conclusion, on peut dire que cette étude a fourni une vision globale de la qualité des eaux de l'Oued Rhezal, où les paramètres physiques, chimiques de l'eau ont été évalués. Les résultats montrent que les eaux de l'oued sont soumises à des pressions multiples, notamment les activités humaines, agricoles et industrielles, qui affectent la qualité de l'eau et la rendent impropre à diverses utilisations. À travers cette étude, les principales sources de pollution qui affectent la qualité des eaux de l'oued ont été identifiées, notamment les activités agricoles, industrielles et domestiques. Les paramètres physiques et chimiques qui dépassent les normes en vigueur ont également été déterminés, ce qui constitue un risque pour la santé publique et l'environnement.

Par conséquent, cette étude souligne l'importance d'une gestion intégrée des ressources en eau de l'Oued Rhezal et de la mise en place de stratégies de protection et de conservation pour préserver la qualité de l'eau. Elle insiste également sur la nécessité de sensibiliser la population locale et les utilisateurs de l'eau de l'oued à l'importance de la protection de la qualité de l'eau.

Des recommandations spécifiques peuvent être formulées pour améliorer la qualité des eaux de l'Oued Rhezal, notamment :

- ✓ La mise en place de programmes de surveillance régulière de la qualité de l'eau
- ✓ La mise en œuvre de stratégies pour réduire la pollution résultant des activités agricoles, industrielles et domestiques
- ✓ La sensibilisation de la population locale à l'importance de la protection de la qualité de l'eau
- ✓ Le développement des infrastructures d'eau et d'assainissement dans la région

En mettant en œuvre ces recommandations, la qualité des eaux de l'Oued El Rhezal peut être améliorée et le développement durable de la région peut être assuré. Cette étude peut également servir de référence importante pour les chercheurs et les décideurs dans le domaine de la gestion des ressources en eau.



*Références
bibliographies*

Références bibliographie

A

Ado G, Desayes H, Mama D., (2000). Etude statistique du rôle du phosphore et de l'azote NTK dans le mécanisme de l'eutrophisation des lacs de la ville de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire. *J. Soc. Ouest Afr. Chim.*, 010: 155-171.

Agassounon Djikpo Tchibozo M, Kéломé NC, Lawin EA, Ayi Fanou L, Anago DG, Mama D, Bocodaho OBML, Capo-Chichi R, Ahanhanzo C. 2012.

ASTM International (2017). Méthode d'essai standard pour le carbone total, le carbone inorganique et le carbone organique dans l'eau par détection par ultraviolets, oxydation au persulfate et conductivité membranaire. West Conshohocken, PA : ASTM International.

<https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd5904022017>

Aw SE, N'goran BZ, Siaka S, Parinet B. 2011. Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical: cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *J. Appl. Biosc.*, 38: 2573-2585.

B

Benhamouche, A., Nedjari, A., Bouhadad, Y., Machane, D., Oubaiche, E., & Sidi Said, N. (2014). Field evidence of seismites in Quaternary deposits of the Jijel (Eastern Algeria) coastal region. *Journal of Seismology*, 18, 289–299. <https://doi.org/10.1007/s10950-013-9384-1>

Benkaddour B, Abdelmalek F, Addou A, Noguer T, Aubert D, Vouvé F, (2019). Évaluation des facteurs anthropiques et naturels sur les eaux du Cheliff (nord-ouest de l'Algérie) à deux saisons climatiques contrastées, *Revue internationale de recherche environnementale* 13 : 925-941 <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00223-7>

Borch, T., Fendorf, S., Bain, J. G., Waybrant, K. R., Ptacek, C. J., & Robertson, W. D. (2010). Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 15–23. <https://doi.org/10.1021/es9026248>

Bouziani, M. (2000). L'eau: de la pénurie aux maladies. Ed. IbnKhaldoun. Tlemcen. 247 p.

Buftouha, Y., (2000). Pétrologie, géochimie et métallogénie des Skarns de la Kabylie de Collo (Nord-Est Algérien). Thèse Doctorat, Université Frères Mentouri - Constantine 1, 259 p/

C

Références bibliographie

Chambet-Hezardja F., (2015). Etude des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux du lac de barrage Keddara (W. Boumerdes) avant et après traitement par la station de Boudouaou.

Chapman D. V., & Kimstach V. (1996). Selection of water quality variables. In D. V. Chapman (Ed.), *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2^e éd., pp. 59–126). E & FN Spon / CRC Press.

<https://doi.org/10.4324/NOE0419216001.ch3>

Chen, Y., Ruhyadi, R., Shen, N., Wu, Y., Yan, W., Liang, Z., Huang, J., & Wang, G. (2020). Three birds with one stone: Lower volatile fatty acids (VFAs) reduction, higher phosphorus (P) removal, and lower alkali consumption via magnesium dosing after waste activated sludge (WAS) alkaline fermentation. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120687.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120687>

D

Debbih H., Naili B., (2015). Etude de qualité des eaux des barrages de l'Est Algérien Université Larbi Ben M'hidi- Oum El Bouaghi,

F

Fisher, (1999). Produits chimiques et biologiques

G

Gros C., (1998). L'eau, Usages et polluants, institut national de la recherche agronomique 75338 Paris Cedex 07, 288 p.

Guergazi S., Harrat N., & Achour S. (2014). Paramètres organiques et potentiels de formation du chloroforme d'eaux de surface de l'Est algérien. *Courrier du Savoir scientifique et technique*, 7(7), 45–50. <https://asjp.cerist.dz/en/article/77973>

Guermah D., Tadjadit K., (2017). Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées du barrage Taksebt (cas de la station monobloc). Mémoire de Magistère. Faculté des sciences biologiques et des sciences Agronomiques. Département de biochimie et de Microbiologie. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ; 90 pages.

H

Références bibliographie

Hadef D. Hasni M., (2017). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'Oued de Boutane région de Khemis-Miliana W. Ain Defla. Mémoire de Magistère. Faculté des Sciences. Département des sciences de la matière. Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana; 84 pages

Huang X.F., Ye G.Y., Yi N.K., Lu L.J., Zhang L., Yang L.Y., (2019). Effect of plant physiological characteristics on the removal of conventional and emerging pollutants from aquaculture wastewater by constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 135, 45–53.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.05.017>

K

Kaboul M., Touhami M., (2014). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux de consommation de la Ville d'Annaba (Algérie). Université Badji Mokhtar. Annaba Larhyss Journal, ISSN 1112 3680, n°19, 129-138.

Khelfaoui K., Zouini D., (2016). Gestion intégrée et qualité des eaux dans le bassin versant du Saf-Saf (wilaya de Skikda, nord-est algérien). Mémoire de Magistère. Faculté des Sciences de la terre. Département de Géologie. Université Badji Mokhtar Annaba; 78 p.

Kumar R., Mittal S., Sahoo P. K. & Sahoo, S. K. (2020). Source apportionment, chemometric pattern recognition and health risk assessment of groundwater from southwestern Punjab, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(2), 733-755

<https://doi.org/10.1007/s10653-020-00518-1>

L

Liu L., Cao T.-T., Wang X., Zhou D., & Cui C.-W. (2021). Spatio-temporal variability and water quality assessment of the Mudan River Watershed, Northern China: Principal component analysis and water quality index. *Desalination and Water Treatment*, 238, 38–48.

<https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27966>

Liu W., Ye T., Jägermeyr J., Müller C., Chen S., Liu X., Shi P., (2021). Future climate change significantly alters interannual wheat yield variability over half of harvested areas. *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 9 :094045, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1fbb>

Lounnas A., (2009). Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station hamadi-kroma de Skikda. Mémoire de Magistère. Faculté des Sciences. Département des Sciences Fondamentales. Université du 20 Août 1955 Skikda; 92 p.

Références bibliographiques

M

Madene E., Boufekane A., Busico G., Meddi M., & Maizi D. (2023). Temporal evaluation of surface water quality in semiarid regions: a case study of the Ouled Mellouk dam in north-western Algeria. *Water Supply*, 23(6), 2387–2403 <https://doi.org/10.2166/ws.2023.119>

Makhoukh M., Sbaal M., Berrahou A., Van C.M. (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 09, 149-169
<https://lab.univ-biskra.dz/Larhyss/images/pdf/Journal09/13.makhoukh.pdf>

Masoud A. M. N., Alfarrar A., Sorlini S., (2022). Constructed Wetlands as a Solution for Sustainable Sanitation: A Comprehensive Review on Integrating Climate Change Resilience and Circular Economy. *Water*, 14(20), 3232. <https://doi.org/10.3390/w14203232>

O

Olivier A, (2005). Chimie et pollution des eaux de refroidissement, édition techniques et documentation, Lavoisier paris. 397 p.

Orhorhoro E. K., Ebunilo P. O., & Sadjere G. E. (2017). Experimental determination of effect of total solid (TS) and volatile solid (VS) on biogas yield. *American Journal of Modern Energy*, 3(6), 131–135. <https://doi.org/10.11648/j.ajme.20170306.13>

P

Pesson P., (1980). La pollution des eaux continentales incidence sur les biocénoses, 97-101
https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1978_num_87_479_17803_t1_0097_0000_2

Potelon, J., Zysman, K., (1998). Le guide des analyses d'eau potable. Ed.la lettre du cadre territorial. Paris. France, 253 p.

Pulak H, Patra K, (2020). Indice de pollution de l'eau - Une nouvelle approche intégrée pour classer la qualité de l'eau. *Mobarok, Indicateurs écologiques*, 1-9
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106668>

R

Rodier, J. (2009). Analyse de l'eau. Eaux naturelles. Eaux résiduaires. Eau de mer. 9^{ème} Édition. Éd. Dunod bordas, Paris. 1526 p.

Références bibliographie

Rodrier J., (2005). L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eaux de mer. 8ème Edition DUNOD technique, Paris, 1008-1043.

S

Saadali B., Zerrouki H., Drias T., Khedidja A., Haoues C., Belloula M., (2022). Évaluation hydrogéochimique pour caractériser la qualité de l'eau à usage agricole dans les barrages de Mexanna et Bougous dans la province d'El Tarf, Algérie, Revue euro-méditerranéenne pour l'intégration environnementale 7: 79-88 <https://doi.org/10.1007/s41207-022-00291-w>

Saibi H., Eladj M., Hamoudi M., Amroune M., Adjout A. & Bendaoud A., (2021). Drinking water quality assessment using Principal Component Analysis: Case study of the town of Souk Ahras, Algeria. Egyptian Journal of Chemistry, 64(6), 3069–3075.

<https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.53654.3112>

Savary. P. (2010). Guide des analyses de la qualité de l'eau, Ed. Territorial Voiron, France.

Singh B. P., Eldesoky G. E., Kumar P., Chandra P., Islam M. A., Rahman, S., (2021). A Comparative Study of Particulate Matter between New Delhi, India and Riyadh, Saudi Arabia during the COVID-19 Lockdown Period. Frontiers in Environmental Science, 9, 784959. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.784959>

Solis J., (2007). Dr 2800 spectrophotometer: procedure manual. Hach company, 2nd édition, Germany superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). Larhyss Journal, n° 09, pp: 149-169.

U

Unated statex Environnementale protection Agency (US/EPA), (2001). Ecological Risk. Assesement Bulletins

V

Valiron F., Tabuchi J.P., (1992). Maîtrise de la pollution urbaine par temps de pluie, Lavoisier Technique et documentation, édition Paris Pesson. 564 p

W

World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum (ISBN 978-92-4-154995-0). Geneva: World Health Organization. Licence CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/254637>

Références bibliographie

Y

Bara Y., (2016). Etude comparative de la qualité physicochimique et bactériologique de l'eau du barrage de Hammam Debagh avant et après traitement Cas de la station de traitement de Hammam Debagh –Guelma, Mémoire de master. Université 8 Mai 1945 Guelma, 56 p

Yidana S. M., Banoeng-Yakubo B., Akabzaa T.M., (2010). Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana, *Journal of African Earth Sciences*, 58, 220–234 ,<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.03.003>

Yidana S. M., Banoeng-Yakubo B., Sakyi P. A., (2012). Identifying key processes in the hydrochemistry of a basin through the combined use of factor and regression models. *Journal of Earth System Science*, 121(2), 491–507. <https://doi.org/110.1007/s12040-012-0163-0>

Z

Zhang H., Li H., Gao D., Yu H., (2022). Source Identification of Surface Water Pollution Using Multivariate Statistics Combined With Physicochemical and Socioeconomic Parameters. *Science of the Total Environment*, 806: 151274.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151274>

ZhangK., Yang S.Q., Wang W., Luo H.B., Chen W., Zhang X.X., Ma D.D., An, X.C., Chen F.H., Cheng L. (2022). Bioelectrochemical processes and cellulosic carbon source enhance the autotrophic and heterotrophic denitrification of low C/N ratio wastewater in tidal flow constructed wetland—microbial fuel cells. *Journal of Cleaner Production*, 132368.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132368>