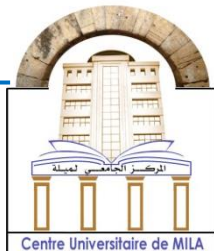


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N°Ref :.....

Centre Universitaire Abdelhafid BOUSSOUF- Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et de l'Environnement

**Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de
Master**

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : écologie et environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème :

Ecologie et distribution des paramètres physico-chimiques et du phytoplancton dans les réservoirs de la région de Mila: cas de barrages de béni Haroun

Présenté par :

➤ MAAREK Yousra

Devant le jury :

Benkouachi.N

MCB

Présidente

BOUCHAREB. N

MCA

Examineur

REBBAH. A-C

MCB

Promoteur

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Allah, qui m'a guidé à travers ce voyage académique et m'a béni de la chance de la vie, me permettant ainsi d'accomplir ce travail de mémoire. Sa guidance et Sa miséricorde ont été essentielles à chaque étape de ce parcours.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à mon encadreur, Monsieur REBBAH, pour son accompagnement précieux, ses conseils éclairés et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses orientations expertes ont été d'une aide inestimable et ont grandement enrichi mon travail.

Un remerciement spécial à Monsieur Bouchareb, mon co-encadreur, pour ses précieux conseils et son expertise scientifique. Ses orientations ont été d'une importance capitale pour la qualité et la rigueur de ce mémoire.

*Je suis profondément reconnaissant envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon mémoire. Madame **Benkouachi.N***

Leur expertise et leur temps consacré à analyser mon travail sont très appréciés. Leur retour d'information et leurs commentaires constructifs ont été extrêmement bénéfiques pour approfondir ma compréhension du sujet et améliorer la qualité de mon travail. Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien moral, leurs encouragements et leurs conseils ont été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce projet. Je tiens à remercier

*À travers lui, nous tenons remercier le **Dr. LALAOUI Meryem** qui nous a donnée l'aide d'effectuer ce travail partie étude de physico-chimie notre travail dans le laboratoire des sciences naturelles et matériaux (LSNM) du centre universitaire Abdelhafid Boussouf- Mila*

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur compréhension pendant cette période intense de travail sur terrain et au laboratoire.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse et le soutien de chacune de ces personnes. Leur contribution a été essentielle et je suis profondément reconnaissant envers chacun d'eux.



Dédicace



Avec l'expression de ma reconnaissance Je dédie ce modeste travail :

À celui dont les mots ne suffisent pas à le décrire, celui qui a peiné pour mon aise et mon bien-être, celui qui a tout donné pour me mettre sur le chemin de la réussite, celui qui m'a appris, par sa sagesse et sa patience, à surmonter les difficultés de la vie, à mon très cher père **kamel**

À la mémoire de ma mère, que Dieu ait son amé. Tu restes à jamais dans mon cœur.

À mon cher frère **Salah el dine** at **Aymen**.

À mes très chères sœur **Houda** et son mari **Radoune**, Merci.

À leur petite garçon **youcef**, dont l'innocence et la joie de vivre apportent tant de bonheur à notre famille.

À ceux qui m'ont appris des lettres en or, des mots en perles et les expressions les plus sublimes de la science, à ceux qui ont fait de leur savoir des phares pour nous éclairer le chemin de la science et de la réussite, à mes valeureux professeurs.

À ceux avec qui j'ai frayé le chemin de la réussite et j'ai goûté le fruit de notre parcours

Estudiantin, à mes amis et collègues chacun en son nom

Et à tous les amis et proches dont les noms n'ont pu être mentionnés dans ces quelques lignes.



yousra

Résumé

Ce mémoire porte sur l'évaluation écologique du barrage de Béni Haroun (wilaya de Mila), le plus grand réservoir d'eau en Algérie, avec une capacité de stockage de 2,5 milliards de m³. L'objectif principal de cette étude est d'analyser la qualité de l'eau à travers l'étude combinée des paramètres physico-chimiques et des communautés phytoplanctoniques.

Des prélèvements ont été réalisés dans 05 stations réparties dans le réservoir. Les analyses ont révélé des températures de l'eau variant entre 28°C et 29°C (moyenne 28,4°C), un pH alcalin moyen de 8,88, et une turbidité moyenne de 24,6 NTU.

Concernant le phytoplancton, 13 genres ont été identifiés appartenant à 5 embranchements et 8 classes. Les genres dominants sont *Oocystis* (38,67 %), *Spirogyra* (25,33 %) et *Ceratium* (13,33 %). La fréquence d'occurrence la plus élevée a été observée pour *Spirogyra* (80 % des stations). L'indice de diversité de Shannon-Wiener a montré des valeurs modérées à faibles selon les stations (maximum : 1,55 bits à S1 ; minimum : 0,56 bits à S3). L'abondance maximale observée était de 33 individus dans la station S2.

L'analyse statistique (ACP) a révélé des corrélations entre les paramètres environnementaux (notamment les nutriments, la température, la turbidité) et la composition du phytoplancton. Ces résultats mettent en évidence une influence notable des apports anthropiques (engrais, eaux usées) sur l'état trophique du barrage. L'étude conclut en recommandant une gestion durable intégrée du réservoir afin de prévenir les risques d'eutrophisation et préserver les services écosystémiques qu'il fournit.

Mots-clés :

Barrage de Béni Haroun - Qualité de l'eau – Phytoplancton - Paramètres physico-chimiques- Analyse en composantes principales (ACP) - Eutrophisation

ملخص

يتناول هذا البحث تقييماً إيكولوجياً لسد بني هارون (ولاية ميلّة)، الذي يُعد أكبر خزان مائي في الجزائر بطاقة تخزين تقدر بـ 2.5 مليار م³. يهدف هذا العمل إلى دراسة جودة المياه من خلال التحليل المشترك للمعايير الفيزيائية-الكيميائية ومجتمعات العوالق النباتية.

تم أخذ العينات من 5 محطات مختلفة. أظهرت النتائج أن درجة حرارة المياه تراوحت بين 28 و 29 درجة مئوية (المتوسط 28.4 °م)، والـ pH كان قاعدياً بمتوسط 8.88، أما العكارة فقد بلغت في المتوسط 24.6 NTU.

أما بالنسبة للعوالق النباتية، فقد تم تحديد 13 جنساً ينتمون إلى 5 شعب و 8 طوائف، أهمها (*Oocystis* (38.67%)، *Spirogyra* (25.33%)، و *Ceratium* (13.33%) وكانت *Spirogyra* أكثر تكراراً بوجودها في 80% من المحطات. تراوحت قيمة مؤشر التنوع (Shannon) بين 1.55 بت كحد أقصى (المحطة S1) و 0.56 بت كحد أدنى (المحطة S3). أما أعلى كثافة عددية فكانت 33 خلية في المحطة S2.

أظهرت التحاليل الإحصائية (ACP) ارتباطات واضحة بين العوامل البيئية (مثل المغذيات، الحرارة، العكارة) وتركيب الفيتوبلانكتون. خلصت الدراسة إلى تأثير الأنشطة البشرية على النظام البيئي للسد، وأوصت بضرورة اعتماد إدارة مستدامة لتفادي مخاطر الإثراء الغذائي وضمان استدامة خدمات النظام البيئي.

الكلمات المفتاحية

سد بني هارون- جودة المياه- العوالق النباتية (الفيتوبلانكتون)- المعايير الفيزيائية والكيميائية- التحليل بالمكونات الرئيسية (ACP) - التغذية الزائدة (اليوتروفكاسيون)

Abstract

This study evaluates the ecological status of Béni Haroun Dam (Mila Province), the largest water reservoir in Algeria with a storage capacity of **2.5 billion m³**. The research aimed to assess water quality through the combined analysis of physicochemical parameters and phytoplankton communities.

Sampling was conducted at **5 stations** across the reservoir. Water temperatures ranged from **28°C to 29°C** (mean 28.4°C), the **pH was alkaline (mean 8.88)**, and **average turbidity** measured **24.6 NTU**.

A total of **13 phytoplankton genera** were identified, spanning **5 phyla and 8 classes**. The dominant taxa were *Oocystis* (38.67%), *Spirogyra* (25.33%), and *Ceratium* (13.33%), with *Spirogyra* occurring in **80%** of the stations. The **Shannon diversity index** ranged from **0.56 to 1.55 bits**, with the highest value recorded at station S1. **Maximum cell abundance** reached **33 individuals** at station S2.

Principal Component Analysis (PCA) revealed strong correlations between environmental parameters (nutrients, temperature, turbidity) and phytoplankton distribution. The findings highlight the influence of anthropogenic pressures (e.g., agricultural runoff, wastewater) on the reservoir's trophic state. The study recommends implementing an integrated and sustainable management strategy to prevent eutrophication and preserve essential ecosystem services.

Key words:

Béni Haroun Dam, Water Quality, Phytoplankton, Physico-chemical Parameters, Principal Component Analysis (PCA), Eutrophication

Table des matières

<i>Remerciements</i>	3
<i>Dédicace</i>	4
Résumé	5
ملخص	6
Abstract	7
Table des matières	8
Liste des figures	13
Liste des tableaux	16
Introduction	1
Partie 1 : Généralité sur l'eau	4
1. Définition de l'eau	4
2. Propriétés des eaux	4
2.1. Propriétés chimiques	4
2.2. Propriétés physiques	6
2.2.1. Point d'ébullition	6
2.2.2. Viscosité	6
2.2.3. Solvant	6
2.2.4. Tension superficielle	6
2.2.5. Chaleur spécifique	6
2.2.6. Chaleur latente	6
2.2.7. Capacité thermique	7
2.2.8. Densité maximale	7
2.2.9. Transparence	7
2.3. Propriétés électriques	7
2.3.1. Conductivité électrique	7
2.3.2. Résistivité électrique	7

2.3.3. Permittivité diélectrique.....	7
2.3.4. Capacité électrique.....	8
2.3.5. Polarisabilité électrique.....	8
2.4. Propriétés biologiques	8
3. Cycle naturel de l'eau.....	8
4. Ressources hydriques naturelles.....	9
4.1. Eaux superficielles.....	10
4.2. Eaux souterraines.....	10
4.3. Eaux de mers et océans.....	10
5. Les caractéristiques des eaux superficielles et les eaux Souterraines	10
Partie II : Généralités sur plancton	12
1. Rappels de notion sur les algues	12
2. Phytoplancton.....	12
2.1. Généralité sur les phytoplanctons.....	12
2.2. Définition du phytoplancton.....	13
2.3. Reproduction	14
2.4. Les conditions de croissances phytoplancton	14
3. Les Classes des micro-algues.....	15
4. Ecologie et Habitat	18
5. Rôle fonctionnel du phytoplancton dans les écosystèmes.....	19
6. Importance du phytoplancton.....	19
7. Application des micro-algues.....	21
7.1. Applications alimentaires	21
7.2. Applications pharmaceutiques.....	22
7.3. Applications cosmétiques	22
7.4. Applications environnementales.....	23
8. Phytoplancton en relation avec les facteurs biotiques et abiotiques	23

8.1. Relation avec les facteurs abiotiques	23
8.1.1. La lumière	23
8.1.2. La température	24
8.1.3. La salinité	24
8.1.4. Le potentiel hydrogène	24
8.1.5. Les nutriments	25
8.1.6. La concentration en chlorophylle(a)	25
8.2. Relation avec les facteurs biotiques	26
9. Effets nuisibles du phytoplancton	26
9.1. Risque sur la santé humaine	27
9.2. Risque sur les écosystèmes aquatiques	27
9.3. Risque sur les organismes marins	28
1. Présentation de la zone d'étude	30
1.1. Présentation de la wilaya de Mila	30
1.2. Le bassin Kébir-Rhumel	31
1.3. Le barrage de Béni Haroun	31
1.3.1. Caractéristiques générales	33
1.3.2. Fonctionnalités hydrotechniques	33
1.3.2.1. Contexte géographique et hydrologique	33
1.3.2.2. Contexte morpho-géologique	35
1.3.2.3. Caractéristiques hydrotechniques	35
1.3.2.4. Impact socio-économique	36
1.3.2.5. Apports hydrologiques au barrage	36
1.3.2.6. Climatologie de la Région	37
1.3.2.7. Régime Hydrologique	38
2. Méthodologie	39
2.1. Méthode de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau	39

2.1.1. Travail sur le terrain.....	39
2.1.2. Au Laboratoire	40
2.1.2.1. Phosphates (PO_4).....	40
2.1.2.2. Silicium ($\text{Si}(\text{OH})_4$)	41
2.1.2.3. Nitrites (NO_2)	42
2.1.2.4. Nitrates (NO_3)	43
2.1.2.5. Ammonium (NH_4).....	44
2.2. Prélèvement du phytoplancton	44
2.2.1. Matériel de prélèvement.....	44
2.2.2. Méthodes des prélèvements	45
2.3. Étude au laboratoire.....	46
2.3.1. Identification du phytoplancton	46
2.3.1.1. Matériel utilisé.....	46
2.3.1.2. Méthode malassez	47
1. Résultats et discussion.....	49
1.1. Les paramètres physico-chimiques.....	49
1.2. Discussion générale	97
Conclusion.....	101
Références	104

Liste des abréviations

% : Pourcentage.

CE : Conductivité électrique.

Cl⁻ : Chlorure.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

CO₃⁻ : Carbonates.

Moy : Moyenne

N₂ : **Diazote.**

Na⁺ :L'ion sodium.

NH₃ :L'ammoniac.

NH₄⁺ :l'ammonium.

NO: Monoxyded'azote.

NO₂: Dioxyded'azote.

NO₃⁻ : Nitrates.

NTU : Unité de turbidité néphélométrique.

O₂: Dioxygène.

PO₄³⁺: phosphates.

SO₄²⁻ : L'ion sulfate.

T : Température.

TDS : Taux de Solides Dissous.

Liste des figures

Figure 1 : Structure moléculaire de l'eau	5
Figure 2 : pH de l'eau	5
Figure 3 : cycle général de l'eau	9
Figure 4 :Domaines d'application des algues microscopiques	20
Figure 5 : Carte de la situation géographique de la wilaya de Mila.....	30
Figure 6 : Situation du bassin Kebir-Rhmel.....	31
Figure 7 :Carte de situation géographique de Barrage de Béni Haroun.....	32
Figure 8 :Barrage de Beni Haroune.....	32
Figure 9 :Barrage de Beni Haroune 2020.....	33
Figure 10 :Réseau hydrographique du bassin versant de Beni Haroun Mila	34
Figure 11 :Réseau hydrographique du barrage Beni Haroun.	35
Figure 12 :Carte simplifié des étages bioclimatique nord-est d'Algérie.....	38
Figure 13 :Barrage Beni Haroun.	39
Figure 14 :Appareil de mesure du pH (pH-mètre de terrain).	39
Figure 15 :Appareil de mesure de la salinité et température - (multi-paramètres).	40
Figure 16 :Appareil de mesure de la conductivité et TDS (multi-paramètres) de terrain.	40
Figure 17 :Filet à plancton	45
Figure 18 :microscope (Brinoculaireoptika).	46
Figure 19 :solution échantillon du phytoplancton.....	47
Figure 20 :cellule de Malassez.	47
Figure21: Variations des Températures d'eau dans le barrage de Beni Haroun	50
Figure22:Variations du Turbidité dans le barrage de Beni Haroun	51
Figure23 :Variations du pH dans le barrage de Beni Haroun	53
Figure 24:Variations des Taux des sels dissous (TDS) dans le barrage de Beni Haroun	54
Figure 25 :Variations d'Oxygène dissous (O ₂) dans le barrage de Beni Haroun	56
Figure 26 :Variations des Conductivité dans le barrage de Beni Haroun	57

Figure 27 :Variations de Salinité dans le barrage de Beni Haroun	58
Figure28 :Variations des Nitrites (NO_2) dans le barrage de Beni Haroun	59
Figure29:Variations des Phosphates (PO_4) dans le barrage de Beni Haroun	60
Figure30 :Variations de Silicium ($\text{Si}(\text{OH}_4)$) dans le barrage de Beni Haroun	61
Figure31:Variations d'Ammonium (NH_4) dans le barrage de Beni Haroun	63
Figure32:Variations des Sulfates (SO_4) dans le barrage de Beni Haroun	64
Figure33 :Variations des Nitrates (NO_3) dans le barrage de Beni Haroun.....	65
Figure34:Variations de Sodium (Na) dans le barrage de Beni Haroun.....	66
Figure35:Variations de Chlorure (Cl) dans le barrage de Beni Haroun.....	68
Figure36 :Variations de Rapport (SO_4/Cl) dans le barrage de Beni Haroun.....	69
Figure 37 :Variations d'Alcalinité totale (TA) dans le barrage de Beni Haroun	70
Figure 38 :Variations d'Alcalinité totale corrigée (TAC) dans le barrage de Beni Haroun	71
Figure39 :Variations d'Azote inorganique dissous (TAC) dans le barrage de Beni Haroun...	72
Figure40:Variations du Rapport N/P (azote/phosphore) dans le barrage de Beni Haroun	73
Figure41 :Variations du Total des nutriments (NTU) dans le barrage de Beni Haroun	75
Figure42 :Variations du Rapport (Si/N) dans le barrage de Beni Haroun	76
Figure43 :Variations de l'Indice de minéralisation dans le barrage de Beni Haroun	77
Figure44:Variations du Rapport ($\text{O}_2/\text{Turbidité}$) dans le barrage de Beni Haroun.....	78
Figure45 :Cercles des corrélations d'Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physicochimiques dans le barrage de Beni Haroun	84
Figure46:Projections des stations d'Analyse en Composantes Principales (ACP) selon les paramètres physicochimiques dans le barrage de Beni Haroun	85
Figure47 :Richesse spécifique du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun	88
Figure48:Abondance relative des genres identifiés dans le barrage de Beni Haroun	89
Figure49 :Nombres des individus des genres identifiés dans les stations (barrage de Beni Haroun 2025).....	89
Figure50 :Nombres des individus des genres identifiés dans les stations (barrage de Beni Haroun 2025).....	90

Figure51 :Fréquence d'occurrence des genres identifiés dans le barrage de Beni Haroun.....	91
Figure52:Fréquence (Présence/absence) des genres identifiés dans le barrage de Beni Haroun	92
Figure53 :Indice de diversité (Shannon) du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun..	93
Figure54 :Indices écologique du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun.....	94
Figure55 :Matrice des corrélations paramètres physicochimiques et phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun.....	95
Figure56 :Corrélations significatives entres paramètres physicochimiques et phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun	96

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principales différences entre les eaux de Surface et les eaux Souterraines...	11
Tableau 2 : Tableau des caractéristiques de différentes classes phytoplanctonique.....	15
Tableau 3 : Statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des eaux dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025	79
Tableau 4 : Normes des paramètres physicochimiques des eaux dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025	81
Tableau 5 : Composantes Principales (ACP) des paramètres physicochimiques des eaux dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025	83
Tableau 6 : Liste taxonomique des genres identifiés dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025	87

INTRODUCTION

Introduction

L'eau constitue l'un des éléments les plus essentiels à la vie sur Terre, jouant un rôle central dans le maintien des écosystèmes et de la biodiversité. Les milieux aquatiques, qu'ils soient continentaux ou marins, abritent une diversité biologique exceptionnelle et fournissent des services écosystémiques indispensables au bien-être humain **(MEA, 2005)**. Ces services incluent la régulation du climat, la purification naturelle des eaux, le soutien aux activités de pêche et d'agriculture, ainsi que des valeurs culturelles et récréatives importantes. Cependant, selon le rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau **(WWDR, 2023)**, ces écosystèmes font face à des menaces croissantes liées aux activités humaines : pollution chimique, surexploitation des ressources, introduction d'espèces invasives et modifications physiques des habitats.

La construction de barrages et de réservoirs artificiels représente l'une des interventions humaines les plus significatives sur les systèmes aquatiques naturels. Bien que ces infrastructures répondent à des besoins cruciaux en termes d'approvisionnement en eau et de production énergétique, elles modifient profondément la dynamique écologique des cours d'eau **(Nilsson et al., 2005)**. Les impacts incluent la fragmentation des habitats, l'altération des régimes hydrologiques naturels et des changements dans la composition des communautés biologiques. Dans ce contexte, il devient impératif d'étudier ces systèmes artificiels pour mieux comprendre leur fonctionnement écologique et développer des stratégies de gestion permettant de concilier les besoins humains et la préservation de l'environnement.

En Algérie, pays marqué par un climat semi-aride à aride sur une grande partie de son territoire, les barrages constituent une composante essentielle de la politique de sécurité hydrique. Le pays dispose actuellement d'un parc de plus de 80 grands barrages d'une capacité totale de stockage dépassant les 8 milliards de mètres cubes **(ANBT, 2021)**. Parmi ces infrastructures, le barrage de Béni Haroun, situé dans la wilaya de Mila, représente le plus important réservoir du pays avec une capacité de 2,5 milliards de m³. Mis en service en 2007, ce barrage joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable de plusieurs wilayas du Nord-Est algérien et dans l'irrigation de vastes périmètres agricoles **(MRE, 2020)**. Cependant, comme le souligne Djebbar (2019) dans son analyse des systèmes hydrauliques algériens, cette dépendance croissante vis-à-vis des barrages s'accompagne de défis majeurs en termes de gestion durable. Les problèmes récurrents incluent l'envasement accéléré des retenues (avec des taux pouvant atteindre 1% de la capacité annuelle), les conflits

d'usage entre différents secteurs économiques, et les impacts écologiques sur les écosystèmes aquatiques en aval.

Les réservoirs de barrages présentent des caractéristiques écologiques particulières qui les distinguent à la fois des lacs naturels et des rivières. Comme le décrivent **Thornton et al. (1990)** dans leur ouvrage de référence sur l'écologie des réservoirs, ces systèmes hybrides sont marqués par :

- Une forte variabilité hydrologique liée aux opérations de gestion (lâchers d'eau contrôlés)
- Des processus de stratification thermique souvent plus marqués que dans les lacs naturels
- Des temps de renouvellement de l'eau généralement plus courts
- Des apports importants en sédiments et nutriments depuis le bassin versant

Cette recherche vise à combler ce manque de connaissances à travers quatre objectifs principaux :

- Caractériser la variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques dans différentes zones du réservoir
- Analyser la composition, la structure et la dynamique des communautés phytoplanctoniques
- Évaluer les relations entre les facteurs abiotiques et les caractéristiques du phytoplancton
- Proposer des recommandations pour une gestion écologiquement durable du réservoir
- Justification du choix du phytoplancton

Cette étude propose une approche intégrée pour évaluer l'état écologique du barrage de Béni Haroun à travers l'analyse des paramètres physico-chimiques et des communautés phytoplanctoniques. En combinant des méthodes de terrain rigoureuses et des analyses statistiques avancées, cette recherche visera à établir des relations causales entre les facteurs environnementaux et les réponses biologiques.

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE

BIBLIOGRAPHIE

Partie 1 : Généralité sur l'eau

1. Définition de l'eau

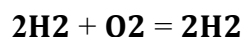
L'eau, élément vital à la préservation de la vie, se trouve abondamment à la surface de la Terre et revêt un rôle fondamental dans la composition organique des êtres vivants et des végétaux. En perpétuel mouvement, elle circule à travers la planète sous ses trois états : solide, liquide et gazeux (**Roux, 1995**). Sous l'effet de l'énergie solaire, elle s'évapore et participe à l'évapotranspiration. Les précipitations ainsi que les flux souterrains et de surface font partie intégrante de ce processus cyclique.

La problématique de l'eau englobe à la fois sa qualité et sa quantité, nécessitant une gestion efficace de la ressource et la lutte contre la pollution. Pour être acceptée par la population et garantir la sécurité du consommateur ainsi que la pérennité des réseaux de distribution, une eau de qualité physico-chimique et biologique irréprochable est indispensable (**Roux, 1995**).

L'eau se manifeste dans l'écosphère sous trois états : solide, liquide et gazeux, en fonction des variations de température et de pression.

La molécule d'eau, unité fondamentale, conserve toutes les propriétés physiques et chimiques de cette substance essentielle à la vie. Composée d'un atome d'oxygène relié à deux atomes d'hydrogène, elle représente le niveau de base de l'eau, atteint par des divisions successives.

L'eau est l'un des composés chimiques les plus remarquables, dotée de propriétés physico-chimiques uniques. Sa formule chimique, H_2O , est constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène disposés en V inversé, avec un angle de 105° .



2. Propriétés des eaux

2.1. Propriétés chimiques

En chimie, l'eau est également désignée sous le nom de H_2O . Sa formule moléculaire est constituée d'hydrogène et d'oxygène (**fig. 1**). Bien que la représentation de l'eau par une "tête de Mickey" soit largement reconnaissable, cette connaissance commune a nécessité du temps pour émerger en raison de controverses et d'obstacles rencontrés (**Dumon, 2021**).

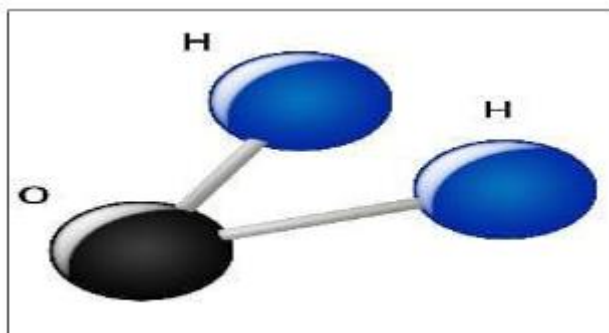


Figure 1 : Structure moléculaire de l'eau (Khoubache et Laouar, 2006).

L'eau peut être décomposée en ions protons H^+ et en ions hydroxydes OH^- , ce qui est mesurable par le pH, une échelle allant de 0 à 14 où un pH de 7 est considéré comme neutre

(fig. 2). En raison de ses propriétés chimiques, l'eau joue un rôle crucial dans les réactions impliquant des substances chargées électriquement. De plus, elle sert de solvant pour des agents corrosifs tels que les acides ou le dioxyde de carbone dissous, qui se transforment en acide faible capable de dissoudre des substances telles que le calcaire (Cieau, 2023). L'eau pure est neutre, avec un pH proche de 7,0 à 25°C. Les précipitations normales ont un pH d'environ 5,6 (légèrement acide) en raison du dioxyde de carbone atmosphérique. Les plages de pH recommandées pour l'eau potable sont de 6,5 à 8,5 pour un usage domestique et pour le bien-être des organismes vivants (Cieau, 2023).

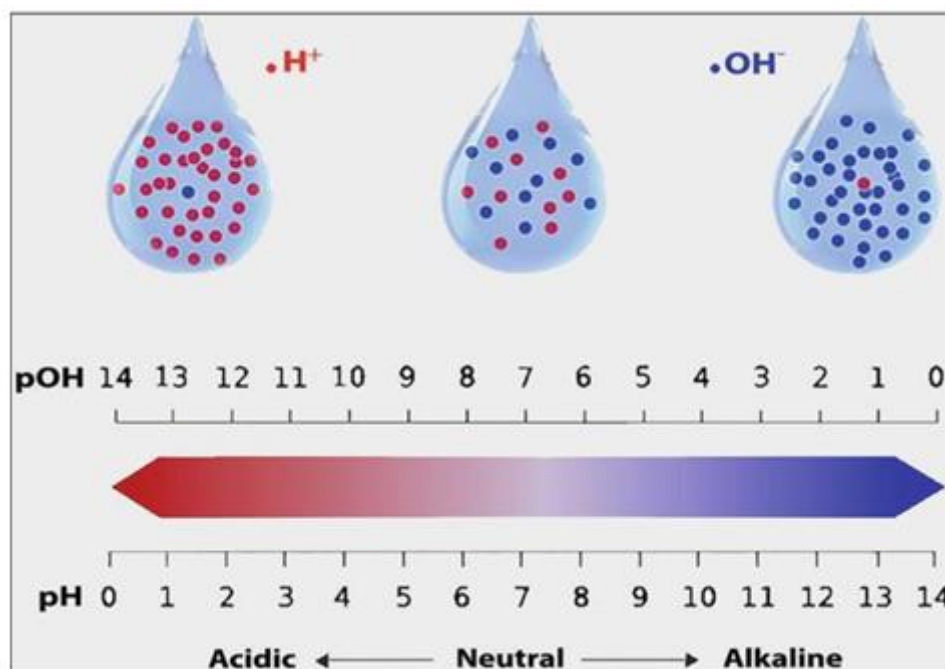


Figure 2 : pH de l'eau (Hassan Omar, 2019).

2.2. Propriétés physiques

Les propriétés physiques de l'eau la distinguent des autres liquides. Contrairement à ces derniers, elle présente une structure organisée grâce aux liaisons hydrogène entre ses molécules, ce qui lui confère des caractéristiques uniques. Selon **Philippe (2014)**, voici quelques paramètres physiques de l'eau :

2.2.1. Point d'ébullition

Les liaisons hydrogène entre les molécules d'eau nécessitent une grande quantité d'énergie pour être rompues, ce qui explique pourquoi l'eau a un point d'ébullition élevé par rapport à sa masse molaire. Cette caractéristique est essentielle pour maintenir une phase liquide à des températures habitables sur Terre, favorisant ainsi l'émergence et le maintien de la vie.

2.2.2. Viscosité

La viscosité de l'eau varie en fonction de sa composition chimique et de sa température, ce qui peut rendre deux eaux non miscibles. Cette propriété est cruciale pour la circulation des courants océaniques qui influent sur le climat planétaire.

2.2.3. Solvant

L'eau est un solvant essentiel sur Terre, dissolvant minéraux et substances organiques rencontrées sur son chemin. La teneur en sels dissous dans l'eau varie selon son origine, allant de quelques grammes par mètre cube pour l'eau de pluie à plusieurs milliers de grammes par mètre cube pour l'eau de mer.

2.2.4. Tension superficielle

L'eau présente une tension superficielle élevée, favorisant la formation de gouttes et l'ascension capillaire.

2.2.5. Chaleur spécifique

L'eau a une chaleur spécifique élevée, ce qui signifie qu'elle absorbe et libère une grande quantité d'énergie pour changer de température.

2.2.6. Chaleur latente

Les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation de l'eau sont élevées, contribuant à refroidir continuellement les océans par évaporation.

2.2.7. Capacité thermique

L'eau possède une capacité thermique élevée parmi les fluides, agissant comme un tampon contre les variations de température.

2.2.8. Densité maximale

L'eau atteint sa densité maximale à +4°C, ce qui est crucial pour le brassage des eaux dans les lacs et autres masses d'eau.

2.2.9. Transparence

L'eau est transparente dans le spectre visible, mais absorbe le rayonnement infrarouge, ce qui explique le réchauffement des eaux superficielles.

2.3. Propriétés électriques

L'eau présente des propriétés électriques remarquables en raison de sa capacité à dissocier les sels ioniques. Toutefois, à température ambiante, l'eau pure agit comme un isolant électrique car elle ne contient pas suffisamment d'ions pour permettre une conduction électrique significative (Nave, 2020).

Les paramètres électriques des eaux comprennent la conductivité électrique, la résistivité électrique, la permittivité diélectrique, la capacité électrique et la polarisabilité électrique. Voici quelques paramètres clés :

2.3.1. Conductivité électrique

La conductivité électrique de l'eau dépend de sa concentration en ions et peut varier de quelques microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) pour l'eau pure à plusieurs millisiemens par centimètre (mS/cm) pour l'eau de mer (Nave, 2020).

2.3.2. Résistivité électrique

La résistivité électrique est l'inverse de la conductivité électrique. Elle est exprimée en ohms-centimètres ($\Omega\cdot\text{cm}$) ou en ohms-mètres ($\Omega\cdot\text{m}$) et indique la capacité de l'eau à résister au passage d'un courant électrique (Nave, 2020).

2.3.3. Permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique mesure la capacité de l'eau à stocker de l'énergie électrique dans un champ électrique. Sa valeur dépend de la fréquence du champ électrique et de la concentration en ions dans l'eau (Nave, 2020).

2.3.4. Capacité électrique

La capacité électrique évalue la quantité d'énergie électrique stockée dans l'eau soumise à un champ électrique. Elle dépend de la permittivité diélectrique de l'eau et de la configuration de l'interface entre l'eau et le matériau diélectrique (Nave, 2020).

2.3.5. Polarisabilité électrique

La polarisabilité électrique mesure la capacité de l'eau à se polariser en réponse à un champ électrique. Sa valeur dépend de la polarisabilité intrinsèque de l'eau (Nave, 2020).

2.4. Propriétés biologiques

Un indicateur crucial de la qualité de l'eau réside dans la présence ou l'absence d'organismes vivants. Les biologistes peuvent étudier la diversité des espèces de poissons et d'insectes dans les eaux naturelles pour évaluer cette qualité, en se basant notamment sur un indice de diversité des espèces. Ainsi, un écosystème aquatique abritant un grand nombre d'espèces équilibrées est considéré comme sain. Certains organismes peuvent servir d'indicateurs de la présence de polluants, leur tolérance à un polluant spécifique étant connue (Hassan Omar, 2019).

3. Cycle naturel de l'eau

Le cycle naturel de l'eau peut être conceptualisé comme un flux continu au sein d'un système en circuit fermé. Une représentation simplifiée de ce circuit implique le mouvement de l'eau des océans vers l'atmosphère et les terres, puis des terres vers les océans. Cette dynamique cyclique est communément désignée sous le terme de "cycle de l'eau" (Anctil et al., 2013).

Essentiellement, le cycle de l'eau (**fig. 3**) constitue l'un des éléments fondamentaux de la régulation énergétique globale de la planète, impliquant la terre, les océans et l'atmosphère (Roche et al., 2012). Schématiquement, l'eau circule entre trois principaux réservoirs : l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère. Sous l'effet du rayonnement solaire, la surface terrestre chauffe l'hydrosphère, provoquant son évaporation et enrichissant l'atmosphère en vapeur d'eau. Lorsque cette vapeur d'eau se refroidit et se condense, elle retombe sous forme de précipitations sur la lithosphère.

Une partie des précipitations ruisselle à la surface, alimentant les cours d'eau et les lacs, où elle est ensuite soit évaporée, soit infiltrée dans le sol. Les eaux infiltrées sont partiellement absorbées par la végétation, puis libérées dans l'atmosphère par transpiration.

Une autre partie s'accumule dans les nappes phréatiques, formant des réserves souterraines qui, à leur tour, alimentent les sources émergeant à la surface et ainsi perpétuent le cycle (Raven et al., 2009).

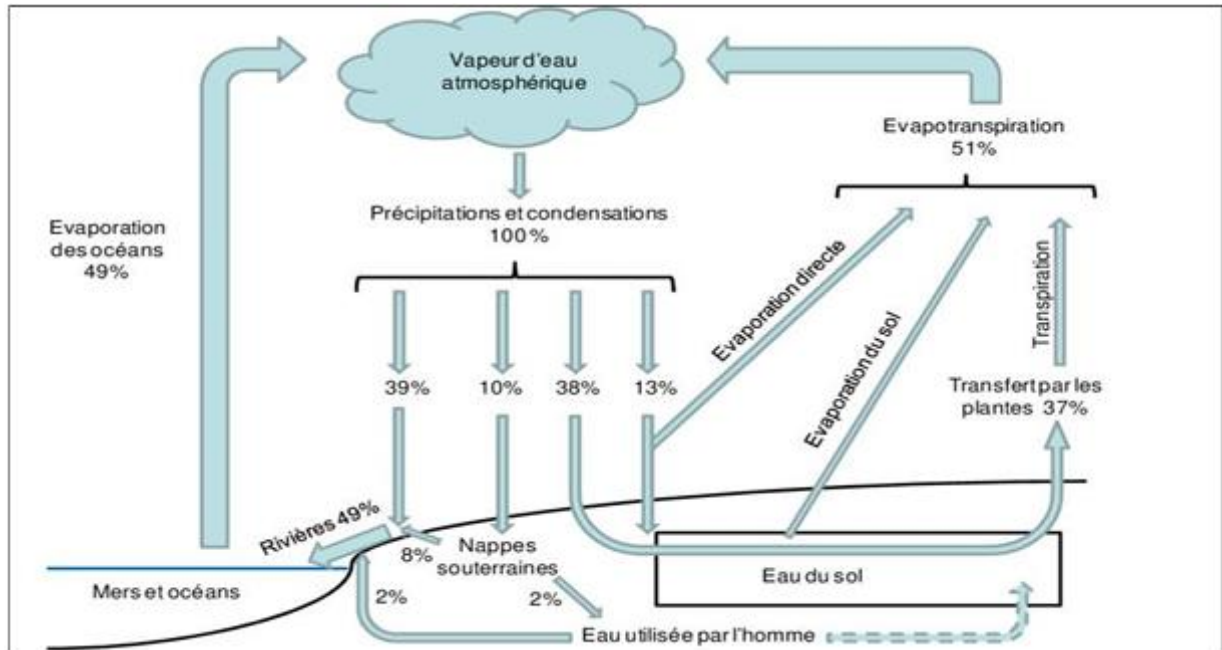


Figure 3 : cycle général de l'eau (Juery, 2002)

4. Ressources hydriques naturelles

L'homme recourt généralement, pour satisfaire ses propres besoins (production d'eau pour la consommation humaine) et permettre l'usage de l'eau dans ses diverses activités industrielles et agricoles, à deux types de ressources naturelles :

- Les eaux superficielles ou de surface (rivières, fleuves et lacs...).
- Les eaux souterraines.

L'eau à l'état naturel, superficielle ou souterraine, n'est jamais « pure » ; c'est un milieu vivant qui se charge très rapidement de divers éléments en contact des milieux qu'elle traverse sur lesquels elle ruisselle.

Ces éléments peuvent être présents dans l'eau sous trois états (gaz, solide, liquide), posséder un caractère organique ou minéral et à l'état particulaire à voire des dimensions très variables (MerouanietBouguedaha, 2013).

4.1. Eaux superficielles

Elles sont constituées par toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents, elles ont pour origine soit les eaux de ruissellement, soit les nappes profondes dont l'émergence constitue une source de ruisseaux puis de rivière. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisées par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (étangs et lacs) ou artificielles (retenues, barrages) caractérisées par une surface d'échange eau-atmosphère quasiment immobile. La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. Par échange à la surface eau-atmosphère, l'eau va se charger en gaz dissous (O_2 , N_2 , CO_2) (Sari, 2014).

4.2. Eaux souterraines

Les eaux qui ne sont ni évaporées, ni retournées à la mer par ruissellement s'infiltrent dans le sol et le sous-sol et s'y accumulent pour constituer les eaux souterraines. La pénétration et la rétention des eaux dans le sol dépendent des caractéristiques des terrains en cause et notamment de leur structure qui peut permettre la formation de réservoirs aquifères appelés nappes (Merouani et Bouguedaha, 2013).

4.3. Eaux de mers et océans

Les mers et les océans sont d'immenses réservoirs d'eau, représentant près de 97 % du volume total d'eau sur la planète (Brière, 2000).

5. Les caractéristiques des eaux superficielles et les eaux Souterraines

Les différentes caractéristiques des deux types d'eau superficielles et souterraines seront présentées dans le tableau 01.

Tableau 1 : Les principales différences entre les eaux de Surface et les eaux Souterraines
(Merouani et Bouguedaha, 2013).

Caractéristique	Eau de surface	Eau de souterraine
Température	Variable selon la saison	Relativement constant
Turbidité, MES	Variable parfois élevée	Faible ou nulle
Minéralisation globale	Variable en fonction des terrains, des précipitations	Sensiblement constante en générale nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
Fe ²⁺ et Mn ²⁺	Généralement absent sauf en profondeur des pièces d'eaux en état d'eutrophisation	Généralement présente
Couleur	Liée surtout aux MES Sauf dans les eaux très douces et acides	Liée surtout aux matières en solutions (acides humiques)
CO ₂ agressif	Généralement absent	Souvent présent en grand Quantité
O ₂ dissous	La plus souvent au voisinage de la saturation	Absent la plupart du temps
H ₂ S	Généralement présent	Souvent présent
NH ₄	Présent seulement dans les eaux	Présent fréquemment sans être un indice systématique de pollution bactérienne.
Nitrate ; Nitrite et silice	Peu abondant en générale	Teneur souvent élevée
Micropolluant minéraux et organique	Présent dans les eaux de payes développées, mais susceptible de disparaître rapidement après suppression des sources	Généralement absents mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps

Partie II : Généralités sur plancton

1. Rappels de notion sur les algues

Les phytoplanctons ensemble des algues microscopiques vivant dans l'épaisseur de la colonne d'eau, d'un milieu aquatique, où la lumière est suffisante pour faire de la photosynthèse. Des chlorophycées, des cyanobactéries et des diatomées sont des exemples d'algues pouvant composer le phytoplancton.

L'Algue est un végétal primitif non vasculaire retrouvé en milieu aquatique ou humide. Les algues sont plus évoluées que les cyanobactéries. La plupart des algues sont microscopiques.

Certaines sont macroscopiques, donc visibles à l'œil nu.

Les algues d'eau douce sont en majorité microscopiques. Cela signifie qu'une seule de ces algues, soit un individu, ne se voit pas à l'œil nu. Les algues microscopiques qui vivent librement dans l'eau constituent le phytoplancton (**Blais, 2008**).

Les algues sont des végétaux aquatiques primitifs qui vivent naturellement dans nos plans d'eau. Ces organismes sont, contrairement aux plantes aquatiques, dépourvus de véritables feuilles, tiges et racines.

Les Phytoplanctons se sont des algues en suspension dans l'eau, qui flottent et dérivent librement, servant de nourriture pour la faune aquatique (constituent le premier maillon du réseau alimentaire) (**Camille, 2005**)

2. Phytoplancton

2.1. Généralité sur les phytoplanctons

Le mot vient du grec « phyton » plante et « planktos » errant (**Groga, 2012**), le plancton végétal, ou phytoplancton, est l'ensemble des algues microscopiques formées d'une seule cellule (microalgues). Bien qu'elles soient unicellulaires, les microalgues présentent une grande diversité de taille, de couleur et de forme qui peuvent être très élaborées (**Mollo et Noury, 2013**). On retrouve presque dans tous les écosystèmes aquatiques (**Sournia, 1986**).

On distingue ainsi des espèces d'eaux froides, d'eaux tempérées et d'eaux chaudes intertropicales, et celles qui se retrouvent dans l'eau douce, saumâtre ou salée. Quelques espèces sont recensées dans les eaux thermales tandis que d'autres tolèrent les très basses températures des lacs arctiques et antarctiques (**Skulberg, 1996**).

Caractérisés par la présence des pigments chlorophylliens dont majoritairement la chlorophylle a. Ces microorganismes sont qualifiés de thallophytes, c'est à dire dépourvus des tiges, des racines et des vaisseaux conducteurs. Ils sont localisés dans les couches superficielles éclairées des étendues d'eau, soit généralement de la surface à 100 m de profondeur (pour les mers). En effet leur métabolisme est dominé par le mode de vie autotrophe basé sur la photosynthèse (besoin de lumière) qui est la source principale voire unique de leur énergie et permettant la constitution des molécules pour les cellules (**Douta et Feuillade, 1995**).

Ne représente qu'1% de la biomasse d'organismes photosynthétiques sur la planète mais assure 40% de la production primaire annuelle (**Chisholm, 1995**).

Leur mode de vie peut être pélagique ou benthique (**Sournia, 1986**) regroupe deux types d'organismes qui diffèrent au niveau cytologique essentiellement par la présence 'eucaryotes' ou non 'procaryotes' d'un noyau Cellulaire (**Prescott et al., 2003**).

Le phytoplancton comprend des milliers d'espèces se répartissant en plusieurs groupes : algues bleues ou Cyanobactéries, Diatomophycées, Chrysophycées, Chlorophycées et Dinoflagellés (**Mollo et Noury, 2013**).

2.2. Définition du phytoplancton

Le phytoplancton, dérivé du grec phyton signifiant plante et planktos pour errant, englobe l'ensemble des micro-organismes photosynthétiques flottant librement dans la colonne d'eau, constituant ainsi le plancton végétal. Ces organismes se présentent sous forme de cellules, colonies ou filaments, caractérisés par leur incapacité à nager de manière autonome, dépendant plutôt des mouvements de leur environnement aquatique, ou par une motilité restreinte pour ceux dotés de flagelles ou de cils (**Zubkov et Taran, 2008**).

La photosynthèse représente la principale voie d'acquisition d'énergie pour ces organismes, combinant des modes de nutrition autotrophe et phagotrophe, ce qui les classe comme organismes "mixotrophes". De plus, de nombreuses cellules phytoplanctoniques possèdent des capacités hétérotrophes, utilisant des matières organiques comme source d'énergie ou même ingérant des bactéries.

La diversité morphologique du phytoplancton est étroitement liée à son adaptation à la mobilité, notamment en ce qui concerne la flottaison et les mouvements verticaux. La chlorophylle, pigment prédominant impliqué dans la photosynthèse, est l'un des pigments assimilateurs présents chez ces organismes. Le phytoplancton se trouve généralement dans la

couche supérieure éclairée des masses d'eau, connue sous le nom de zone euphotique (Zubkov et Taran, 2008).

2.3. Reproduction

Les micro-organismes du phytoplancton ont une aptitude à se multiplier rapidement et leur cycle de vie est de courte durée (Abdennadher, 2014).

- **Reproduction asexuée** : Il existe trois types de reproduction chez elle : la fragmentation, où le thalle se divise en deux parties, chacune donnant naissance à un nouveau thalle ; la sporulation, où des spores se forment soit dans les cellules végétatives ordinaires, soit dans des structures spécialisées appelées sporanges ; et la scission binaire, qui implique la division du noyau puis du cytoplasme (Cavalla, 2000).

- **Reproduction sexuée** : En reproduction sexuée, les gamètes mâles et femelles fusionnent pour former un zygote diploïde. Les oeufs se développent soit dans des cellules réceptrices similaires aux cellules somatiques (comme chez *Spirogyra*), soit dans des cellules végétatives femelles peu modifiées appelées oogones (chez *Fucus*). Les spores sont générées dans des structures masculines spécialisées connues sous le nom d'anthéridies (Cavalla, 2000).

2.4. Les conditions de croissances phytoplancton

- L'eau, le pH et la température optimale

Presque toutes les algues vivent dans des environnements humides. Quelques algues, qui vivent en symbiose avec des lichens, sont protégées contre la dessiccation et peuvent survivre à une sécheresse extrême.

La plupart des algues tolèrent des valeurs de pH larges ; certaines se sont adaptées et peuvent habiter dans des environnements très acides comme celles vivants dans des sources chaudes riches en sulfure. Les algues à leur phase latente sont capables de survivre à 100 °C pendant plusieurs heures.

D'autres espèces peuvent croître et se reproduire à -2 °C dans la mer, et certaines algues ont une croissance optimale entre 1 °C et 5 °C. La plupart des algues ont une température optimale de croissance entre 5 °C et 50 °C (Nicklin et Graeme-Cook, 1999)

3. Les Classes des micro-algues

Les organismes planctoniques sont fréquemment divisés en se basant sur des critères taxinomiques, sur leur rôle fonctionnel dans l'écosystème ou encore en se basant sur des aspects méthodologiques. L'autoécologie étudie les rapports d'une seule espèce avec son milieu : elle définit les limites de tolérance et les optimums vis-à-vis des divers facteurs écologiques et examine l'action du milieu sur la morphologie, la physiologie et le comportement éventuel. Peu d'espèces planctoniques peuvent en fait être considérées comme ayant une autoécologie bien connue. Pour la majorité des espèces, les informations sur les cycles de développement, les préférences environnementales ou même leur position dans le réseau trophique sont largement incomplètes et généralement appréhendées de façon indirecte. Toutes les classifications du plancton souffrent, on le verra, de ce manque de connaissances biologiques de base (Quéguiner, 2013) (Tab., 1.1).

Tableau 2 : Tableau des caractéristiques de différentes classes phytoplanctoniques (Cadier, 2016).

Domaine	Embranchement	Classe	Caractéristiques
Procaryote	Cyanophyta	Cyanophyceae 	Pigments : Chlorophylle a, Phycobilines (phycocyanine, allophycocyanine, phycoerythrine). Substances de réserves : glycogène, cyanophycine. Paroi cellulaire : peptidoglycane. Morphologie : unicellulaire, coloniale, filamenteuse. Reproduction : asexuée (fission binaire, fragmentation).

Eucaryote	Chlorophyta	Chlorophyceae 	Pigments : chlorophylle a et b, xanthophylles, lutéine, violaxanthine. Substances de réserves : amidon intraplastidial. Paroi cellulaire : principalement cellulose. Morphologie : unicellulaire, coloniale, filamenteuse, formes avec ou sans flagelles. Reproduction : asexuée (fission binaire), asexuée (isogamie, anisogamie et oogamie).
	Ochrophyta	Bacillariophyceae 	Pigments : chlorophylle a, c1, c2 et c3, xanthophylle, fucoxanthine, diatoxanthine, diadinoxanthine. Substances de réserves : Chrysolaminarines, lipides. Paroi cellulaire : siliceuse ornementée (frustule). Morphologie : pennée (symétrie bilatérale) ou centrique (symétrie radiale). Reproduction : asexuée (division cellulaire) et sexuée (oogamie chez les centriques, isogamie chez les pennées).
	Ochrophyta	Chrysophyceae 	Pigments : chlorophylle a, c1 et c2, xanthophylle, fucoxanthine. Substances de réserves : Chrysolaminarines, lipides. Paroi cellulaire : écaille de silice et cellulose. Morphologie : Unicellulaire ou coloniale (rarement filamenteuse), cellules nues ou enveloppées par une structure protectrice (lorique), 1 ou 2 flagelles. Reproduction : asexuée (fission binaire, zoosporulation) et sexuée (isogamie).

	Cryptophyta	Cryptophyceae 	Pigments : chlorophylle a et c2, phycobilines : phycocyanine, phycoerythrine. Substances de réserves : amidon extraplastidial. Paroi cellulaire : généralement absente. Morphologie : cellules nues, ovales et aplaties, avec 2 flagelles inégaux. Reproduction : Principalement asexuée (fission binaire).
	Dinophyta	Dinophyceae 	Pigments : chlorophylle a et c2, xanthophylle ;péridininediadinoxanthine. Substances de réserves : amidon et lipide. Paroi cellulaire : si présente constituée decellulose. Morphologie : principalement unicellulaire,cellules nues ou renforcées par des plaques polygonales, avec 2 flagellesperpendiculaires. Reproduction : asexuée (fission binaire, formationd'aplanospores) et sexuée(isogamie, anisogamie)
	Ochromophyta	Xanthophyceae 	Pigments : chlorophylle a et c, caroténoïdes (β-carotène), xanthophylle (anthéroxanthine, lutéine époxyde, violaxanthine, diadinoxanthine). Substances de réserves : matière grasse et Chrysolaminarines. Paroi cellulaire : la membrane cellulaire est formée de deux pièces ; elle est ornée de scrobiculations (fossettes), régulièrement ordonnées en quinconce chez de nombreuses espèces. Morphologie : unicellulaires, coloniales ou filamenteuses avec deux flagelles inégaux. Reproduction : elle se fait par autosporulation, zoosporulation ou division végétative et sexuée par isogamie ou oogamie.

	Euglenozoa	Euglenophyta 	Pigment : chlorophylle a et b, caroténoïdes. Substances de réserves : le paramylon, substance glucidique non colorable par l'iode. Paroi cellulaire : la cellule est entourée d'une pellicule réfringente parcourue de fines striations qui dessinent une spirale sénestre. Cette pellicule est épaisse, mais déformable Morphologie : Une cellule fusiforme, légèrement arrondie vers l'avant, terminée par une courte pointe vers l'arrière, avec deux flagelles inégaux, avec un locomoteur plus long que la cellule. Reproduction : asexuée par fission binaire et rarement sexuée par isogamie.
--	------------	---	---

4. Ecologie et Habitat

Les organismes qui constituent le phytoplancton est d'une extrême plasticité écologique. Ces espèces très ubiquistes colonisent les biotopes terrestres et aquatiques (**Fogg et al., 1973**).

On le trouve aussi bien dans les eaux douces, marines que saumâtres (mélange d'eau douce et d'eau salée comme les estuaires). Les êtres planctoniques ont colonisé tous les milieux : la mer, les fleuves et ruisseaux, les lacs et étangs, les marais, les eaux souterraines, les gouttières, les fossés, les tourbières (**Mollo et Noury, 2013**).

Le plancton est également présent dans des endroits plus surprenants tels que les embruns, les mares, les lavoirs et les fontaines, on en trouve même dans les suintements de roches. Il se développe mieux dans les eaux plutôt calmes et riches en sels nutritifs : rivières, estuaires, marais (**Mollo et Noury, 2013**).

Ainsi, la concentration de phytoplancton est jusqu'à dix fois plus forte dans les eaux continentales qu'en haute mer (**Mollo et Noury, 2013**).

Certaines espèces vivent en association avec des animaux comme des protozoaires, des éponges ou des ascidies (endozoïques), ou avec des végétaux comme des fougères aquatiques ou des angiospermes (endophytiques) (**Couté et Bernard, 2001**).

En théorie, se développe de préférence au printemps et à l'automne, lorsque les conditions sont optimales. Aujourd'hui, ce rythme annuel est de moins en moins respecté en

raison de l'évolution du milieu (excès d'apports en nutriments, réchauffement climatique) et certaines espèces peuvent proliférer tout au long de l'année (**Mollo et Noury, 2013**).

5. Rôle fonctionnel du phytoplancton dans les écosystèmes

Le phytoplancton constitue la base principale de la chaîne alimentaire, est appelé « producteur primaire » car il a la capacité de transformer la matière inorganique en matière organique qui est consommable ensuite par les autres organismes vivants. Le phytoplancton nourrit un monde animal qui n'existerait pas sans lui, et en premier lieu le zooplancton (**Mollo et Noury, 2013**).

En effet il produit le carbone indispensable aux niveaux trophiques supérieur grâce à la photosynthèse (**Lakkis, 2011**).

Ce mécanisme qui, sous l'effet de l'énergie lumineuse, permet la production des glucides et la libération d'oxygène à partir d'eau et de dioxyde de carbone (**Suty, 2014**).

Par conséquent, les flux de matière au sein de l'écosystème sont contrôlés par les variations de la production biologique (**Gaillard, 2003**).

Par ailleurs le développement du plancton végétal dans un milieu y permet la vie des animaux marins dont il est l'aliment essentiel. Ces consommateurs sont le plancton animal (dont les larves des poissons, des crustacés et des coquillages) et les coquillages filtreurs. De plus, la production primaire (phytoplancton) puis secondaire (zooplancton) alimente la ressource (poissons, crustacés). C'est pourquoi les professionnels de la mer installent leurs exploitations ou choisissent leur zone d'activité dans ces endroits stratégiques où la nourriture est naturellement présente dans la mer. Ainsi, les lieux riches en plancton sont favorables aux:

- Élevages de coquillages ou de poissons : ostréiculture, mytiliculture, pisciculture...etc.
- Métiers de la pêche : pêche côtière ou hauturière et pêche à pied professionnelle de coquillages (tellines, coques, palourdes...etc.) (**Mollo et Noury, 2013**)

6. Importance du phytoplancton

Tous les organismes qui vivent dans l'eau, les animaux autant que les végétaux, peuvent être utilisés comme indicateurs de la qualité d'un environnement aquatique puisque tout changement de la qualité de l'eau provoque une perturbation de leurs biocénoses (**MATTHEWS et al.,1982**)

Parmi les organismes largement utilisés se trouvent les algues et plus particulièrement les Diatomés. Ces dernières sont considérées comme faisant partie des meilleurs bio-indicateurs (SCHOEMAN et HAWORTH 1986, ROUND 1991 et COX 1991).

De nombreux travaux cités par ANNVILLE et al (2001) ont associé des disparitions ou des modifications dans la composition des associations phytoplanctoniques avec le processus d'eutrophisation. Ces observations montrent que les espèces sont de bons indicateurs car elles répondant souvent bien aux changements de concentrations en nutriments.

Outre l'intérêt écologique considérable comme agents épurateurs des eaux usées, les algues microscopiques comme engrais biologique pour la fertilisation des sols pauvres, en particulier les sols sahariens squelettiques dont l'eau d'irrigation, ce qui engendre des conditions asphyxiantes très défavorables, ainsi l'apport d'algues microscopiques riches en azote à ce type de sol, peut corriger l'insuffisance en matière organiques.

Par ailleurs, ces mêmes algues représentent une source potentielle de protéines alimentaires non négligeable (50 à 60/du poids sec) pour l'homme et l'animal qu'il soit terrestre ou aquatique. En effet ces organismes sont considérés comme le premier maillon de la chaîne alimentaire (phytoplancton) pour les producteurs (poisson, crustacés). Elles représentent indéniablement le nutriment essentiel en aquaculture (croissance et développement de poissons). **fig1**

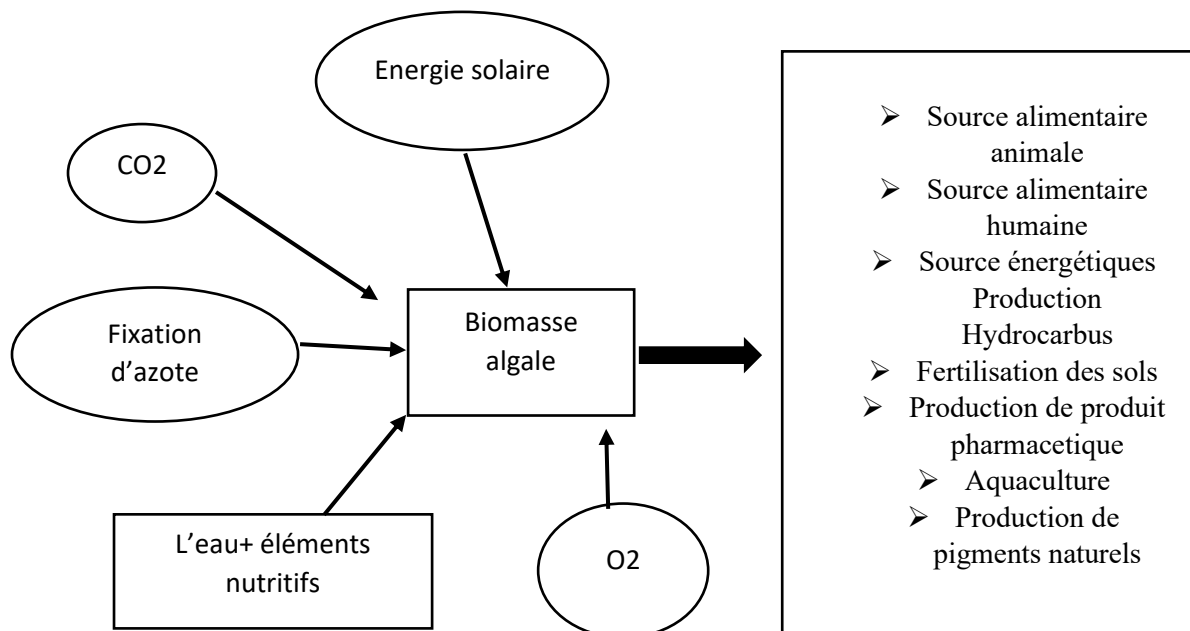


Figure 4 : Domaines d'application des algues microscopiques (CHADER et TOUZI, 2001)

7. Application des micro-algues

Les micro-algues planctoniques ont non seulement une grande importance dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, mais aussi un grand potentiel pour la production des composés intéressants pour l'alimentation humaine, l'aquaculture (**Rösch et Posten, 2012**).

Aussi dans tous les domaines de notre vie, bien-être (santé, beauté), ressource industrielle (**Mollo et Noury, 2013**).

7.1. Applications alimentaires

Les micro-algues constituent un réel apport nutritif. Ces microorganismes sont utilisés dans l'alimentation animale et humaine, et dans l'aquaculture (**Pulz et Gross, 2004**).

Actuellement, la plus connue dans ce domaine est une micro-algue appelée *Arthrospiraplatensis*, ou Spiruline, que l'on trouve comme complément à l'alimentation dans de nombreux pays. Le contenu élevé en protéines (entre 12 et 65 %) de plusieurs espèces de micro-algues est une des principales raisons pour les considérer comme une source non conventionnelle de protéines. De plus, grâce à leur capacité à synthétiser tous les acides aminés, elles représentent une source potentielle pour l'apport de ces molécules aux humains et aux animaux (**Becerra, 2009**).

La Diatomée *Odontellaaurita*, est également utilisée comme complément alimentaire en tant que source d'acides gras polyinsaturés (**Jiang et al., 1999**).

Le phytoplancton en tant que production primaire des milieux aquatiques est par ailleurs tout naturellement exploité comme ressources nutritive pour l'aquaculture (**Spolaore et al., 2006**).

Dans cette filière majeure de la production mondiale, les micro-algues sont utilisées directement pour subvenir aux besoins des stades larvaires des mollusques bivalves et des crustacés ou indirectement comme complément alimentaire et comme substrat pour le zooplancton, base alimentaire de nombreuses espèces aquacoles (**Muller et al., 2003**).

Par ailleurs, 30 % de la biomasse algale produite est aussi utilisée dans le cadre de la fabrication industrielle d'aliments pour les élevages d'animaux terrestres (volailles, porcs...etc.)(**Costa et al., 2011**).

7.2. Applications pharmaceutiques

Au vu de leur grande diversité biochimique, les micro-algues représentent une source intéressante des molécules bioactives et des toxines utilisables dans le développement des nouveaux médicaments (**Hoppe, 1979**).

Les extraits des micro-algues sont également utilisés par le secteur pharmaceutique, les principes actifs extraits des micro-algues sont utilisés comme anti-inflammatoire oesophagien, pour lutter contre l'embonpoint, pour leur effet laxatif ou encore pour les pansements, les micro-algues peuvent être utilisées dans une amélioration du confort des diabétiques (**Gana, 2014**).

Certains exo polysaccharides sécrétés par les micro-algues ont montré des capacités antivirales sur l'Herpès simplex virus type 1 (responsable d'infections buccales) ou bien le measles virus (responsable de la rougeole) ou encore l'Influenza virus A (responsable de grippe), et antiprolifératives sur des lignées cellulaires cancéreuses (**Laurienzo, 2010**).

Par ailleurs, des oligosaccharides extraits des micro-algues peuvent améliorer l'équilibre de la flore intestinale du colon, en favorisant la croissance des bactéries comme favorables pour la santé. Ces bactéries sont actuellement largement utilisées des préparations à base de lait peu caloriques, riches en vitamines et en minéraux (**Gana, 2014**).

7.3. Applications cosmétiques

Plusieurs espèces des microalgues sont exploitées industriellement dans le domaine cosmétique, principalement les deux espèces *Arthrospira* et *Chlorella* (**Stolz et Obermayer, 2005**).

Des extraits d'algues, ayant une activité antioxydante, sont exploités sur le marché dans la fabrication des produits de soin capillaire (**Pulz et al., 2004**), du visage et de la peau ainsi que dans les crèmes solaires. De même, la synthèse de protéines à partir de la souche *Arthrospira* entraîne une réparation des premiers signes de vieillissement de la peau alors que des extraits de *Chlorella vulgaris* permettent de stimuler la synthèse du collagène dans la peau induisant la réduction des rides (**Spolaore et al., 2006**).

Les pigments issus des micro-algues sont également utilisés dans le domaine cosmétique (**Del Campo et al., 2000**).

7.4. Applications environnementales

Au vu de leur capacité d'assimilation de nombreux nutriments nécessaires à leur croissance, les micro-algues représentent une solution intéressante pour éliminer ces éléments, elles sont également capables de fixer des métaux lourds. Elles sont ainsi les principaux éléments biologiques de certains systèmes de traitement des eaux municipales et industrielles (essentiellement traitement tertiaire) (**Aslan et Kapdan, 2006**). Les micro-algues ont des capacités d'absorption particulièrement intéressantes de l'azote et du phosphore pour la décontamination de milieux pollués et la lutte contre l'eutrophisation (**Bougaran et Saint-Jean, 2014**).

Certaines études ont eu recours à des algues vertes, principalement *Chlorella*, *Ankistrodesmus* et *Skeletonema*, pour les traitements des eaux usées issues d'usines de fabrication de pâte à papier ainsi que de production d'huile d'olive (**Munoz et Guieysse, 2006**).

8. Phytoplancton en relation avec les facteurs biotiques et abiotiques

On appelle facteur écologique tout éléments susceptibles d'agir sur les êtres vivants, au moins durant une partie de leur développement (**leveque, 2001**)

On distingue classiquement les facteurs biotiques et les facteurs abiotiques :

8.1. Relation avec les facteurs abiotiques

Les facteurs abiotiques jouent un rôle plus au moins décisif, suivant les périodes de l'année, dans les fluctuations de la composition et de l'abondance du phytoplancton. Parmi ces paramètres nous relaterons les plus importants :

8.1.1. La lumière

Qui dirige non seulement la photosynthèse mais aussi, selon sa quantité et de sa qualité, régit aussi une partie de sa croissance et, par conséquent, la structure de la communauté algale.

Ce facteur varie en fonction de l'heure du jour, les saisons et la couverture nuageuse, dans un système aquatique dont les caractères ne changent pas, la production phytoplanctonique est directement influencée par le degré d'ensoleillement durant les 48 heures précédentes. La qualité spectrale de la lumière conditionne fortement la production primaire en intervenant dans la stratification des organismes dans la colonne d'eau (**Robert et Catesson, 2000**).

En effet, le phytoplancton se développe en abondance dans la couche euphotique et se raréfie en profondeur **(Robert et Catesson, 2000)**.

Dans un milieu aquatique, les variations rapides de l'angle d'incidence de la lumière sous l'effet des vagues provoquent des fluctuations dans la pénétration des rayons lumineux **(Robert et Catesson, 2000)**

8.1.2. La température

Influence plusieurs paramètres physicochimiques de l'eau tels que les concentrations en oxygène dissous et en nutriments. En effet, elle est un stimulus des phénomènes d'accroissement, de la reproduction et du développement de la majorité des espèces végétales macro et microscopiques. la croissance phytoplanctonique se trouvera ralentie dans les eaux froides (écosystèmes des hautes latitudes) par rapport à des eaux plus chaudes (régions tempérées). L'élévation de la température de l'eau agit, positivement, sur la production primaire du phytoplancton en influençant le métabolisme des organismes par action sur la vitesse des réactions enzymatiques La température pourrait aussi provoquer le déclin des proliférations micro-algales dans le cas du réchauffement climatique **(Dhib, 2015)**.

8.1.3. La salinité

La salinité est un paramètre qui conditionne l'aire de répartition des espèces vivantes dans un milieu en fonction de leur préférendum (hormis les espèces euryhalines supportant de grandes amplitudes de salinité). Si la salinité varie, la survie des organismes sera fonction de leur tolérance. La salinité est un paramètre dépendant des volumes d'eaux douces et d'eau de mer introduits dans l'estuaire entraînant des variations longitudinales des teneurs. Ce facteur varie très rapidement en fonction : du cycle de marée, du coefficient de marée et du cycle hydrologique. La salinité influence également la densité des eaux entraînant un second gradient vertical à l'origine d'une stratification des eaux (principalement aux environs du front de salinité) **(Foussard et al., 2011)**.

Ainsi les fortes densités de salinité stimulent le développement du phytoplancton et augmentent la biomasse chlorophyllienne **(Dhib, 2015)**.

8.1.4. Le potentiel hydrogène

Doit être compris entre 5 et 8.5 dépassants cette fourchette, les espèces peuvent réguler leur croissance ou transformer même leur physiologie en développant ainsi un pouvoir de toxicité, dans les milieux très eutrophies, l'augmentation du pH entraîne une diminution de la

solubilité des bicarbonates dans l'eau pouvant créer une limitation de croissance du phytoplancton (Dhib, 2015).

8.1.5. Les nutriments

Les nutriments sont des éléments présents dans le milieu en faible quantité, mais nécessaires à la croissance et à la survie des algues. Dans le milieu naturel leur concentration va varier en fonction, des conditions environnementales ou des pollutions anthropogéniques.

Les nutriments tels que le carbone, l'azote et le phosphore jouent un rôle important dans le métabolisme cellulaire et la composition biochimique des micro-algues. Une altération de concentration en ces nutriments peut provoquer une teneur plus ou moins importante de lipides, de sucres ou des éléments tels que le β -carotène. (Richmond, 2007).

Des nombreuses études se sont penchées sur l'effet de la concentration en ces éléments dans le milieu de culture, la carence en azote augmente la teneur en lipides pour certaines espèces de micro-algues et pour d'autres, elle augmente la teneur en carbohydrates (Becker, 1994 ; Richmond, 2007).

Une augmentation de la concentration en azote dans le milieu entraîne une augmentation de la biomasse, de la quantité de protéines et de chlorophylle par cellule. Quant au phosphore, il est habituellement fourni sous forme d'orthophosphate et il joue un rôle important dans le transfert d'énergie et la biosynthèse des acides nucléiques dans les cellules. Comme l'azote, les carences en phosphore peuvent induire une augmentation de β -carotène ou d'astaxanthine (Sheehan et al., 1998 ; Richmond, 2007).

En outre, le phosphore est un élément essentiel pour la cellule, Il intervient au cours de nombreux processus métaboliques (Chen et al., 2011).

Il entre en jeu dans les chemins métaboliques régulant la division cellulaire, sa concentration cellulaire va donc avoir un impact direct sur la production de biomasse. Il est aussi nécessaire dans la cellule pour satisfaire les besoins énergétiques et de biosynthèse des organites (Moseley et al., 2006).

8.1.6. La concentration en chlorophylle(a)

La chlorophylle a est un pigment indispensable à la photosynthèse des algues, Son dosage sert à estimer la biomasse phytoplanctonique du milieu aquatique. Les concentrations en chlorophylle dans les eaux superficielles présentent une variabilité saisonnière, sur le développement phytoplancton qu'est en effet, tributaire de l'énergie lumineuse, de la

concentration en sels nutritifs, de la stabilité des masses d'eaux et de l'intensité de la consommation par le zooplancton (**Lorenzen, 1967**).

8.2. Relation avec les facteurs biotiques

Appelés aussi facteurs dépendants de la densité ; correspondant à l'ensemble des interactions entre individus (prédation, compétition, mutualisme...etc.) (**Leveque, 2001**).

Etendant sa définition (**Ramade, 2005**) réunit sous ce vocable la totalité des paramètres physico-chimiques ou biologiques qui découlent de l'existence de l'action des êtres vivants entre eux et sur les milieux. Cet auteur distingue :

- a) Les facteurs physico-chimiques d'origine biotique conséquences des activités métaboliques et par les sécrétions dans le milieu de substances favorables ou toxiques pour les autres espèces.
- b) Les facteurs trophiques de nature biologique, à l'exemple des sels nutritifs libérés dans les eaux (ou le sol) sous l'action de la décomposition.
- c) Les facteurs intra spécifiques, qui regroupent les interactions se déroulant à l'intérieur d'une même espèce (entre individus).
- d) Les facteurs interspécifiques, qui concernent les interactions entre populations d'espèces différentes (facteurs de prédation et de parasitisme) (**Leveque, 2001**).

9. Effets nuisibles du phytoplancton

Le phytoplancton représente un compartiment remarquable par le rôle qu'il joue, non seulement dans le milieu aquatique, mais aussi dans tous les domaines de notre vie : qualité d'environnement (oxygène), alimentation (poissons et fruits de mer), bien-être (santé, beauté), ressource industrielle, mais simultanément, elles peuvent provoquer un déséquilibre du milieu en s'y développant à outrance. De plus son déséquilibre joue un rôle d'alerte du mauvais état de la planète. Réduisant la variété et le nombre des espèces végétales et animales, l'érosion de la biodiversité est préjudiciable à tous les êtres vivants et peut entraîner des catastrophes en chaîne menant jusqu'à l'homme (**Mollo et Noury, 2013**).

Du fait de multiples problèmes liés à la toxicité potentielle de certaines espèces phytoplanctoniques (**Nasri et al., 2004**).

9.1. Risque sur la santé humaine

Certaines espèces phytoplanctoniques produisent des phycotoxines, qui sont accumulées par les organismes phytoplancton phages (**Gailhard, 2003**).

Les toxines des cyanobactéries sont essentiellement des endotoxines qui s'accumulent à l'intérieur des cellules algales. Elles agissent soit après ingestion de ces microalgues, soit après libération de la lyse algale (**Fremy et Lassus, 2001**).

L'ingestion des fruits de mer ayant concentré des toxines d'algues dans leurs tissus peut provoquer des symptômes neurologiques, digestifs et musculaires pouvant entraîner la mort.

En eau douce également, lorsque les conditions sont favorables, des microalgues toxiques prolifèrent, provoquant des morts massives d'animaux et pouvant nuire à la santé des baigneurs, les troubles allant de la simple affection dermatologique à des lésions neurologiques ou hépatiques irréversibles (**Fernandez, 2002**).

Deux espèces des Diatomées, du genre *Pseudo-Nitzschia*, productrices des toxines dites amnésiantes, prolifèrent épisodiquement sur nos côtes, infestant poissons et coquillages (toxiques à partir de 100 000 cellules par litre). Pour le consommateur, entre deux et vingt-quatre heures après ingestion, apparaissent vomissements et diarrhées, puis surviennent maux de tête et troubles de l'équilibre et de la vue (**Mollo et Noury, 2013**).

Deux espèces principales de Dinoflagellés sont redoutées du genre *Alexandrium* contient des toxines qui s'accumulent dans la chair des coquillages même si ces coquillages ne semblent pas perturbés par la présence de cette micro-algue toxique, ils sont néanmoins impropres à la consommation, entraînant chez l'homme des troubles gastro-intestinaux (**Mollo et Noury, 2013**).

9.2. Risque sur les écosystèmes aquatiques

Les liens entre les nutriments, l'eutrophisation, l'hypoxie et les proliférations d'algues nuisibles ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes marins sont multiples et difficiles à quantifier (**Puiz et al., 2008**).

Une telle prolifération d'une sorte de micro-algues porte le nom d'efflorescence ou de bloom et change souvent visuellement l'aspect de l'eau : eaux colorées ou mousses en surface.

À l'échelle visible, ce phénomène est comparable à celui des algues vertes qui envahissent les plages. En cas d'efflorescence, une espèce de phytoplancton se multiplie tellement qu'elle finit par occuper tout l'espace. Sa densité rend l'eau opaque et asphyxie le milieu. C'est ce

qu'on appelle l'eutrophisation de l'eau : une espèce domine et prive de nourriture et de lumière les autres phytoplanctons qui ne peuvent plus se développer. Cette perte de la diversité est problématique, en particulier, en ce qui concerne les espèces de plancton végétal « comestibles » comme les Diatomées (**Mollo et Noury, 2013**).

9.3. Risque sur les organismes marins

Si le phytoplancton ne concerne pas l'homme directement, son appauvrissement peut conduire, par l'intermédiaire du zooplancton permanent, à la chute de la variété des poissons et des fruits de mer composant son menu (**Mollo et Noury, 2013**).

Outre les effets indirects possibles des cyanobactéries sur le poisson à travers leur impact sur le zooplancton, il convient aussi de ne pas oublier que les périodes de blooms provoquent également des phénomènes d'anoxie dans le milieu qui peuvent avoir des conséquences mortelles pour les peuplements piscicoles (**Fremy et Lassus, 2001**).

Chez les crustacés, il a été observé que les toxines Cyanobactériennes s'accumulent principalement dans l'hépatopancréas. Ces toxines proviennent de la consommation des Cyanobactéries, mais aussi de l'ingestion directe des toxines libres dans l'eau. Comme les écrevisses ne semblent pas sensibles à ces toxines, elles peuvent accumuler ces métabolites et constituer, de même que les mollusques, une source de contamination importante pour les échelons trophiques supérieurs (**Fremy et Lassus, 2001**).

CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODE



1. Présentation de la zone d'étude

Notre étude a été menée au niveau du barrage de Beni Haroune, situé dans la wilaya de Mila, située dans le nord-est d'Algérie. Au cours de la période (janvier 2025 à Mai 2025).

1.1. Présentation de la wilaya de Mila

Située au cœur du nord-est algérien, la wilaya de Mila se caractérise par une remarquable diversité géographique et climatique (ANDI, 2013). Elle occupe une position stratégique entre les Hautes Plaines et les massifs montagneux, offrant un paysage contrasté composé de plaines fertiles et de reliefs escarpés. Riche en ressources naturelles, Mila bénéficie d'une couverture végétale variée et d'abondantes ressources hydriques, alimentées par de nombreux cours d'eau et lacs.

À une altitude moyenne de 464 mètres et distante de 73 kilomètres de la mer Méditerranée, la région se situe dans la partie orientale de l'Atlas tellien, chaîne montagneuse qui traverse le nord du pays d'ouest en est. La wilaya s'étend sur une superficie de 3 480,54 km², soit 0,14 % du territoire national, et compte une population estimée à 766 886 habitants, avec une densité de 220 habitants au km² (ANDI, 2013).

Mila est également reconnu pour son environnement verdoyant, son patrimoine historique à travers l'ancienne cité de Milev, ainsi que le majestueux barrage de Beni Haroun, ce qui en fait une région à forte vocation agricole. Elle est délimitée par six wilayas : Jijel au nord-ouest, Constantine au nord-est, Sétif à l'ouest, Skikda et Constantine à l'est, Oum El Bouaghi au sud-est, et Batna au sud (DTA, 2024).

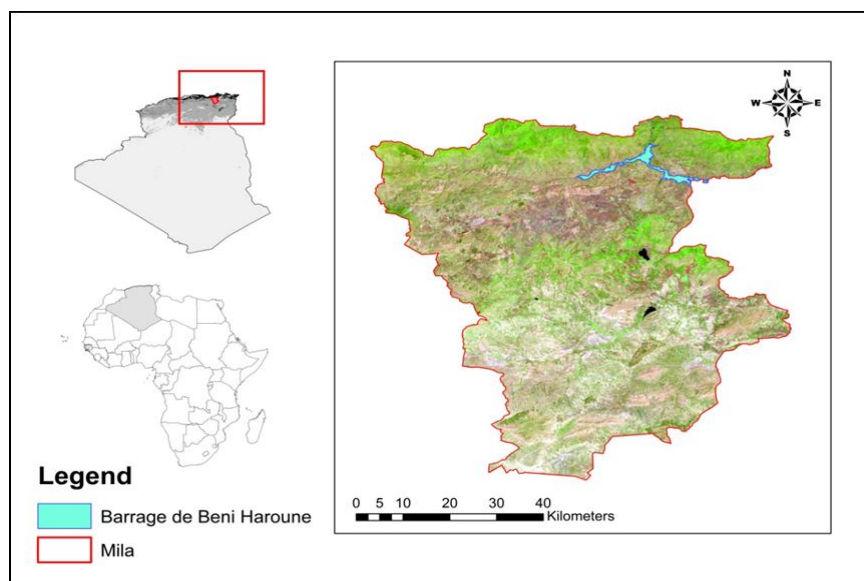


Figure 5 : Carte de la situation géographique de la wilaya de Mila. (Originale, 2025)

1.2. Le bassin Kébir-Rhumel

Le bassin Kébir-Rhumel figure parmi les plus vastes et les plus importants d'Algérie, avec une superficie de 6 595 km². Il s'étend des Hauts Plateaux sétifiens à l'ouest jusqu'au bassin versant de la Seybouse à l'est. Ce bassin joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau de nombreuses villes et zones agricoles de la région. Il est alimenté par plusieurs cours d'eau majeurs, notamment l'oued Rhumel et l'oued Endja, dont les apports assurent un débit annuel significatif. Cette ressource en eau est essentielle pour répondre aux besoins des populations locales ainsi que pour soutenir les activités agricoles et économiques de la région (Atmania&Benaissa, 2010 ; Lakache et al., 2004 ; Boutouatou et al., 2019).

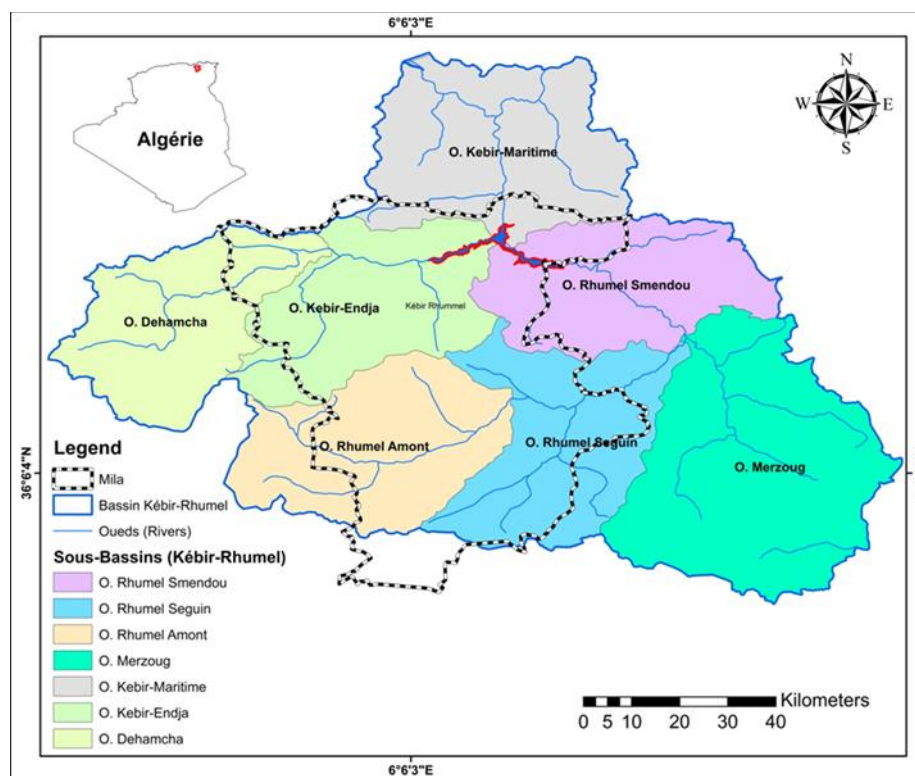


Figure 6 : Situation du bassin Kébir-Rhumel. (Bouchareb et al., 2025)

1.3. Le barrage de Béni Haroun

Situé dans la wilaya de Mila, au nord-est de l'Algérie, le barrage de Béni Haroun se trouve à environ 15 km du chef-lieu de wilaya et à une quarantaine de kilomètres au nord de Constantine, aux coordonnées géographiques 36°33'19''N et 6°16'11''E. Érigé sur l'oued Kebir, un affluent important du bassin versant Kébir-Rhumel, ce barrage constitue un ouvrage hydraulique stratégique pour la région.

Il assure l'approvisionnement en eau potable de plusieurs centres urbains et permet l'irrigation de vastes zones agricoles, contribuant ainsi au développement socio-économique

local. Inauguré en mai 2001, le barrage de Béni Haroun est le plus grand du pays et représente une infrastructure majeure dans le système de transfert des eaux en Algérie (Mebarki et al., 2008 ; Chebbah&Kabour, 2018 ; Haroun, 2016 ; Remini et al., 2019).

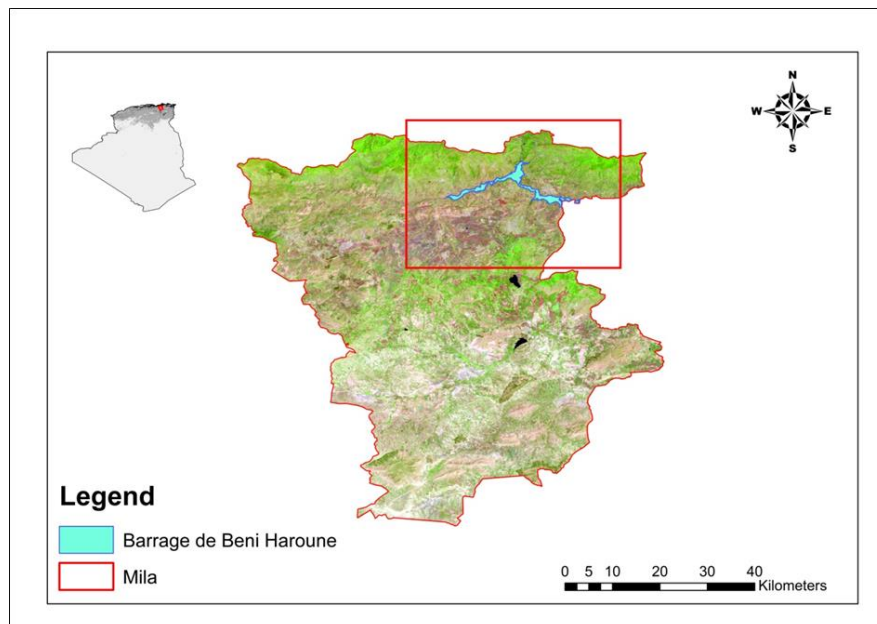


Figure 7 : Carte de situation géographique de Barrage de Béni Haroun (Original, 2025)

Le barrage, de type poids en béton, a été conçu pour réguler le débit des eaux du bassin Kébir-Rhumel et faire face à la demande croissante en eau des populations locales ainsi que des zones agricoles. Doté d'une capacité de stockage initiale de 960 millions de mètres cubes, il permet de maîtriser un apport moyen annuel estimé à 435 millions de mètres cubes, jouant ainsi un rôle essentiel dans la sécurité hydrique de la région (Mebarki, 2010 ; Chebbah&Kabour, 2018 ; Haroun, 2016).

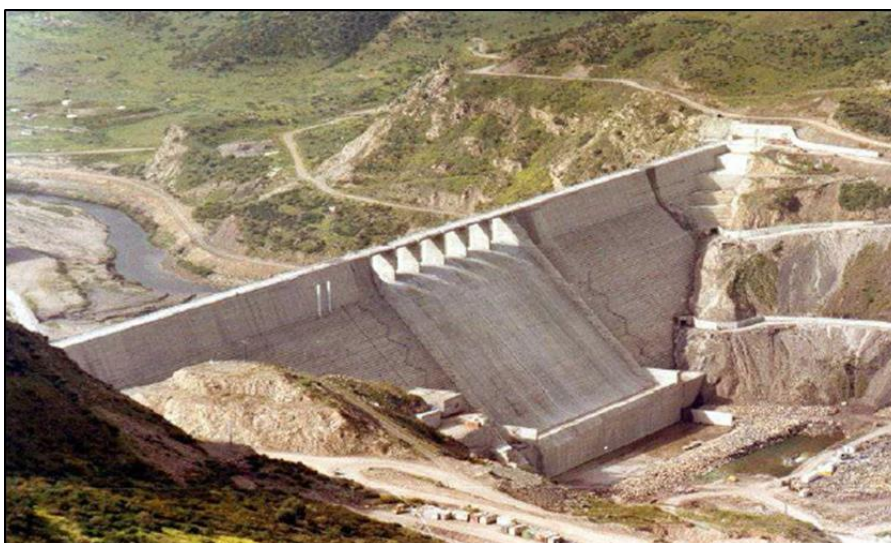


Figure 8 : Barrage de Beni Haroune (ANBT, 1999).

1.3.1. Caractéristiques générales

Le barrage de Béni Haroun est un ouvrage de type poids en Béton Compacté au Rouleau (BCR) avec une hauteur de 118 mètres et une longueur de 710 mètres. Il a une capacité de stockage de 963 millions de mètres cubes à la cote normale de la retenue. La superficie totale du bassin versant du barrage est de 7 725 km². Le barrage est implanté dans un resserrement de gorges calcaires, ce qui ajoute une complexité géologique notable à sa structure. (Mebarki et al., 2008 ; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016 ; Remini et al., 2019)



Figure 9 :Barrage de Beni Haroune 2020 (Site)

1.3.2. Fonctionnalités hydrotechniques

Le barrage comporte un évacuateur de crue de type surface à seuil libre avec un débit maximal de 13 700 m³/s. La vidange de fond, située sur la rive droite, a un débit maximal de 700 m³/s. Les niveaux de la retenue varient entre un niveau normal de 200 mètres, un niveau des plus hautes eaux de 214,8 mètres et un niveau minimum d'exploitation de 172 mètres. Le volume utile de la retenue est de 727 hm³, tandis que le volume mort est de 240 hm³. (Boulahbal, S., & etMebarki, 2013 ; Mebarki et al., 2008).

1.3.2.1. Contexte géographique et hydrologique

Le barrage contrôle les eaux du bassin de l'oued Kébir-Rhumel, constitué par la confluence de deux sous-bassins principaux :

- L'oued Rhumel, qui traverse des zones semi-arides et subhumides, avec une pluviométrie annuelle variant de moins de 400 mm à environ 600 mm, et un apport annuel à Grarem de 174 hm³.
- L'oued Ennedja, qui draine la partie septentrionale-ouest du bassin versant, avec une pluviométrie de 700 mm/an et un apport annuel de 108 hm³.

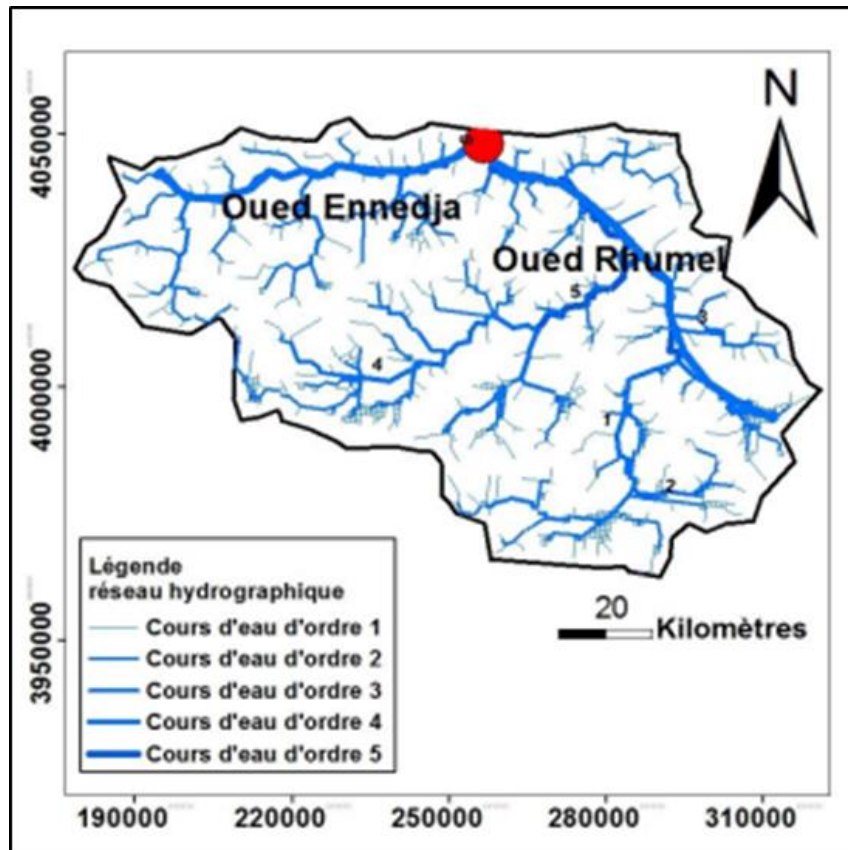


Figure 10 :Réseau hydrographique du bassin versant de Beni Haroun Mila. (Koussa et Bouziane, 2018).

En aval de cette confluence, l'oued Kebir draine un sous-bassin bien arrosé avec un débit annuel atteignant 827,5 hm³ à la station d'El Ancer, près de l'exutoire vers la mer Méditerranée. (Mebarki et al., 2008 ; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016 ; Remini et al., 2019).

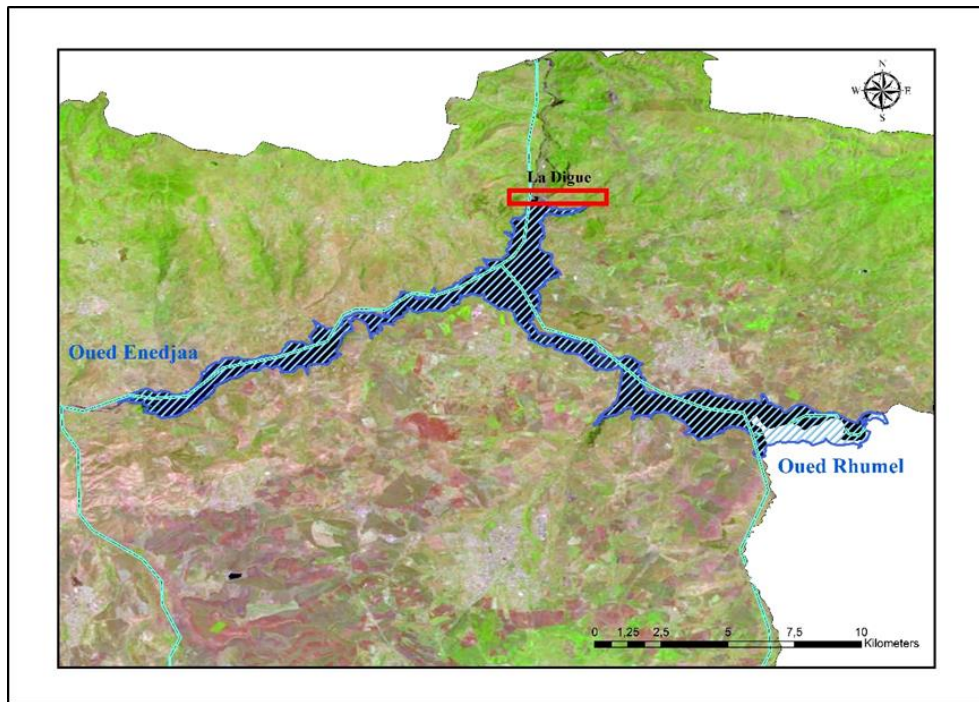


Figure 11 :Réseau hydrographique du barrage Beni Haroun. (Boughachiche, 2024).

1.3.2.2. Contexte morpho-géologique

La région où est implanté le barrage est caractérisée par une morphologie complexe et une géologie cisailée. Cette complexité engendre des défis spécifiques pour la construction et l'entretien des infrastructures hydrauliques. Le barrage et son système de transfert hydraulique sont localisés dans une zone où les contraintes géologiques influencent fortement les choix techniques et les stratégies d'implantation des ouvrages. Le barrage de Béni Haroun est une infrastructure hydraulique majeure pour l'est de l'Algérie, jouant un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau et l'irrigation agricole, tout en faisant face à des défis géologiques significatifs dans sa conception et son exploitation.

Le barrage et son système de transfert sont localisés dans une région géologiquement complexe, caractérisée par des gorges calcaires et une structure cisailée. Cette complexité engendre des défis spécifiques pour la construction et l'entretien des infrastructures hydrauliques, influençant fortement les choix techniques et les stratégies d'implantation des ouvrages. (Koussa et Bouziane, 2018 ; Boulahbal et Mebarki, 2013 ; Mebarki et al., 2008; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016).

1.3.2.3. Caractéristiques hydrotechniques

La digue et le lac de retenue :

- Type de digue : Poids rectiligne, construite en Béton Compacté au Rouleau (BCR).

- Hauteur : 107 mètres au-dessus du lit de l'oued Kébir.
- Longueur en crête : 710 mètres.
- Largeur en crête : 8 mètres.
- Capacité de stockage : 963 millions de m³ à la cote normale de la retenue.
- Superficie du lac de retenue : 39,29 km² au niveau normal de la retenue.

Évacuateur de crue :

- Type : À seuil libre, aménagé dans la partie centrale du barrage.
- Débit maximal : 13 700 m³/s, permettant de gérer les crues avec une période de retour de 10000 ans.

Vidange de fond :

- Emplacement : Rive droite de la digue.
- Débit maximal : 700 m³/s.

Système de drainage :

Un système de trois galeries permet de collecter les eaux de drainage provenant du corps du barrage, de la fondation et des versants. Ce système sert également à contrôler le comportement de l'ouvrage. (Mebarki, 2005 ; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016)

1.3.2.4. Impact socio-économique

Le barrage de Béni Haroun est le plus grand barrage d'Algérie, et il joue un rôle vital dans l'approvisionnement en eau de près de 3 millions d'habitants dans plusieurs wilayas de l'est algérien (Mila, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna, et Khenchela). En outre, il irrigue 30 000 hectares de terres agricoles, contribuant significativement à l'agriculture locale. Une gigantesque station de pompage, avec un débit de 21 m³/s sur 700 mètres de dénivelé, fait partie intégrante de ce système hydraulique, illustrant l'ampleur de l'infrastructure nécessaire pour gérer cette ressource essentielle. (Mebarki et al., 2008 ; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016 ; Remini et al., 2019)

1.3.2.5. Apports hydrologiques au barrage

Les estimations des apports liquides de l'oued Kébir, en aval de la confluence Rhumel-Ennedja, ont été réalisées à l'aide de modélisations mathématiques en l'absence d'une station de jaugeage spécifique au site du barrage. Ces calculs, basés sur le modèle à réservoirs SMAP

et confirmés par le modèle hydrologique Loieau (GR2M), ont donné des apports annuels moyens compris entre 469 hm³ et 590 hm³. Le volume régularisé annuel retenu est de 435 hm³. (**Koussa et Bouziane, 2018 ; Boulahbal et Mebarki, 2013 ; Mebarki et al., 2008 ; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016**).

Site géologique du barrage :

- **Relief** : Contrasté, avec des massifs culminants à des hauteurs élevées (Djebel Msid Aicha : 1462 m) et des ravins profonds.
- **Roches** : Présence de marnes éocènes, de calcaires éocènes et de marnes noires du Paléocène.
- **Dépôts meubles** : Composés de dépôts alluviaux sablo-graveleux et de colluvions provenant de l'érosion des formations rocheuses.

La tectonique de la région est marquée par des mouvements polyphasés influençant les formations géologiques locales. Le réseau de fractures est dense, avec des orientations préférentielles Est-Ouest, Nord-Sud, Nord Est-Sud-Ouest et Nord-Ouest-Sud Est, affectant la stabilité et l'implantation des infrastructures hydrauliques. (**Koussa et Bouziane, 2018 ; Boulahbal et Mebarki, 2013 ; Mebarki et al., 2008 ; Chebbah et Kabour, 2018 ; Haroun, 2016**)

1.3.2.6. Climatologie de la Région

La région autour du barrage de Béni Haroun présente un climat méditerranéen, avec des variations significatives selon la localisation :

- **Sud de Constantine : Semi-aride**
- **Nord de Constantine : Subhumide**

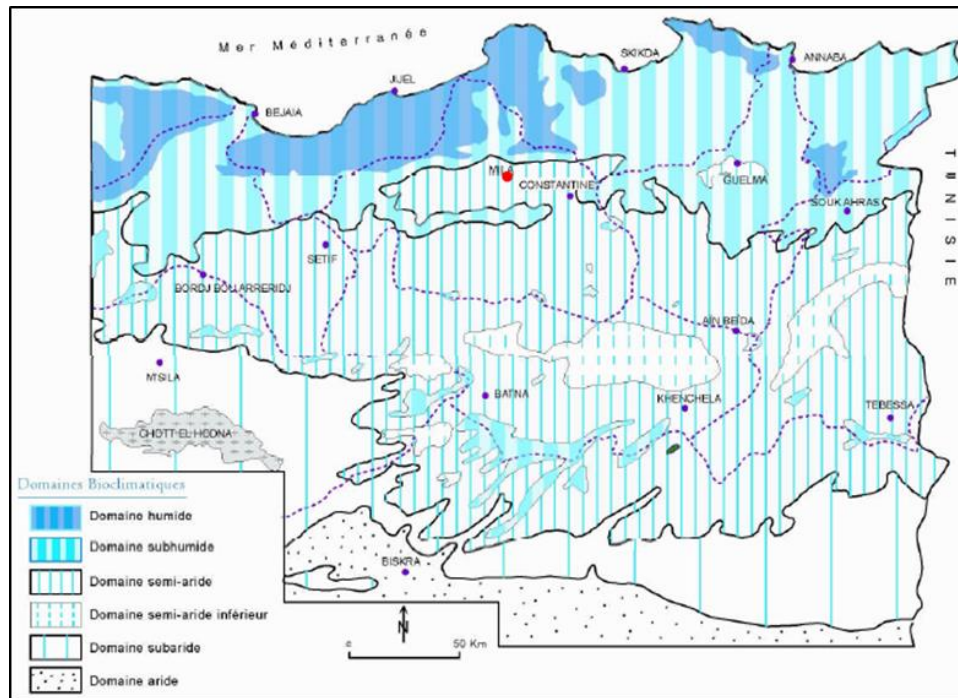


Figure 12 : Carte simplifié des étages bioclimatique nord-est d'Algérie (Mebarki, 2005).

Les précipitations sont le facteur climatique principal influençant le régime hydrologique des cours d'eau. Elles affectent directement le débit et la concentration des matières en suspension, tant organiques que minérales. Les précipitations, variables dans l'espace et le temps, expliquent en grande partie les fluctuations des débits des cours d'eau dans cette région. **(Koussa et Bouziane, 2018 ; Boulahbal et Mebarki, 2013 ; Mebarki et al., 2008 ; Haroun, 2016 ; Mebarki, 2005).**

1.3.2.7. Régime Hydrologique

Volume de stockage initial : 960 millions de m³

Volume utile : 723 millions de m³ (après déduction du volume mort)

Le barrage de Béni Haroun, avec ses capacités et équipements sophistiqués, joue un rôle crucial dans la gestion des ressources en eau de la région. Il permet de régulariser les apports hydrologiques et d'assurer un approvisionnement en eau pour les usages domestiques, agricoles et industriels, tout en protégeant contre les inondations. La gestion de ce barrage repose sur une compréhension fine des dynamiques climatiques et hydrologiques locales, cruciales pour son fonctionnement optimal. **(Boulahbal et Mebarki, 2013 ; Mebarki et al., 2008 ; Haroun, 2016 ; Mebarki, 2005).**

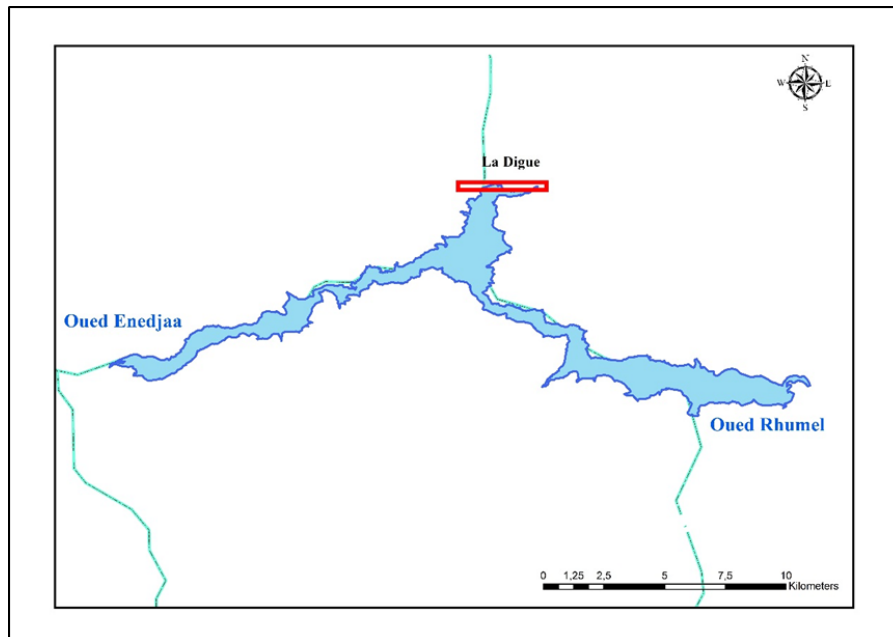


Figure 13 :Barrage Beni Haroun. (Boughachiche, 2024).

2. Méthodologie

2.1. Méthode de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau

Les analyses physico-chimiques ont été faites sur la base de Rodier, 2009 comme suite :

2.1.1. Travail sur le terrain

Durant la campagne d'échantillonnage, nous avons mesuré les paramètres suivants : **pH, conductivité électrique, température, Salinité, taux des sels dissous (TDS) et la turbidité**. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de différents appareils de terrain (multi-paramètres), tous préalablement



Figure 14 :Appareil de mesure du pH (pH-mètre de terrain). (Avril, 2025).



Figure 15 :Appareil de mesure de la salinité et température - (multi-paramètres). (Avril, 2025).

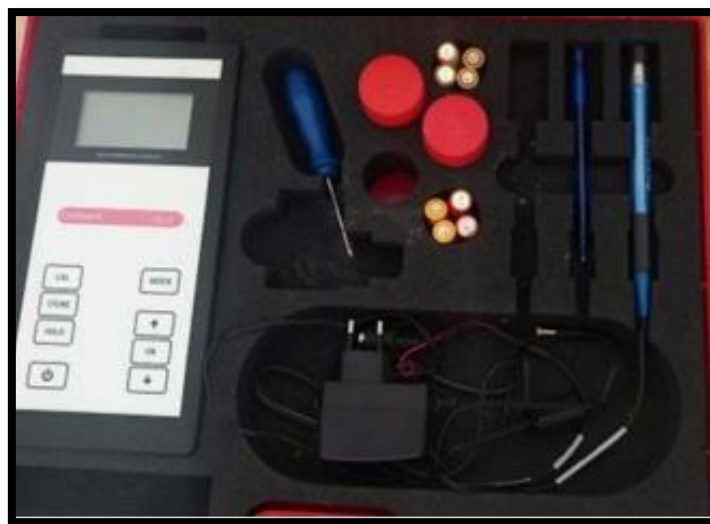


Figure 16 :Appareil de mesure de la conductivité et TDS (multi-paramètres) de terrain. (Avril, 2025).

2.1.2. Au Laboratoire

D'autres paramètres physico-chimiques ont été mesurés au laboratoire :

2.1.2.1. Phosphates (PO_4)

Principe

En milieu acide, les orthophosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium pour former un complexe phosphomolybdique. Réduit par l'acide ascorbique, ce complexe

développe une coloration bleue mesurable par spectrophotométrie. Pour accélérer la formation de cette coloration, un catalyseur, le tartrate double d'antimoine et de potassium, est utilisé.

Solutions et produits utilisés :

- ❖ Solution de molybdate d'ammonium
- ❖ Solution d'acide ascorbique
- ❖ Solution d'oxytartrate de potassium et d'antimoine
- ❖ Solution d'acide sulfurique

Mode opératoire :

- Préparer le mélange des réactifs en ajoutant dans l'ordre suivant :
- 50 ml de solution de molybdate d'ammonium
- 125 ml de solution d'acide sulfurique
- 50 ml de solution d'acide ascorbique
- 25 ml de solution d'oxytartrate de potassium et d'antimoine
- Dans des béchers, verser 50 ml de chaque échantillon.
- Ajouter 5 ml du mélange de réactifs à chaque bécher.
- Attendre 5 minutes.
- Effectuer les mesures au spectromètre à une longueur d'onde de 650 nm.

2.1.2.2. Silicium (Si(OH)₄)

La technique utilisée repose sur la formation d'un complexe entre le molybdate d'ammonium et les formes monomères ou dimères de l'acide orthosilicique. Ce complexe est ensuite réduit par le métol, produisant un complexe bleu qui peut être quantifié par spectrophotométrie.

Réactifs et solutions utilisées

➤ **Réactif 01 : Molybdate**

- Pour préparer 500 ml de réactif :
- Dissoudre 4 g de paramolybdate d'ammonium en poudre fine dans environ 300 ml d'eau distillée.

- Ajouter 12 ml d'acide chlorhydrique concentré ($d = 1,18$), mélanger.
- Compléter à 500 ml avec de l'eau distillée.

➤ **Réactif 02 : Réducteur**

- Ce réactif réducteur est obtenu en mélangeant successivement les réactifs suivants dans l'ordre et les proportions indiquées :
- 100 ml de solution de métol-sulfite.
- 60 ml de solution d'acide oxalique.
- 60 ml d'acide sulfurique à 50 %.
- Compléter avec de l'eau distillée pour obtenir 300 ml de solution.

Cette solution doit être préparée juste avant utilisation et ne se conserve pas.

Mode opératoire :

- À l'aide d'une pipette, introduire 5 ml de réactif 1 dans trois béchers.
- Ajouter 12,5 ml de chaque échantillon dans les béchers, boucher, mélanger et attendre 10 minutes.
- Ajouter ensuite 7,5 ml de réactif 2, mélanger à nouveau et attendre 2 heures.
- Effectuer les lectures au spectromètre à une longueur d'onde de 810 nm.

2.1.2.3. Nitrites (NO_2)

Principe :

La diazotation de la sulfanilamide en milieu acide, suivie de sa copulation avec ou en présence de dichlorhydrate de N-(1-naphtyl) éthylenediamine, produit un complexe coloré permettant un dosage colorimétrique précis.

Réactifs et solutions utilisées :

➤ **Réactif 1 : solution de sulfanilamide**

- Pour préparer 500 ml de réactif :
- Diluer 50 ml d'acide chlorhydrique concentré ($d = 1,18$) dans environ 300 ml d'eau distillée.
- Dissoudre 5 g de sulfanilamide dans cette solution.

- Compléter à 500 ml avec de l'eau distillée.
- Réactif 2 : solution de N-naphtyl-éthylènediamine (NED)
- Dans 500 ml d'eau distillée, dissoudre 0,5 g de dichlorhydrate de N-(1-naphtyl)éthylène diamine (NED).

Mode opératoire :

- Introduire 50 ml de chaque échantillon dans trois béchers distincts.
- Ajouter 1 ml de réactif 1 dans chaque bécher, mélanger et laisser reposer pendant un maximum de 8 minutes.
- Ajouter 1 ml de réactif 2 dans chaque bécher, mélanger à nouveau et attendre entre 10 minutes et 2 heures.
- Effectuer les lectures au spectromètre à une longueur d'onde de 543 nm.

2.1.2.4. Nitrates (NO_3)**Principe :**

Les nitrites présents naturellement dans les eaux proviennent principalement des eaux qui s'écoulent sur les sols du bassin versant (**Bremond et Vuichard, 1973**). Ce phénomène résulte de la décomposition naturelle de la matière organique azotée, comme les protéines (d'origine animale et végétale) et les excréments animaux, par des micro-organismes. Ces micro-organismes transforment la matière organique en ions ammonium, qui sont ensuite oxydés en nitrates par le processus de nitrification. Par conséquent, la présence de nitrites dans l'environnement est une conséquence naturelle du cycle de l'azote (**Schuddeboom, 1993**).

Réactifs et solutions utilisées : sont les mêmes réactifs de dosage de nitrite.

Mode opératoire :

- Faire passer 50 ml d'eau à analyser de chaque échantillon à travers une colonne contenant du cadmium.
- Ajouter 1 ml de réactif 1 à chaque échantillon, mélanger et laisser reposer pendant un maximum de 8 minutes.
- Ajouter 1 ml de réactif 2, mélanger à nouveau et attendre entre 10 minutes et 2 heures.

- Effectuer les lectures au spectromètre à une longueur d'onde de 543 nm.

2.1.2.5. Ammonium (NH₄)

Principe :

La mesure de l'activité ionique de l'ammoniac, sous des conditions expérimentales strictement définies en termes de concentration ionique et de pH, permet de déterminer la concentration d'ammonium dans l'eau.

Solutions et produits utilisés :

➤ Réactif 01 : Solution de phénol-nitroprussiate

Pour préparer 500 ml de réactif : dissoudre 17,5 g de phénol et 200 mg de nitroprussiate de sodium dans de l'eau distillée, puis compléter le volume à 500 ml.

➤ Réactif 02 : Solution alcaline d'hypochlorite

Pour préparer 500 ml de réactif : dissoudre 140 g de citrate trisodique et 11 g de soude dans environ 400 ml d'eau distillée. Ajouter ensuite un volume de solution d'hypochlorite de sodium contenant 1,4 g de chlore, puis compléter le volume à 500 ml.

Mode opératoire :

- Prendre 100 ml d'échantillon directement dans le flacon à réaction.
- Ajouter 3 ml du réactif 1, boucher et agiter pour bien homogénéiser.
- Ajouter immédiatement 3 ml du réactif 2 et agiter à nouveau.
- Placer le flacon à l'abri de la lumière pendant une nuit à température ambiante.
- Effectuer les mesures au spectromètre à une longueur d'onde de 630 nm.

2.2. Prélèvement du phytoplancton

2.2.1. Matériel de prélèvement

- ✓ Filet à plancton (05 µm)
- ✓ Bouteille ombrée de 50 ml
- ✓ Bouteille en plastique de 1,5 L
- ✓ Papier aluminium
- ✓ Glacière

- ✓ Étiquettes
- ✓ Lugol (produit chimique pour la conservation des échantillons)
- ✓ Pipette graduée
- ✓ Barque

2.2.2. Méthodes des prélèvements

Les prélèvements du phytoplancton sont effectués parallèlement avec les mesures des paramètres physico-chimiques.

Prélèvements du phytoplancton

La technique de récolte du phytoplancton consiste à filtrer l'eau brute de la surface de Barrage de Beni Haroune en utilisant un filet à plancton de 5 μm de maille, muni d'un collecteur tracté par une barque. Le volume collecté a été récupéré dans une bouteille de 50 ml teintée et étiquetée. Pour la conservation des prélèvements, quelques gouttes de lugol ont été ajoutées.

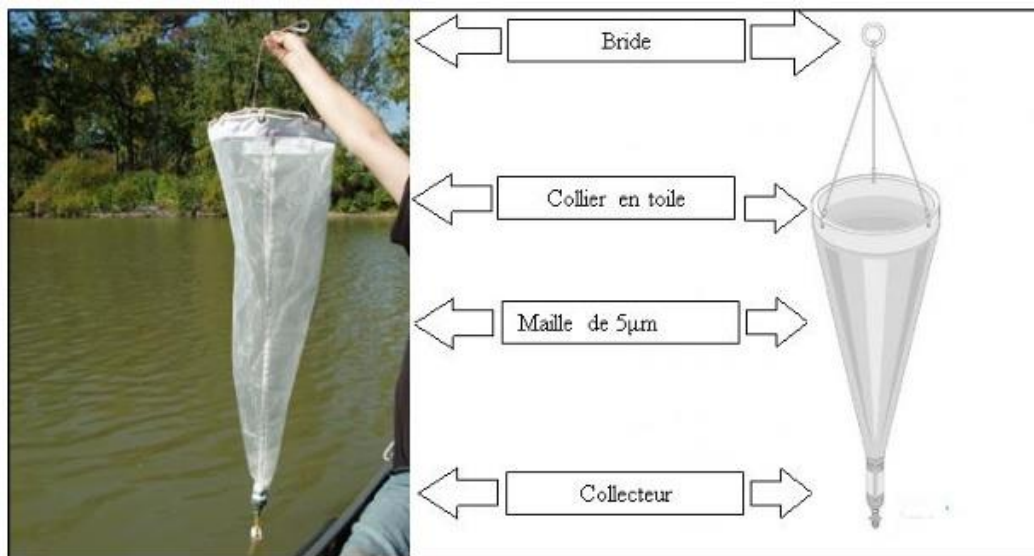


Figure 17 :Filet à plancton (Boughachiche, 2024).

Conservation des échantillons

- Les prélèvements sont étiquetés (l'étiquette contient un code que corresponde en nom de lieu de prélèvement).
- Ces prélèvements sont conservés avec des conservateurs spécifiques à chaque paramètre utilisé et gardés à basse températures (2 à 4°C) dans une glacière.

2.3. Étude au laboratoire

2.3.1. Identification du phytoplancton

2.3.1.1. Matériel utilisé

- Cellule de malassez (hematimetre)
- Lamelle couvre-objet
- Micropipette ou pipette pasteur
- Microscope optique (objectif x40, parfois x100 a immersion)
- Compte-goutte
- Solution fixatrice (formol neutre 4 ou lugolacétiques)
- Agitateur (manuel ou magnétique)
- Solution échantillon de phytoplancton

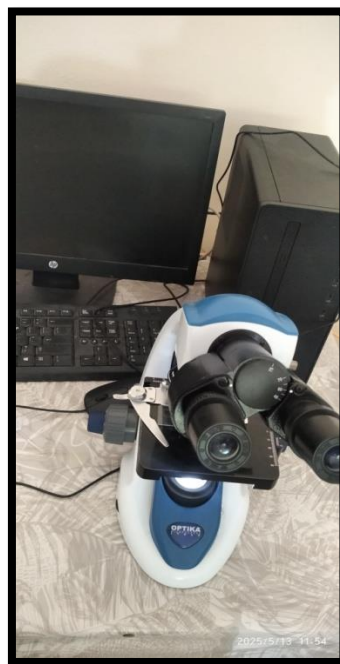


Figure 18 :microscope (Binoculaireoptika). (Avril, 2025)



Figure 19 : solution échantillon du phytoplancton. (Avril, 2025)



Figure 20 : cellule de Malassez. (Avril, 2025)

2.3.1.2. Méthode malassez

Principe du comptage cellulaire :

Le comptage du cellulaire ou numération cellulaire est la détermination du nombre de cellules dans un volume précis d'un milieu liquide. On exprime le résultat d'un comptage en concentration cellulaire, c'est-à-dire en unité d'événement par unité de volume (par ex. nombre de cellules/ ml).

La lame la plus répandue en laboratoire est la lame de malassez. Elle est gravée de 100 rectangles, eux-mêmes recoupés en 25 rectangles qui sont subdivisés en 20 petits carrés pour faciliter le comptage. Le volume correspondant au quadrillage total est égal à 1ul.

Pour réaliser le comptage, À l'aide d'une pipette Pasteur, une goutte de l'échantillon (en général entre 10 et 20 ul) à analyser est déposée entre la lame et la lamelle au niveau du quadrillage (étalement de l'échantillon par capillarité entre la lame et la lamelle). Ensuite, un parcours horizontal est effectué sur toute la longueur de la lamelle. Cette opération est répétée

Au moins 2-3 fois pour plus de précision. Enfin, des photos claires des observations sont prises et classées pour chaque point de prélèvement. Pour l'identification du phytoplancton, les clés (guides d'identification) sont consultées.

RESULTATS ET DISCUSSION



1. Résultats et discussion

1.1. Les paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques de l'eau sont des indicateurs clés pour l'évaluation de la qualité des milieux aquatiques et le bon fonctionnement des écosystèmes. Ils comprennent notamment la température, le pH, la conductivité électrique, la salinité, la turbidité, l'oxygène dissous, ainsi que les nutriments tels que les nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-), ammonium (NH_4^+), phosphates (PO_4^{3-}) et silicates (SiO_4^{4-}) (Rodier, 1996 ; AFNOR, 1994). Ces paramètres influencent directement les processus écologiques comme la photosynthèse, la respiration des organismes aquatiques, la dégradation de la matière organique, ainsi que la disponibilité des éléments nutritifs (Bellinger&Sigee, 2011). Par exemple, une diminution de l'oxygène dissous peut provoquer une asphyxie de la faune aquatique, tandis qu'un enrichissement excessif en nutriments conduit à des phénomènes d'eutrophisation, entraînant des proliférations algales et des déséquilibres biologiques (Verlecar&Desai, 2004 ; Callieri&Stockner, 2002).

La surveillance régulière de ces paramètres est donc indispensable pour la gestion durable des ressources hydriques, la prévention des pollutions, ainsi que pour la conservation de la biodiversité aquatique. Elle permet d'établir un diagnostic écologique précis, utile à la mise en œuvre d'actions de protection et de restauration des écosystèmes aquatiques (El Hourany, 2019 ; Preston et al., 1989).

Dans cette partie, nous allons présenter et analyser les résultats obtenus à partir des mesures et des dosages des paramètres physico-chimiques réalisés au niveau du barrage de Beni Haroun, tout au long de la période d'étude.

1.1.1. Paramètre physique :

1.1.1.1. Température :

La température est un paramètre physique fondamental qui influence fortement le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Elle contrôle la vitesse des réactions biochimiques, le métabolisme des organismes, la solubilité des gaz (notamment l'oxygène dissous), ainsi que la stratification thermique des plans d'eau. Une élévation de température entraîne une diminution de la solubilité de l'oxygène, ce qui peut perturber l'équilibre des communautés aquatiques, notamment en période estivale ou dans les zones peu profondes.

Elle influence également la répartition des espèces, certaines étant strictement thermophiles ou stenothermes, et conditionne les processus microbiens impliqués dans le cycle des nutriments. En tant que paramètre intégrateur, la température reflète à la fois les conditions climatiques locales, les apports d'eau chaude (rejets thermiques) et les modifications anthropiques. Elle est donc essentielle dans toute évaluation de la qualité écologique des milieux aquatiques.

La température de l'eau influence l'activité biologique, la solubilité de l'oxygène et les réactions chimiques. Paramètre clé des équilibres écologiques.

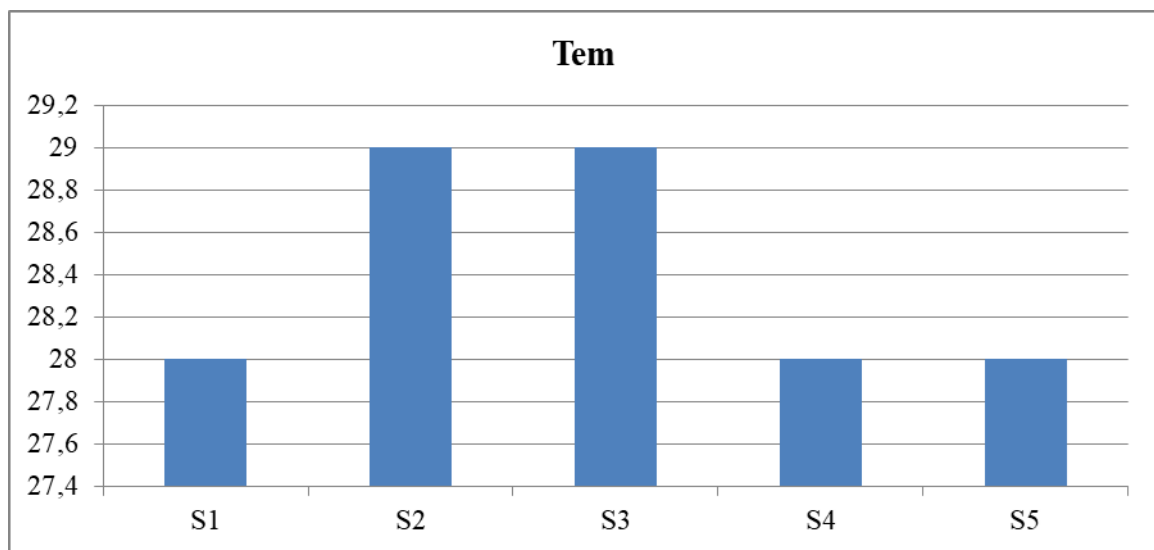


Figure21: Variations des Températures d'eau dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les températures mesurées sont relativement homogènes entre les stations, allant de 28°C à 29°C, avec une moyenne de 28,4°C et une faible variance de 0,3, ce qui indique une stabilité thermique spatiale sur la zone d'échantillonnage. Ces valeurs relativement élevées suggèrent un contexte estival, ou encore une faible profondeur de plan d'eau (des stations d'échantillonnages), qui favorise un réchauffement rapide par rayonnement solaire.

La température est un paramètre clé de l'écosystème aquatique, influençant à la fois :

- la solubilité de l'oxygène (qui diminue avec l'augmentation de la température),
- l'activité métabolique des organismes aquatiques,
- les vitesses de réaction biochimiques,
- et la croissance du phytoplancton.

Dans ces conditions thermiques, on peut s'attendre à une accélération des processus biologiques (minéralisation, nitrification, photosynthèse) et à une augmentation du risque de prolifération algale, surtout en présence de nutriments. Il est donc important de mettre en relation ces températures avec les teneurs en oxygène dissous, nutriments et la turbidité pour évaluer les risques de déséquilibre écologique ou d'eutrophisation.

1.1.1.2. Turbidité (Turb) :

La turbidité mesure la transparence de l'eau en fonction de la présence de particules en suspension, telles que les sédiments, matières organiques, algues ou micro-organismes. Elle est exprimée en unités NTU (Nephelometric Turbidity Units) et constitue un indicateur direct de la clarté de l'eau. Une turbidité élevée peut limiter la pénétration de la lumière, réduisant ainsi la photosynthèse des végétaux aquatiques et perturbant les équilibres biologiques. Elle peut également entraver la respiration des organismes benthiques, favoriser l'accumulation de polluants liés aux particules, et indiquer des phénomènes de ruissellement, d'érosion ou de pollution diffuse.

La turbidité est donc un paramètre clé de la qualité physico-chimique, souvent surveillé en lien avec les crues, les activités humaines (déforestation, agriculture, urbanisation) et la dynamique du phytoplancton.

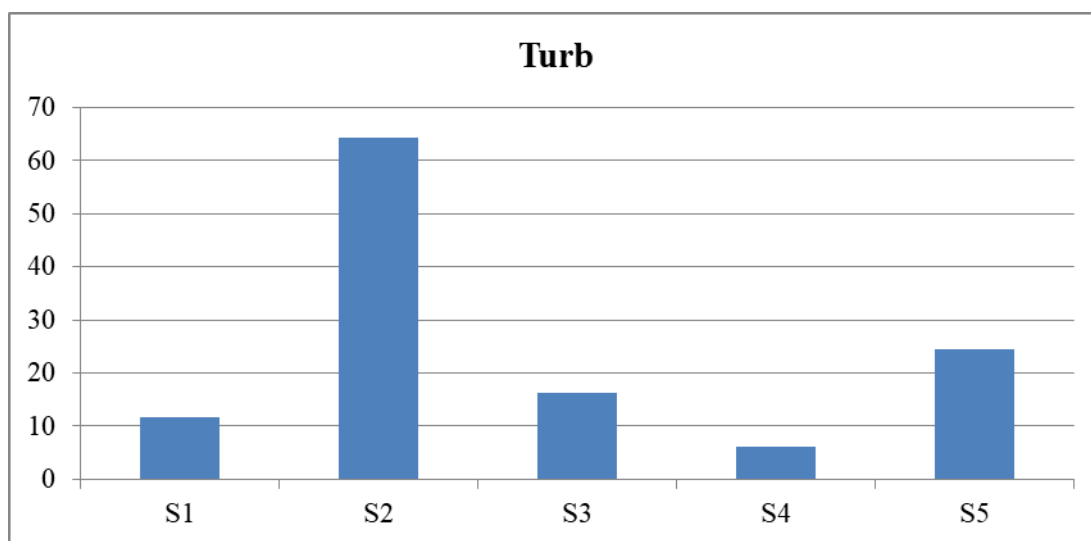


Figure22: Variations du Turbidité dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

La turbidité varie fortement entre les stations, allant de 6,1 NTU (S4) à 64,3 NTU (S2), avec une moyenne de 24,58 NTU et une variance très élevée de 538,83, ce qui révèle une forte hétérogénéité spatiale. Ces valeurs indiquent des niveaux variables de matières en

suspension (sédiments, phytoplancton, matière organique ou minérale) influencés possiblement par les apports hydriques, l'érosion, ou les rejets anthropiques.

Comparées aux normes de qualité, toutes les stations dépassent largement le seuil OMS pour l'eau potable (≤ 5 NTU), ce qui rend l'eau impropre à la consommation directe sans traitement préalable. Pour l'irrigation, les normes sont plus tolérantes (jusqu'à 10–20 NTU), mais seules les stations S1 (11,7 NTU) et surtout S4 (6,1 NTU) approchent les limites acceptables. En revanche, S2 (64,3 NTU) présente une turbidité alarmante, susceptible de perturber les processus photosynthétiques et de favoriser l'activité bactérienne liée à la matière organique en décomposition.

Une turbidité élevée affecte également la qualité de l'oxygénation, réduit la pénétration de la lumière et peut constituer un facteur de stress pour la faune aquatique. Il est donc recommandé de corrélérer ces données avec celles de l'oxygène dissous, des nutriments et des matières organiques pour une évaluation complète de la qualité écologique du milieu.

1.1.1.3. Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'un milieu aquatique, exprimée sur une échelle logarithmique de 0 à 14. Un $\text{pH} < 7$ indique un milieu acide, un $\text{pH} = 7$ est neutre, et un $\text{pH} > 7$ reflète un milieu alcalin. Ce paramètre est essentiel à l'équilibre des écosystèmes aquatiques, car il influence la forme chimique et la biodisponibilité de nombreux éléments nutritifs (comme le phosphore ou l'azote), ainsi que la toxicité de certains métaux lourds (comme l'aluminium, le cuivre ou le cadmium).

Les organismes aquatiques sont généralement adaptés à une plage de pH restreinte ; des écarts importants peuvent provoquer du stress physiologique, voire la mortalité. Le pH dépend à la fois des conditions naturelles (géologie, équilibre $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$) et des influences anthropiques (rejets acides ou basiques, pollution industrielle, eutrophisation). Il est donc un indicateur fondamental de la qualité chimique et écologique des eaux.

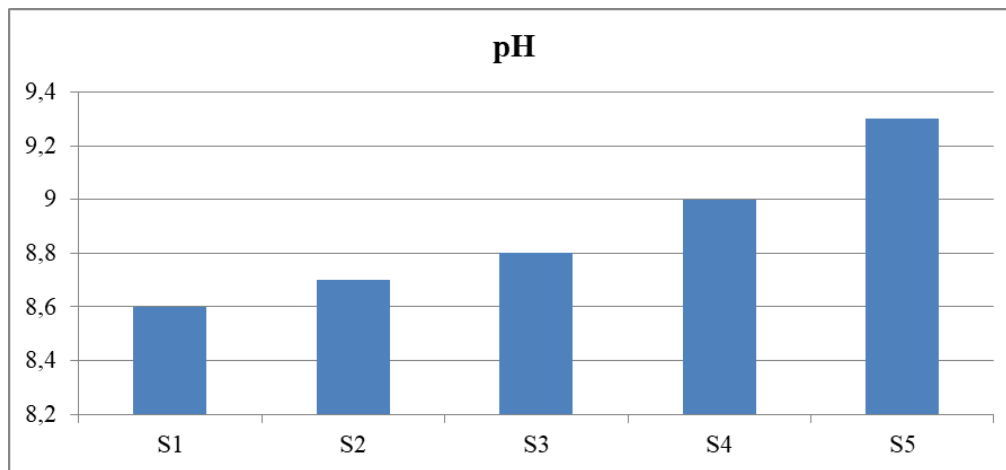


Figure23 : Variations du pH dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les valeurs de pH relevées sont toutes supérieures à 8,5, allant de 8,6 (S1) à 9,3 (S5), avec une moyenne de 8,88 et une variance modérée (0,077), ce qui indique une alcalinité marquée et assez homogène entre les stations. Ces niveaux traduisent un milieu basique, probablement influencé par :

- une photosynthèse intense (consommation du CO_2),
- une faible concentration en matière organique acide,
- ou la présence de carbonates et bicarbonates en quantité importante.

Selon les normes, ces eaux ne respectent pas les seuils recommandés pour une eau potable (6,5–8,5) ni pour l'irrigation (6,5–8,4), ce qui peut poser des problèmes d'absorption des nutriments pour les plantes, affecter les réactions chimiques dans l'eau, et altérer la biodisponibilité de certains métaux.

Un pH aussi élevé peut également :

- réduire la solubilité du phosphore (le rendant moins disponible),
- accroître la toxicité de l'ammoniac (forme non ionisée du NH_4^+),
- et modifier la structure du phytoplancton.

Il est essentiel de suivre l'évolution du pH dans le temps, en lien avec les autres paramètres comme l'ammonium, l'alcalinité et l'activité photosynthétique, pour évaluer les risques potentiels d'eutrophisation ou de déséquilibre chimique dans le système aquatique étudié.

1.1.1.4 Taux des sels dissous (TDS) :

Le TDS (Total Dissolved Solids) correspond à la quantité totale de substances minérales dissoutes dans l'eau, incluant principalement les ions majeurs tels que calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), bicarbonates (HCO_3^-), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), etc. Exprimé en mg/L, le TDS est un indicateur global de la minéralisation de l'eau. Il reflète à la fois l'origine géologique du bassin versant, les conditions hydrologiques, et les apports anthropiques (engrais, rejets domestiques ou industriels).

Un TDS élevé peut indiquer une salinisation, une pollution diffuse ou une accumulation de résidus chimiques, et peut affecter la potabilité, les usages agricoles ou la vie aquatique. Inversement, une eau à TDS très faible peut être agressive pour les matériaux et biologiquement pauvre. Le TDS est donc un bon indicateur de l'évolution de la qualité chimique globale, souvent utilisé pour le suivi temporel et spatial des ressources en eau.

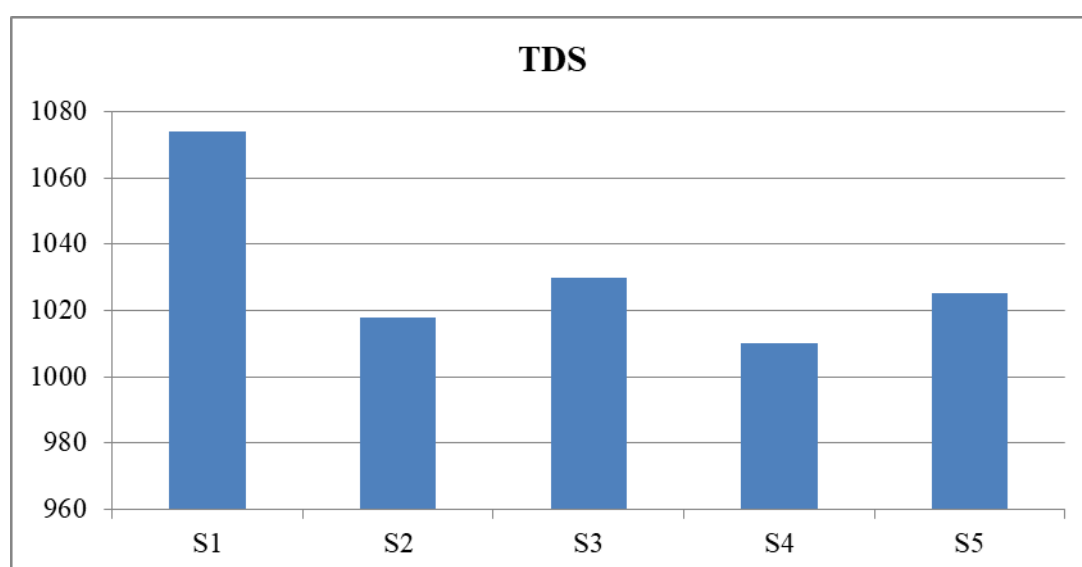


Figure 24: Variations des Taux des sels dissous (TDS) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en solides dissous totaux (TDS) varient de 1010 mg/L (S4) à 1074 mg/L (S1), avec une moyenne de 1031,4 mg/L et une variance modérée de 623,8, traduisant une faible dispersion des valeurs entre les stations. Ces teneurs révèlent une minéralisation relativement élevée de l'eau, largement influencée par les ions dissous tels que le sodium (Na^+), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), les carbonates, etc.

Selon les normes de potabilité (≤ 1000 mg/L), toutes les stations dépassent légèrement le seuil recommandé, ce qui peut affecter :

- le goût de l'eau (salinité perceptible),
- la santé des consommateurs sensibles (notamment en cas de maladies rénales),
- et la durabilité des infrastructures (risque de corrosion ou d'entartrage).

Cependant, les eaux restent acceptables pour l'irrigation (tolérance ≤ 2000 mg/L), bien que cette charge saline puisse affecter certaines cultures sensibles au sel si l'irrigation est prolongée.

La légère sur minéralisation observée pourrait provenir de l'origine géologique du bassin, de rejets anthropiques ou de processus d'évaporation favorisant la concentration des sels. Une corrélation avec la conductivité électrique et la salinité serait utile pour confirmer la source et l'intensité de cette charge ionique.

1.1.1.5 Oxygène dissous (O₂) :

L'oxygène dissous est un paramètre essentiel à la vie aquatique, car il permet la respiration des organismes (poissons, invertébrés, micro-organismes) et reflète le niveau d'aération du milieu. Il provient principalement de la diffusion atmosphérique et de la photosynthèse des végétaux aquatiques, et sa concentration varie en fonction de la température, de la salinité, de la turbulence et de la charge organique du milieu.

Un taux suffisant (souvent > 5 mg/L) est nécessaire pour garantir un bon fonctionnement de l'écosystème. À l'inverse, une concentration faible en O₂ (< 3 mg/L) peut entraîner un stress physiologique, voire l'asphyxie des organismes sensibles, et favoriser le développement de conditions anoxiques, propices à la libération de substances toxiques (comme le H₂S ou NH₄⁺).

L'oxygène dissous est donc un indicateur-clé de la qualité écologique de l'eau, souvent utilisé dans les indices biotiques et la surveillance des phénomènes d'eutrophisation ou de pollution organique. L'oxygène dissous est un indicateur de l'aération du milieu et de la respiration biologique. Des taux faibles peuvent entraîner l'asphyxie des organismes aquatiques.

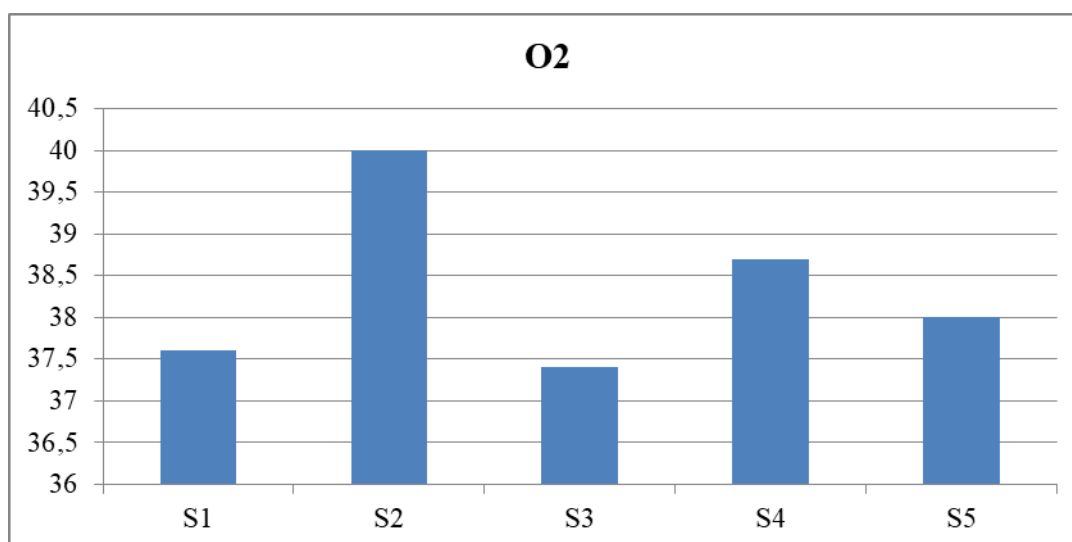


Figure 25 : Variations d'Oxygène dissous (O₂) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en oxygène dissous sont comprises entre 37,4 mg/L (S3) et 40 mg/L (S2), avec une moyenne élevée de 38,34 mg/L et une variance faible (1,108), traduisant une bonne homogénéité entre les stations et des niveaux largement supérieurs aux normes pour l'eau potable (≥ 5 mg/L) et l'irrigation (> 2 mg/L).

Ces valeurs sont exceptionnellement élevées et inhabituelles pour des eaux naturelles en équilibre atmosphérique (généralement entre 8 et 14 mg/L à 20 °C).

1.1.1.6 Conductivité électrique (Cond ou CE) :

La conductivité électrique exprime la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, en fonction de la concentration totale en ions dissous (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , etc.). Elle est mesurée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et constitue un indicateur indirect de la minéralisation de l'eau. Plus l'eau contient de sels dissous, plus sa conductivité est élevée.

Ce paramètre varie naturellement selon la géologie locale, mais peut aussi être influencé par des apports anthropiques (rejets agricoles, domestiques ou industriels). Une conductivité anormalement élevée peut signaler une pollution ou une salinisation, tandis qu'une conductivité très faible peut indiquer une eau chimiquement pauvre ou déséquilibrée.

La conductivité est souvent corrélée au TDS et constitue un outil pratique pour le suivi de la qualité des eaux, aussi bien dans les milieux naturels que dans les réseaux de distribution

ou de traitement. La conductivité électrique représente la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Proportionnelle à la concentration en ions dissous.

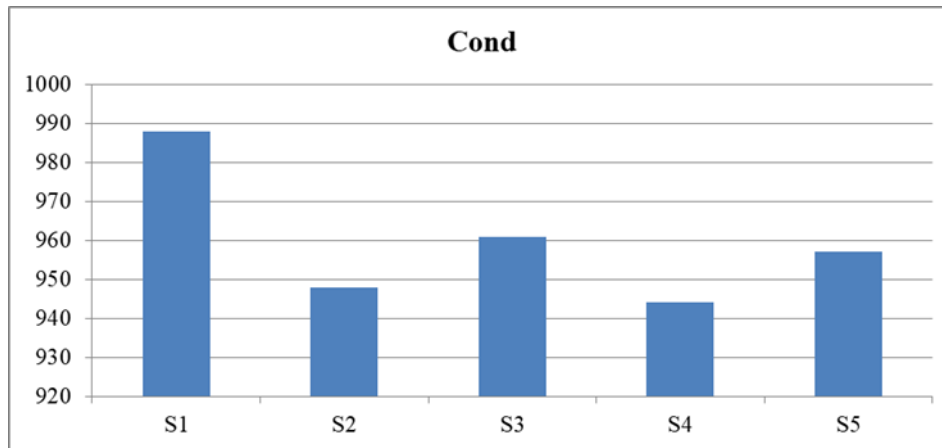


Figure 26 : Variations des Conductivité dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les valeurs de conductivité électrique varient entre 944 $\mu\text{S/cm}$ (S4) et 988 $\mu\text{S/cm}$ (S1), avec une moyenne de 959,6 $\mu\text{S/cm}$ et une variance faible (298,3), traduisant une bonne homogénéité des concentrations en ions dissous entre les différentes stations.

Ces niveaux indiquent une minéralisation modérée des eaux, bien inférieure au seuil maximal pour l'eau potable ($\leq 2500 \mu\text{S/cm}$), et située dans la catégorie "moyenne" pour l'irrigation (700–3000 $\mu\text{S/cm}$). Cela signifie que :

- l'eau est acceptable pour la consommation humaine sur le plan de la conductivité,
- mais peut présenter des risques légers de salinisation à long terme pour les sols sensibles ou certaines cultures si utilisée régulièrement pour l'irrigation.

Les valeurs observées sont probablement influencées par la présence de cations (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et d'anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), ce qui correspond aux tendances relevées dans les autres paramètres comme les TDS ou la salinité. Une corrélation positive entre conductivité et TDS est attendue et pourrait être confirmée par une régression linéaire. Globalement, ces résultats indiquent une qualité physico-chimique acceptable, mais à surveiller en cas d'usage intensif agricole ou industriel.

1.1.1.7 Salinité :

La salinité désigne la concentration totale en sels dissous dans l'eau, incluant principalement les chlorures, sulfates, carbonates, sodium, potassium, calcium et magnésium. Elle est exprimée en g/L ou en PSU (Practical Salinity Unit). Ce paramètre est essentiel pour caractériser l'origine et le type d'eau (douce, saumâtre, salée), et permet de suivre les

intrusions d'eaux marines, les apports de pollutions salines (engrais, rejets industriels), ou encore la salinisation des sols et des eaux souterraines.

La salinité influence directement la densité de l'eau, la biodisponibilité des nutriments, la répartition des espèces aquatiques et les échanges osmotiques chez les organismes vivants. Des variations importantes peuvent entraîner des déséquilibres écologiques, en réduisant la diversité biologique ou en favorisant certaines espèces tolérantes au sel.

Elle est souvent corrélée à la conductivité électrique et au TDS, avec lesquels elle forme un triptyque clé dans l'analyse de la qualité physico-chimique des eaux.

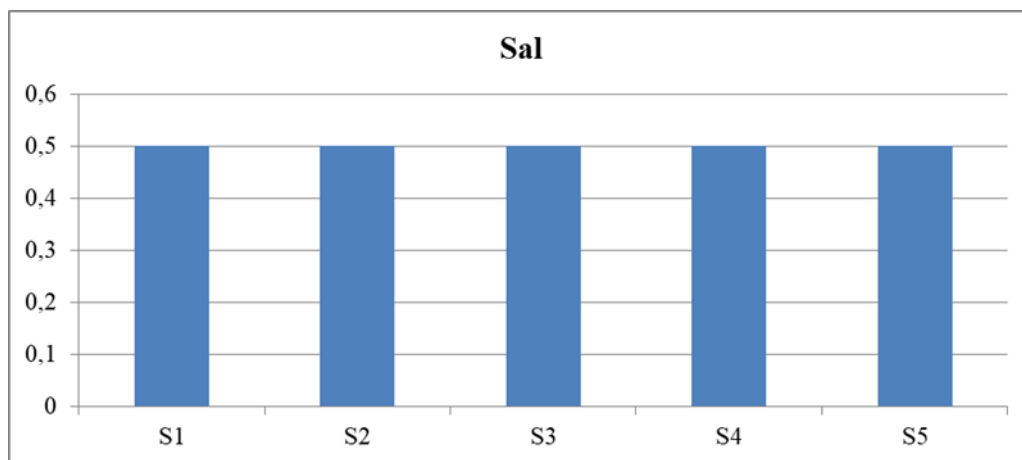


Figure 27 : Variations de Salinité dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les mesures de salinité montrent une valeur constante de 0,5 mg/L dans l'ensemble des stations, soit une moyenne de 0,5 mg/L et une variance nulle, ce qui indique une homogénéité parfaite du paramètre entre les sites.

Cette valeur correspond au seuil limite pour l'eau douce selon les normes de potabilité ($\leq 0,5$ ppt, soit environ 500 mg/L), ce qui suggère que l'eau analysée est encore considérée comme douce, mais très proche de la transition vers une eau légèrement salée.

Pour l'irrigation, cette salinité reste largement en dessous du seuil tolérable (< 2 ppt) pour la plupart des cultures. Néanmoins, une telle salinité peut, à long terme, accumuler des sels dans les sols si l'eau est utilisée fréquemment pour l'arrosage sans bon drainage.

Il est important de noter que cette valeur uniforme peut résulter soit :

- d'une condition naturelle stable dans le bassin analysé,
- ou encore d'une limite de détection ou de précision des instruments ou méthodes utilisés.

Une vérification croisée avec les valeurs de conductivité, TDS, et teneurs en ions majeurs (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} ...) pourrait permettre une évaluation plus fine de la salinité réelle.

1.1.2 Paramètres chimique :

1.1.2.1 Nitrite (NO_2) :

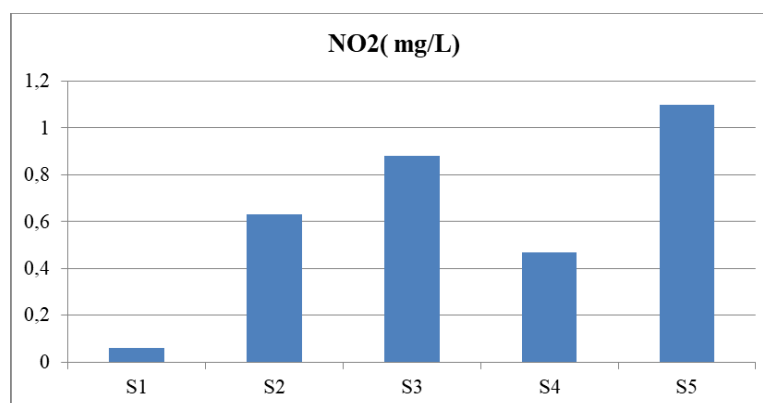


Figure28 : Variations des Nitrites (NO_2) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Le nitrite (NO_2^-) est un composé azoté intermédiaire du cycle de l'azote, issu de la nitrification ou de la dénitrification. Il est généralement présent en faibles concentrations dans les eaux bien oxygénées, mais son augmentation indique souvent une pollution organique récente ou une nitrification incomplète. Écologiquement, les nitrites sont toxiques pour les organismes aquatiques, notamment les poissons, car ils altèrent le transport de l'oxygène. Leur suivi est essentiel pour diagnostiquer la qualité de l'eau et détecter les déséquilibres écologiques. (AFNOR, 1994 ; Rodier, 1996).

Les concentrations en nitrites (NO_2^-) mesurées dans les eaux du barrage varient entre 0,06 mg/L et 1,10 mg/L, avec une moyenne de 0,628 mg/L et une variance de 0,15847. Ces valeurs traduisent une variabilité importante entre les stations échantillonnées. En comparaison avec les normes de qualité de l'eau, la valeur maximale dépasse la limite recommandée pour l'eau potable fixée à 0,1 mg/L (AFNOR, 1994 ; OMS, 2017), ce qui pourrait présenter un risque sanitaire en cas de consommation humaine directe. En revanche, les concentrations restent inférieures à la limite autorisée pour l'irrigation, qui est de 1 mg/L, ce qui suggère une utilisation agricole possible sans risque immédiat pour les cultures. Toutefois, des niveaux élevés de nitrites peuvent refléter une pollution organique récente, un dysfonctionnement du cycle de l'azote ou une dégradation de la qualité de l'eau, nécessitant une attention particulière en termes de gestion environnementale.

1.1.2.2 Phosphate (PO_4^{3-}) :

Élément limitant pour la croissance du phytoplancton. Sa présence excessive est un indicateur de pollution organique et favorise l'eutrophisation.

Le phosphate est un nutriment essentiel, jouant un rôle fondamental dans les processus biologiques des organismes aquatiques, notamment dans la photosynthèse du phytoplancton. En tant qu'élément limitant dans de nombreux écosystèmes aquatiques, sa concentration régule souvent la productivité primaire. Toutefois, une présence excessive de phosphates – généralement issue des rejets domestiques, des engrais agricoles ou des eaux usées industrielles – constitue un indicateur de pollution organique. Cette surcharge entraîne une eutrophisation, caractérisée par une prolifération excessive d'algues (bloom algal), suivie d'une diminution de l'oxygène dissous due à la dégradation de la biomasse, ce qui nuit gravement à la biodiversité aquatique. Ainsi, la surveillance des niveaux de phosphates est cruciale pour évaluer la qualité de l'eau et prévenir la dégradation des écosystèmes aquatiques.

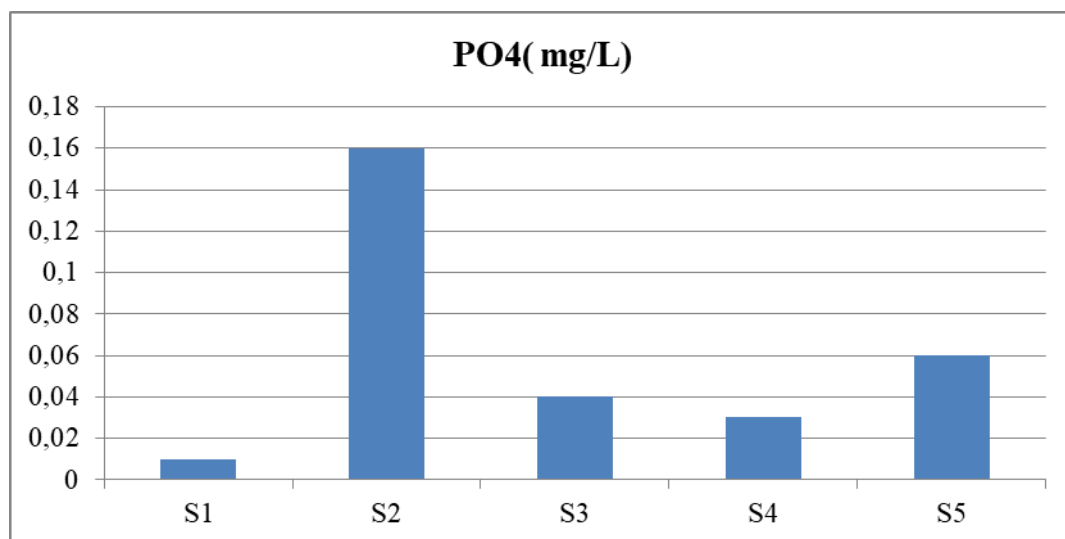


Figure29: Variations des Phosphates (PO4) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en phosphate (PO_4^{3-}) mesurées dans les cinq stations dans le barrage de Beni Haroun présentent une variabilité marquée, allant de 0,01 mg/L (S1) à 0,16 mg/L (S2). La moyenne est de 0,06 mg/L, avec une valeur médiane de 0,04 mg/L, tandis que la variance de 0,00345 confirme une dispersion notable autour de la moyenne. La station S2 affiche la concentration la plus élevée, atteignant 0,16 mg/L, ce qui peut indiquer une source locale d'enrichissement en phosphates, potentiellement d'origine domestique, agricole ou organique.

En comparaison, les stations S1, S3, S4 et S5 restent en dessous de 0,06 mg/L, traduisant des niveaux faibles à modérés, caractéristiques d'un milieu peu ou modérément influencé par les apports phosphorés. Toutes les valeurs observées sont nettement inférieures aux seuils critiques fixés par les normes pour l'eau potable ($\leq 0,5$ mg/L) et pour l'irrigation (≤ 2 mg/L), ce qui indique une bonne qualité chimique vis-à-vis du phosphore.

Cependant, la présence d'un pic isolé à S2 suggère la nécessité de surveiller cette station plus attentivement, notamment en lien avec d'autres paramètres tels que l'azote ou la turbidité, afin d'évaluer les risques d'eutrophisation.

1.1.2.3 Silicium ($\text{Si}(\text{OH})_4$) :

Le silicium, principalement sous forme d'acide silicique ($\text{Si}(\text{OH})_4$) est un élément nutritif indispensable à la croissance des diatomées, un groupe important du phytoplancton. Ces micro-algues utilisent le silicium pour former leurs frustules (parois cellulaires siliceuses), qui jouent un rôle essentiel dans leur structure, leur protection et leur capacité à flotter. La disponibilité en silicium influence directement l'abondance et la diversité des diatomées dans les écosystèmes aquatiques. Son suivi constitue donc un indicateur écologique pertinent pour évaluer l'état trophique des milieux aquatiques et la dynamique du phytoplancton.

Nécessaire à la croissance des diatomées. Une baisse du rapport Si/N peut limiter ces espèces au profit d'algues non siliceuses.

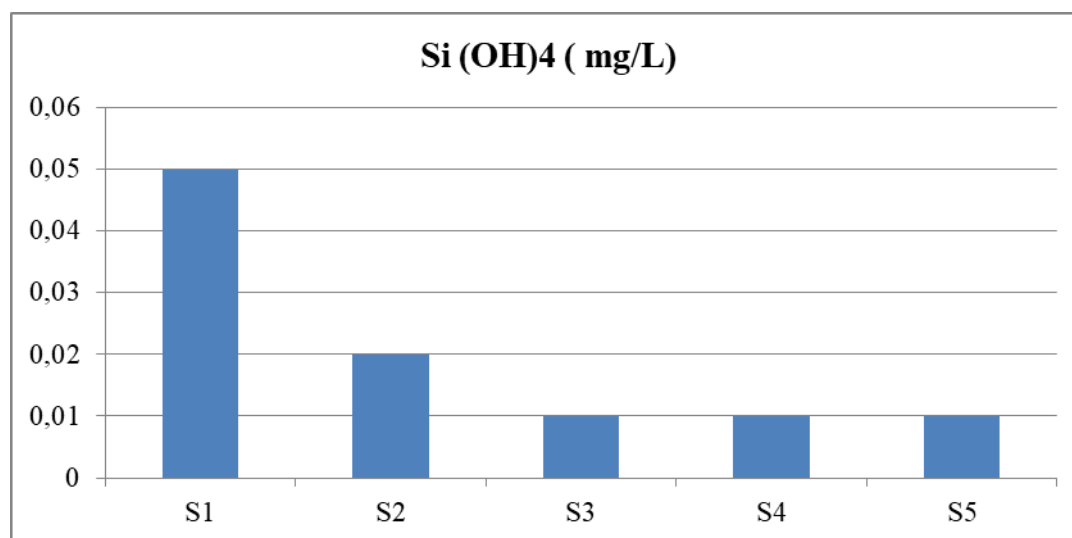


Figure30 : Variations de Silicium ($\text{Si}(\text{OH})_4$) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en silicium dissous sous forme d'acide silicique ($\text{Si}(\text{OH})_4$) mesurées dans les stations S1 à S5 varient entre 0,01 mg/L (S3, S4, S5) et 0,05 mg/L (S1), avec une

valeur moyenne modérée de 0,02 mg/L et une variance de 0,0003, traduisant une faible dispersion autour de la moyenne. La station S1 présente la concentration la plus élevée, tandis que trois stations (S3 à S5) affichent une valeur identique minimale.

Ces teneurs sont nettement inférieures aux seuils de potabilité (25–50 mg/L), ce qui confirme l'absence de risque sanitaire lié à ce paramètre. En ce qui concerne l'irrigation, aucune norme spécifique n'est fixée pour le silicium, celui-ci étant généralement inoffensif, voire bénéfique pour certaines plantes.

Du point de vue écologique, ces concentrations peuvent avoir un impact sur la croissance des diatomées, micro-algues siliceuses dépendantes du silicium. Une faible disponibilité en Si(OH)_4 , comme observée ici, peut limiter leur développement, au profit d'espèces non siliceuses, en particulier si l'azote et le phosphore sont présents en quantités suffisantes. Ce déséquilibre nutritionnel peut influencer la structure du phytoplancton et la dynamique trophique du milieu aquatique.

1.1.2.4 Ammonium (NH_4^+) :

L'ammonium est une forme réduite de l'azote minéral, facilement assimilable par les organismes autotrophes. Il provient principalement de la dégradation de la matière organique azotée, par les processus de décomposition ou d'excrétion, ainsi que des rejets domestiques et agricoles. En conditions normales, il est rapidement oxydé en nitrites puis en nitrates via la nitrification. Toutefois, en milieu pauvre en oxygène (anaérobiose ou hypoxie), cette transformation est ralentie, ce qui peut entraîner une accumulation d'ammonium, toxique à forte concentration, en particulier pour la faune aquatique. Sa mesure constitue donc un indicateur de pollution organique récente et de dysfonctionnement dans les cycles biogéochimiques de l'azote.

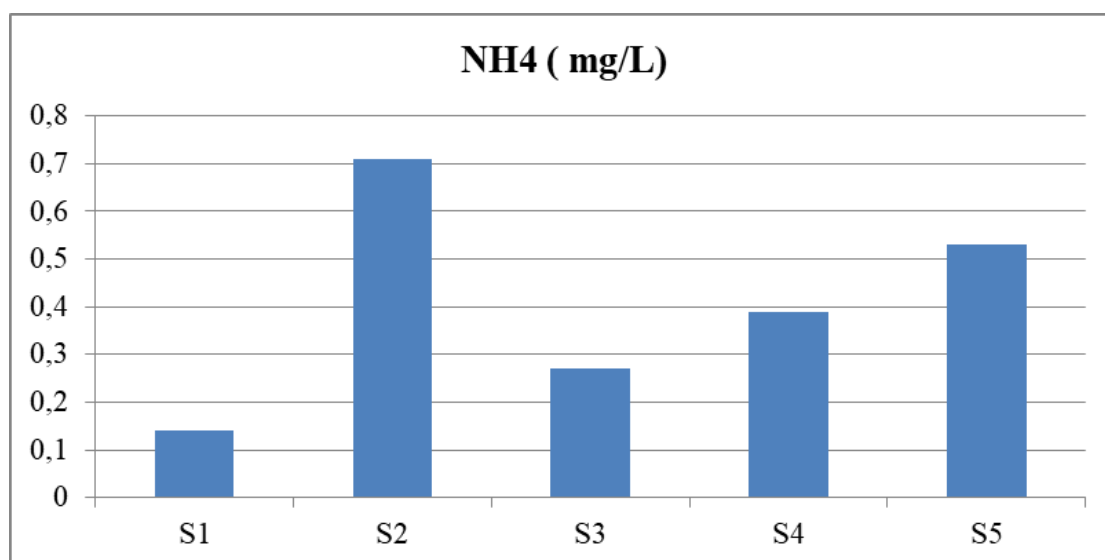


Figure31: Variations d'Ammonium (NH₄) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les teneurs en ammonium (NH₄) varient de 0,14 mg/L (S1) à 0,71 mg/L (S2), avec une moyenne de 0,408 mg/L et une variance relativement élevée de 0,04932, ce qui indique une hétérogénéité notable entre les stations. La station S2 dépasse légèrement la norme de potabilité fixée à 0,5 mg/L, ce qui pourrait représenter un risque pour l'usage domestique en l'absence de traitement. En revanche, toutes les stations respectent la limite recommandée pour l'irrigation (≤ 5 mg/L).

L'ammonium est généralement issu de la dégradation de la matière organique et peut aussi provenir de rejets domestiques ou agricoles (engrais azotés). Sa présence élevée dans certaines stations, notamment S2, S5 et S4, pourrait indiquer une activité organique accrue, un apport récent de pollution ou un milieu faiblement oxygéné, conditions dans lesquelles la transformation de NH₄⁺ en nitrates (NH₃) est ralentie.

Cette situation mérite une surveillance particulière des stations concernées, surtout si d'autres indicateurs comme le phosphate, la turbidité ou l'oxygène dissous confirment une pression organique ou trophique élevée. Une analyse croisée avec les sources potentielles de pollution (bassins agricoles, zones habitées, effluents) serait pertinente.

1.1.2.5 Sulfate (SO₄²⁻) :

Le sulfate est un ion inorganique naturellement présent dans l'eau, principalement issu de la dissolution des roches sédimentaires riches en gypse ou en anhydrite. Il peut également provenir de sources anthropiques, telles que les rejets industriels, les effluents domestiques, l'utilisation de certains engrais ou la combustion de combustibles fossiles. En milieu

aquatique, les sulfates sont chimiquement stables et peu réactifs, ce qui les rend utiles comme traceurs de pollutions d'origine anthropique ou d'activités industrielles. Ils participent également à la minéralisation globale des eaux et leur concentration est souvent utilisée pour évaluer le degré de minéralisation d'un écosystème aquatique. Des concentrations très élevées peuvent altérer la qualité de l'eau potable et affecter certains organismes sensibles.

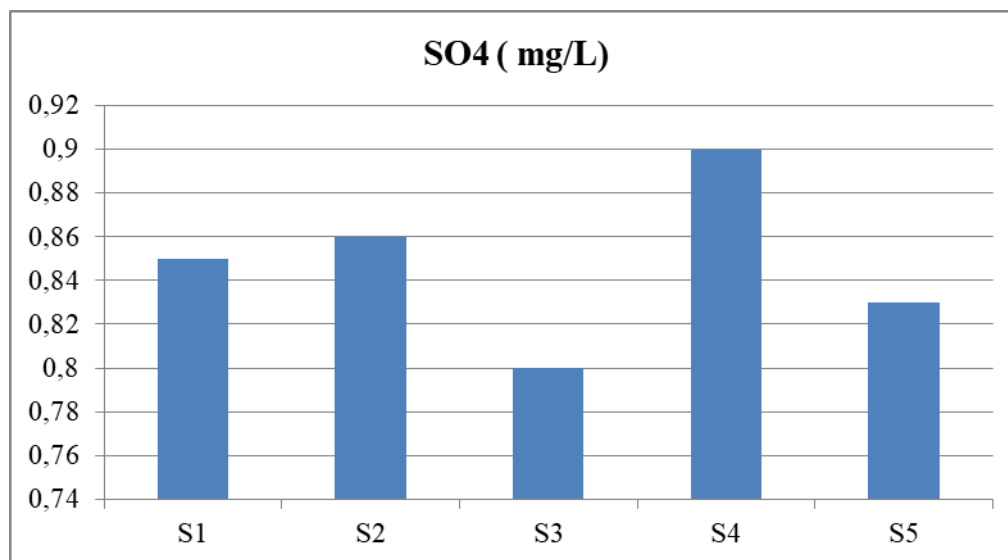


Figure32: Variations des Sulfates (SO₄) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en sulfates (SO₄²⁻) mesurées dans les cinq stations varient légèrement, allant de 0,80 mg/L (S3) à 0,90 mg/L (S4), avec une moyenne de 0,848 mg/L et une faible variance de 0,00137, traduisant une homogénéité remarquable entre les stations. Ces valeurs sont très faibles comparées aux normes de potabilité (≤ 250 mg/L) et d'irrigation (≤ 960 mg/L), ce qui confirme que l'eau est peu chargée en sulfates et ne présente aucun risque lié à ce paramètre pour les usages domestiques ou agricoles.

Les sulfates ont généralement une origine naturelle (altération des roches contenant du soufre), mais peuvent aussi être associés à des rejets industriels ou domestiques. Dans ce cas, l'homogénéité des valeurs suggère une absence de source locale ponctuelle de pollution sulfatée, et reflète plutôt une signature géochimique de fond, stable à l'échelle des sites étudiés.

Enfin, les concentrations en sulfates mesurées sont compatibles avec une bonne qualité chimique de l'eau, aussi bien pour la consommation humaine que pour l'irrigation, et n'indiquent aucune anomalie ou impact anthropique notable.

1.1.2.6 Nitrate (NO_3^-) :

Le nitrate est une forme oxydée de l'azote et constitue un nutriment essentiel à la croissance des végétaux aquatiques, notamment du phytoplancton et des macrophytes. Il résulte principalement de la nitrification de l'ammonium par les bactéries nitrifiantes, mais aussi des apports agricoles (engrais azotés), des eaux usées domestiques et des précipitations atmosphériques. En faibles concentrations, il contribue au fonctionnement naturel des écosystèmes aquatiques. En revanche, des teneurs excessives en nitrate peuvent entraîner des déséquilibres biologiques, notamment par eutrophisation, se traduisant par une prolifération d'algues, une consommation accrue d'oxygène dissous, et une altération de la biodiversité. Sur le plan sanitaire, une concentration élevée en nitrates dans l'eau potable peut également poser des risques pour la santé humaine, en particulier chez les nourrissons (syndrome du bébé bleu).

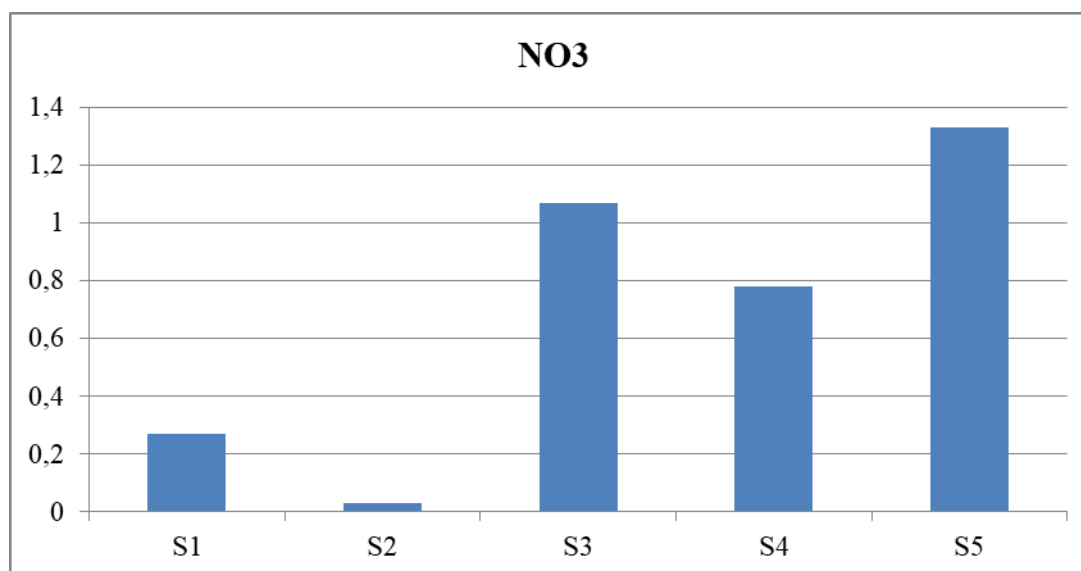


Figure33 : Variations des Nitrates (NO_3) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en nitrate (NO_3^-) mesurées dans les cinq stations présentent une variabilité marquée, avec des valeurs comprises entre 0,03 mg/L (S2) et 1,33 mg/L (S5). La moyenne est de 0,696 mg/L et la variance élevée de 0,29348 confirme une dispersion importante des données, traduisant une hétérogénéité des apports azotés entre les stations.

Malgré cette variabilité, toutes les concentrations mesurées restent très largement inférieures aux normes réglementaires, que ce soit pour l'eau potable (≤ 50 mg/L) ou pour l'irrigation (≤ 30 mg/L). Cela indique une bonne qualité de l'eau vis-à-vis des nitrates, sans risque immédiat pour la santé humaine ni pour les usages agricoles. Cependant, la présence de pics à S5 (1,33 mg/L) et S3 (1,07 mg/L) pourrait refléter des apports ponctuels d'origine

agricole ou organique, tels que des engrais ou effluents riches en azote. À l'inverse, la station S2 affiche une valeur quasi nulle, ce qui souligne une différence nette dans les pressions environnementales ou les caractéristiques du bassin versant local.

En résumé, bien que les niveaux soient faibles au regard des seuils de qualité, la variabilité spatiale importante mérite une attention particulière, notamment dans une perspective de surveillance à long terme pour prévenir toute tendance à l'eutrophisation ou à l'accumulation d'azote dans certaines zones.

1.1.2.7 Sodium (Na^+) :

Le sodium est un élément majeur naturellement présent dans les eaux douces et salines. Il provient essentiellement de la dissolution des minéraux des roches (comme le feldspath ou le halite) mais peut également résulter d'apports anthropiques : rejets domestiques, industriels, usage de sels de voirie ou intrusion d'eau de mer dans les zones côtières. Bien qu'il ne soit pas directement toxique à des concentrations normales, une teneur élevée en sodium peut modifier la composition ionique de l'eau, altérer son goût, et poser des problèmes pour l'irrigation, en affectant la structure des sols et la santé des plantes. Dans les écosystèmes aquatiques, un excès de sodium peut aussi influencer l'osmolarité du milieu et impacter les espèces sensibles à la salinité. Sa concentration est donc un indicateur de salinisation et de minéralisation des eaux.

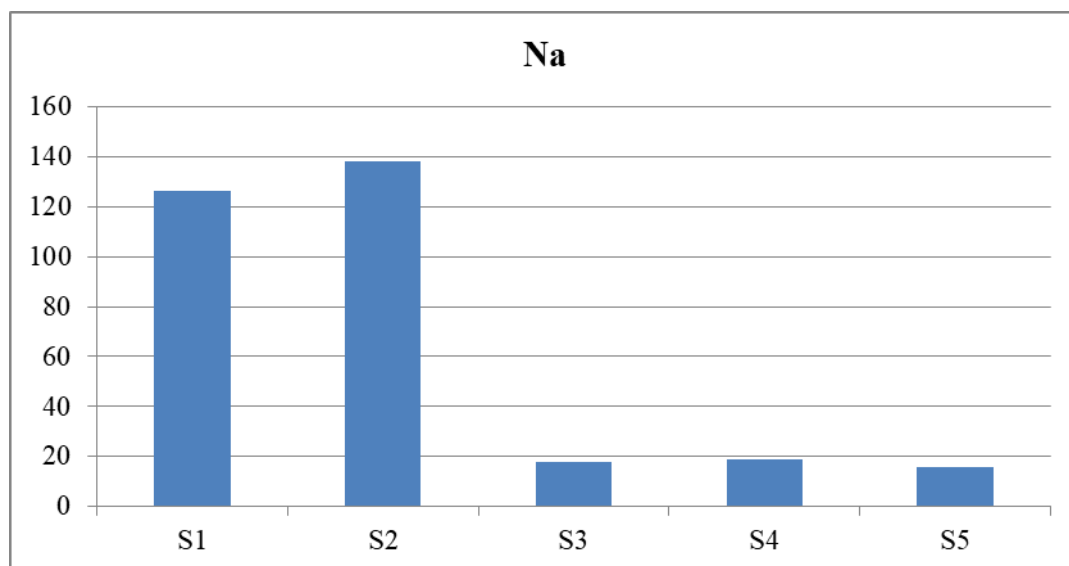


Figure34: Variations de Sodium (Na) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en sodium (Na^+) dans les stations étudiées varient considérablement, allant de 15,6 mg/L (S5) à 138 mg/L (S2), avec une moyenne de 63,4 mg/L et une variance

très élevée de 3968,255, ce qui traduit une forte hétérogénéité spatiale des apports sodiques. La station S2 présente la concentration la plus élevée, suivie de S1 (126,5 mg/L), tandis que S3, S4 et S5 affichent des teneurs nettement plus faibles, inférieures à 20 mg/L. Toutes les valeurs restent inférieures à la norme de potabilité (≤ 200 mg/L), indiquant l'absence de risque sanitaire direct lié à la teneur en sodium pour la consommation humaine. En ce qui concerne l'irrigation, les concentrations observées sont globalement compatibles avec les limites recommandées (69–207 mg/L), bien que les valeurs de S1 et S2 soient à surveiller de près, car elles atteignent ou dépassent la borne inférieure du seuil critique pour les sols sensibles.

L'origine de cette hétérogénéité peut être attribuée à des facteurs géologiques locaux (présence de roches sodées), des intrusions d'eau salée, ou des activités anthropiques comme l'utilisation de sels dans les effluents domestiques ou industriels. Une analyse croisée avec le chlorure (Cl^-) pourrait aider à mieux identifier la source de sodium (naturelle vs pollution). En résumé, bien que les concentrations mesurées soient conformes aux normes en vigueur, la variabilité élevée justifie une vigilance accrue dans les stations S1 et S2, notamment pour les usages agricoles dans les zones sensibles à la salinisation.

1.1.2.8 Chlorure (Cl^-) :

Le chlorure est un ion majoritaire stable et très soluble, présent naturellement dans les eaux à travers la dissolution des sels minéraux (notamment le chlorure de sodium – NaCl). Il peut également provenir de sources anthropiques, telles que les rejets domestiques, industriels, les eaux usées, ou encore les engrais et les résidus de sels de déneigement. En tant que marqueur de salinité, le chlorure est souvent utilisé pour évaluer l'origine et l'intensité d'une contamination, notamment lorsqu'il est analysé conjointement avec le sodium (Na^+). Bien que non toxique à faible concentration, un excès de chlorures peut rendre l'eau impropre à la consommation, perturber les écosystèmes aquatiques, et nuire à certains usages agricoles et industriels. Sa mesure est donc un indicateur pertinent de la qualité chimique de l'eau et de l'influence des activités humaines sur les milieux aquatiques.

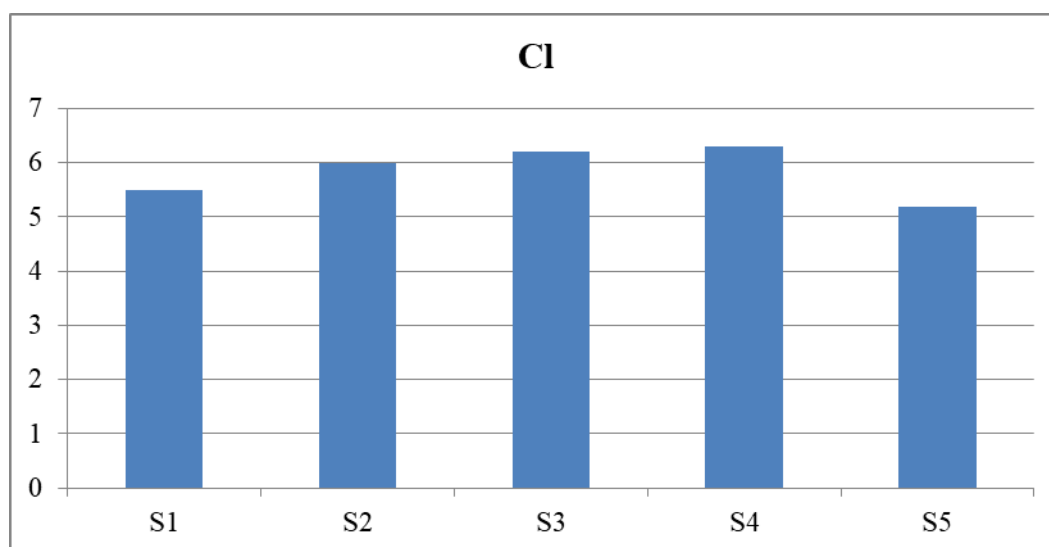


Figure35: Variations de Chlorure (Cl) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en chlorure (Cl^-) varient légèrement entre 5,2 mg/L (S5) et 6,3 mg/L (S4), avec une moyenne de 5,84 mg/L et une faible variance de 0,223, indiquant une bonne homogénéité spatiale entre les stations échantillonnées. Ces valeurs sont très inférieures aux seuils réglementaires, que ce soit pour l'eau potable (≤ 250 mg/L) ou pour l'irrigation ($\leq 140\text{--}355$ mg/L), ce qui confirme une qualité chimique excellente vis-à-vis du chlorure, sans risque pour la santé humaine ni pour les sols agricoles.

Le chlorure, généralement associé au sodium, peut provenir de sources naturelles (altération des roches, évaporation), ou de pollutions anthropiques (rejets domestiques, effluents urbains ou agricoles). Ici, les faibles concentrations et l'uniformité des données suggèrent l'absence d'influence notable d'activités humaines et traduisent un contexte hydrogéologique stable et peu impacté. En comparant ces résultats à ceux du sodium, une analyse du rapport Na^+/Cl^- pourrait apporter des éléments supplémentaires sur l'origine des ions dissous.

1.1.2.9 Rapport SO_4 / Cl :

Le rapport sulfate/chlorure ($\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$) est un outil d'interprétation hydro chimique permettant d'identifier l'origine des sulfates présents dans les eaux. Dans des conditions naturelles, ce rapport tend à rester relativement stable selon la géologie du bassin versant (présence de gypse ou d'anhydrite). En revanche, une augmentation anormale de ce rapport peut indiquer une source anthropique de sulfates, comme les rejets industriels, les eaux usées ou certains engrais. Inversement, un rapport faible associé à des teneurs élevées en chlorures peut suggérer une contamination par intrusion marine ou effluents domestiques riches en

NaCl. L'analyse conjointe des concentrations de SO_4^{2-} et Cl^- et de leur ratio constitue ainsi un indicateur utile pour tracer les sources de pollution et évaluer l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau.

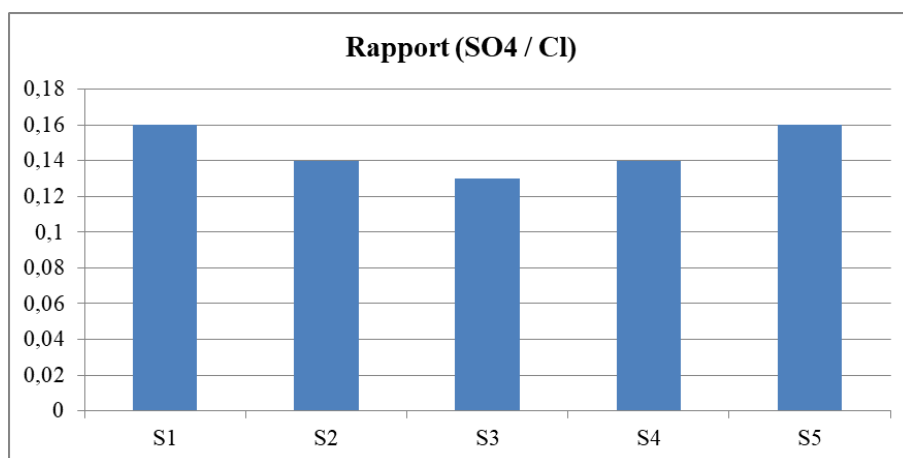


Figure36 : Variations de Rapport (SO4/Cl) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Le rapport sulfate/chlorure ($\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$) varie faiblement entre 0,13 (S3) et 0,16 (S1 et S5), avec une moyenne de 0,146 et une très faible variance (0,00018), ce qui révèle une stabilité remarquable entre les stations. Ce rapport est un indicateur utile pour distinguer l'origine des sulfates dans les eaux naturelles.

Des valeurs proches ou inférieures à 0,2 suggèrent généralement que les sulfates et chlorures partagent une origine commune, souvent géogénique (naturelle), comme la dissolution de roches sédimentaires contenant ces ions (ex. : gypse, halite). En l'absence de pics de sulfates ou de chlorures, et compte tenu des faibles concentrations observées pour ces deux ions, on peut conclure que l'eau étudiée est peu minéralisée et non affectée par des rejets industriels ou urbains riches en sulfates. Ce rapport confirme ainsi que les eaux des stations S1 à S5 présentent une qualité stable et naturelle, avec aucun indice significatif de pollution anthropique par le soufre.

1.1.2.10 Alcalinité totale (TA)

L'alcalinité totale représente la capacité de l'eau à neutraliser les acides, c'est-à-dire sa capacité tampon face aux variations de pH. Elle est principalement due à la présence d'ions bicarbonates (HCO_3^-), carbonates (CO_3^{2-}) et, dans une moindre mesure, d'hydroxydes (OH^-). L'alcalinité permet ainsi de stabiliser le pH du milieu aquatique, protégeant les organismes vivants contre les fluctuations acides ou basiques qui pourraient leur être nuisibles. Une alcalinité faible rend le milieu plus vulnérable à l'acidification, tandis qu'une alcalinité élevée

indique une bonne capacité tampon. Elle constitue donc un paramètre-clé dans l'évaluation de la qualité chimique et de la résilience écologique des milieux aquatiques.

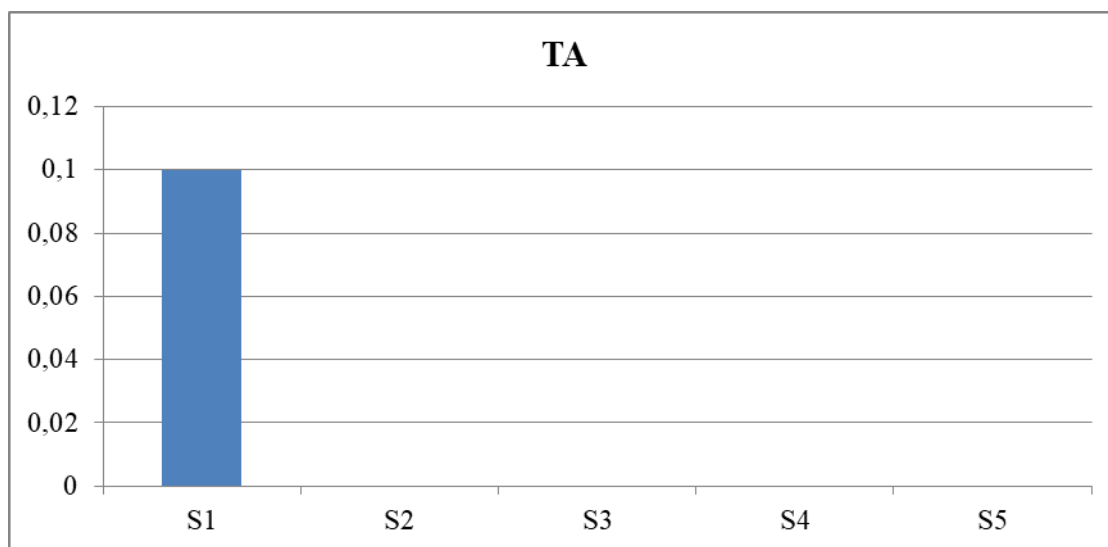


Figure 37 : Variations d'Alcalinité totale (TA) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les valeurs d'alcalinité totale (TA) mesurées dans les stations varient de 0 meq/L à 0,1 meq/L, avec une moyenne très faible de 0,02 meq/L et une variance de 0,002, traduisant une quasi-absence de pouvoir tampon dans la majorité des stations. Seule la station S1 présente une valeur détectable (0,1 meq/L), tandis que toutes les autres stations affichent des valeurs nulles, ce qui pourrait être dû à des concentrations très faibles en carbonates et bicarbonates, inférieures au seuil de détection des méthodes de laboratoire, ou à une réelle absence de composés alcalins dans le milieu. Ces résultats sont nettement inférieurs aux seuils de qualité définis pour l'eau potable ($\geq 0,1$ meq/L, soit ~ 5 mg/L CaCO_3) et surtout pour l'irrigation ($\geq 0,5$ meq/L, soit ~ 25 mg/L CaCO_3). Une telle faible alcalinité signifie que l'eau possède une faible capacité de neutralisation des acides, ce qui la rend plus sensible aux variations de pH, notamment en cas d'apport acide (pluies acides, pollution, activité biologique intense).

Enfin, ces résultats suggèrent une vulnérabilité du milieu aquatique face aux changements chimiques, et appellent à une surveillance du pH et de la stabilité du système, notamment dans les zones où l'équilibre acido-basique est essentiel pour la vie aquatique.

1.1.2.11 Alcalinité totale corrigée (TAC) :

La TAC correspond à une forme ajustée de l'alcalinité totale, qui prend en compte l'influence de la température et du pH sur l'équilibre des espèces carbonatées (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}). Ces ajustements permettent une évaluation plus précise du pouvoir tampon réel du milieu aquatique dans ses conditions naturelles. En effet, les équilibres chimiques

entre les différentes formes du carbone inorganique dissous sont dépendants du pH et de la température, ce qui peut influencer significativement la réponse du système à une acidification. La TAC est ainsi particulièrement utile dans les études écologiques fines et dans la gestion des milieux sensibles, car elle affine l'interprétation de la stabilité chimique du système aquatique.

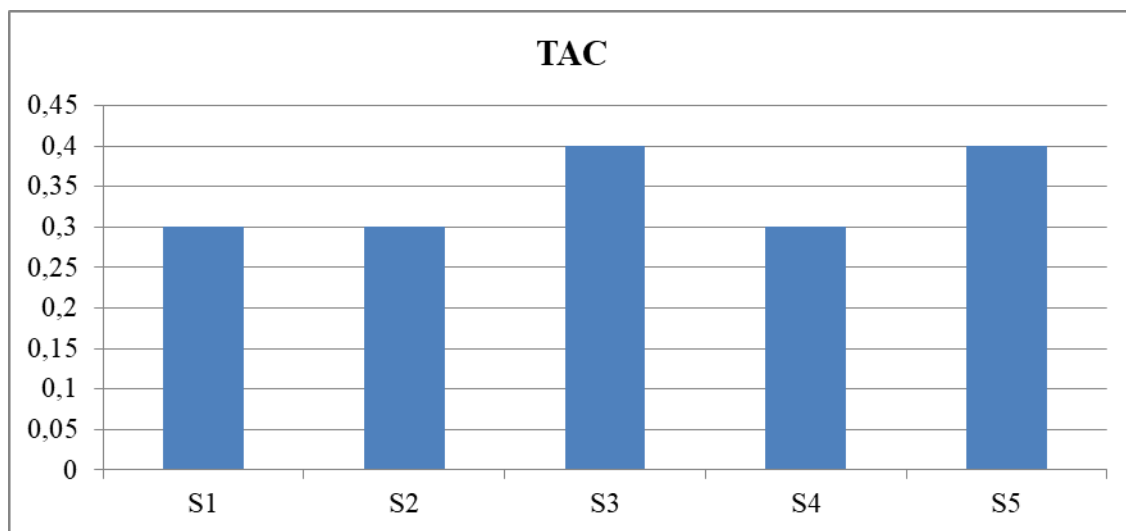


Figure 38 : Variations d'Alcalinité totale corrigée (TAC) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les valeurs de l'alcalinité totale corrigée (TAC) se situent entre 0,3 mg/L (S1, S2, S4) et 0,4 mg/L (S3, S5), avec une moyenne de 0,34 mg/L et une faible variance de 0,003, traduisant une légère variation entre stations. Bien que les valeurs soient homogènes, elles restent très faibles en termes absolus, ce qui confirme une faible capacité tampon des eaux analysées, même après correction tenant compte du pH et de la température. Cette alcalinité corrigée, bien que légèrement plus élevée que l'alcalinité brute (TA), reste nettement inférieure aux seuils requis pour une eau stable face aux fluctuations acides, que ce soit pour l'usage domestique (généralement ≥ 5 mg/L CaCO_3) ou pour l'irrigation (≥ 25 mg/L CaCO_3). Une telle faiblesse en TAC indique que l'eau étudiée est mal protégée contre les variations de pH, ce qui peut affecter la stabilité des équilibres chimiques (comme les formes de nutriments ou la solubilité des métaux) et la biologie aquatique.

Enfin, malgré une meilleure estimation que la TA brute, la TAC reste insuffisante pour assurer une bonne résilience chimique du milieu. Il est donc conseillé de surveiller régulièrement le pH et d'envisager les sources potentielles d'acidification (naturelles ou anthropiques).

1.1.2.12 Azote inorganique dissous (DIN ou NID)

Le DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen) regroupe les formes minérales de l'azote dissous dans l'eau, à savoir : l'ammonium (NH_4^+), le nitrite (NO_2^-) et le nitrate (NO_3^-). Ces formes sont directement biodisponibles pour les producteurs primaires (phytoplancton, macrophytes) et jouent un rôle clé dans la productivité des écosystèmes aquatiques. Le DIN est un indicateur global de la charge en azote et permet d'évaluer l'intensité des apports nutritifs dans un milieu, qu'ils soient d'origine naturelle (recyclage de la matière organique) ou anthropique (engrais, eaux usées, ruissellements agricoles). Des concentrations élevées de DIN favorisent l'eutrophisation et peuvent entraîner des déséquilibres écologiques, comme des proliférations algales et une diminution de l'oxygène dissous. Le suivi du DIN est donc essentiel pour diagnostiquer la qualité de l'eau et prévenir les désordres trophiques.

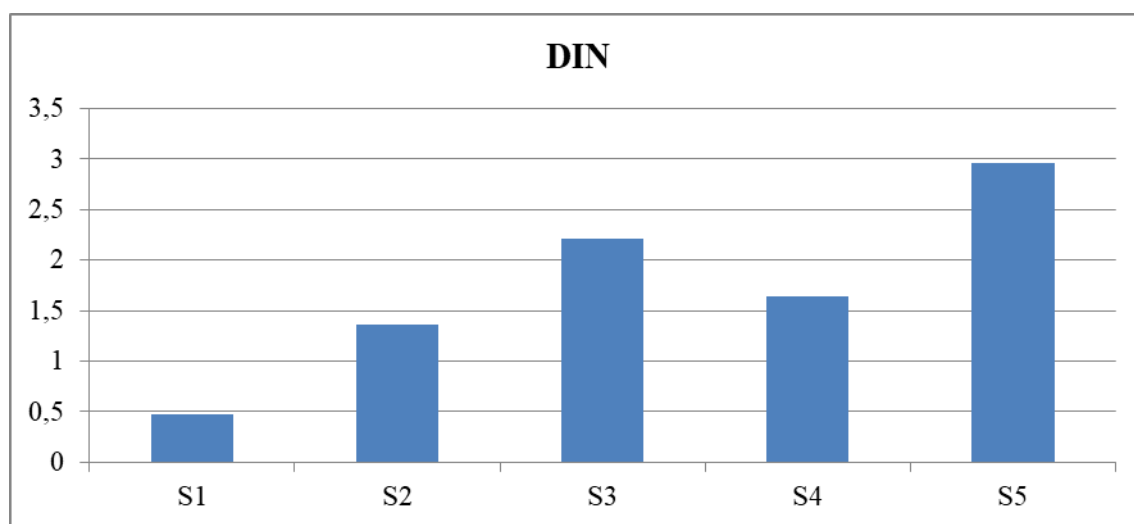


Figure39 :Variations d'Azote inorganique dissous (TAC) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en DIN (azote inorganique dissous) varient considérablement d'une station à l'autre, allant de 0,48 mg/L (S1) à 2,96 mg/L (S5). La moyenne est de 1,73 mg/L et la variance relativement élevée (0,8627) témoigne d'une hétérogénéité marquée entre les stations, probablement liée à des apports variables en formes minérales d'azote (ammonium NH_4^+ , nitrites NO_2^- et nitrates NO_3^-). Le DIN est un bon indicateur de la disponibilité en azote pour les organismes autotrophes, notamment le phytoplancton. Dans ce cas, les concentrations restent largement inférieures au seuil critique pour l'irrigation (≤ 10 mg/L), ce qui suggère une absence de risque agronomique direct. Toutefois, les valeurs élevées observées à S3, S4 et S5 peuvent traduire une pression anthropique plus forte, notamment par lessivage d'engrais

agricoles ou rejets domestiques, surtout si elles coïncident avec des concentrations élevées en nitrates ou ammonium.

En l'absence de norme pour l'eau potable, une surveillance écologique est recommandée, car une charge en azote inorganique élevée peut favoriser l'eutrophisation, surtout si elle s'accompagne d'un excès de phosphore (PO_4). Le couplage DIN/ PO_4 (rapport N/P) peut alors servir d'indicateur de limitation trophique.

1.1.2.13 Rapport N/P (azote/phosphore) :

Le rapport N/P exprime la proportion entre les formes disponibles d'azote inorganique dissous (DIN) et de phosphore (généralement sous forme de PO_4) dans un milieu aquatique. Il s'agit d'un indicateur trophique majeur, utilisé pour diagnostiquer les conditions nutritives influençant la croissance du phytoplancton. Le ratio de Redfield (16:1 en moles, soit environ 7:1 en masse) est considéré comme optimal et équilibré pour le développement du phytoplancton marin et d'eau douce.

Un rapport N/P élevé (> 16) indique souvent une carence en phosphore, tandis qu'un rapport faible (< 16) suggère une limitation en azote. Ces déséquilibres peuvent influencer la structure des communautés algales et favoriser certaines espèces opportunistes (comme les cyanobactéries). Le rapport N/P constitue donc un outil précieux pour interpréter les processus d'eutrophisation et orienter les stratégies de gestion des nutriments.

Indicateur trophique. Le ratio de Redfield (16:1) est considéré comme équilibré. Un déséquilibre signale une limitation par l'un ou l'autre élément.

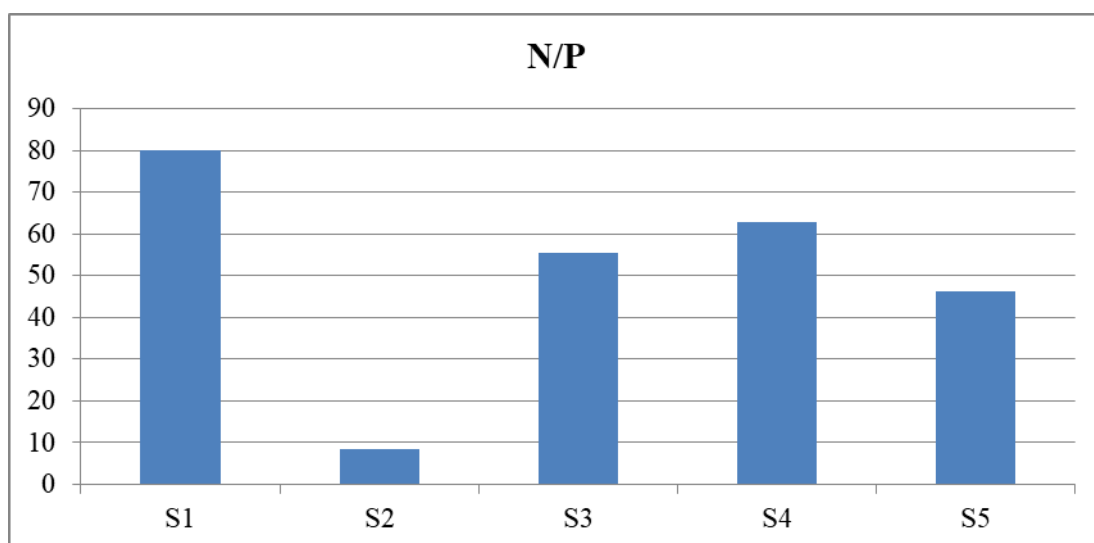


Figure 40: Variations du Rapport N/P (azote/phosphore) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Le rapport azote/phosphore (N/P), indicateur trophique majeur, varie fortement entre les stations, allant de 8,31 (S2) à 80 (S1), avec une moyenne de 50,56 et une variance très élevée (711,40). Cette variabilité traduit une hétérogénéité marquée dans la disponibilité relative de l'azote et du phosphore entre les stations échantillonnées. La référence écologique classique est le rapport de Redfield (16:1), qui représente un équilibre optimal pour la croissance phytoplanctonique. Les valeurs nettement supérieures à ce ratio (comme à S1, S3, S4 et S5) suggèrent une limitation en phosphore dans ces stations : l'azote y est relativement abondant, tandis que le phosphore constitue le facteur limitant. Inversement, la station S2, avec un ratio proche de 8,31, se rapproche de la norme Redfield, indiquant un équilibre plus favorable ou une légère limitation en azote.

Ces résultats révèlent donc une situation potentiellement propice à l'eutrophisation dans plusieurs stations, notamment là où l'excès relatif d'azote est prononcé, ce qui peut favoriser la prolifération d'algues opportunistes si du phosphore venait à s'ajouter. L'interprétation de ce rapport est d'autant plus pertinente lorsqu'elle est croisée avec les concentrations absolues de DIN et PO_4^{3-} .

1.1.2.14 NTU (Total des nutriments) :

Le NTU (ou Total des nutriments) désigne la somme des nutriments majeurs disponibles dans l'eau, généralement les formes dissoutes d'azote (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) et de phosphore (PO_4^{3-}). Il reflète la charge nutritive globale d'un milieu aquatique et sert à évaluer le niveau d'eutrophisation. Ce paramètre est souvent utilisé dans le calcul d'indices trophiques ou d'indices de pollution, permettant de catégoriser les eaux en fonction de leur état écologique (oligotrophe, mésotrophe, eutrophe).

Un NTU élevé indique des apports excessifs en nutriments, souvent liés aux activités humaines (agriculture, rejets domestiques ou industriels), et peut favoriser des proliférations algales nuisibles, une diminution de l'oxygène dissous et une dégradation de la biodiversité. Le suivi du NTU constitue ainsi un indicateur synthétique pertinent pour la surveillance environnementale et la gestion durable des ressources en eau.

Le NTU reflète la charge nutritive globale. Utilisé dans le calcul d'indice de pollution trophique.

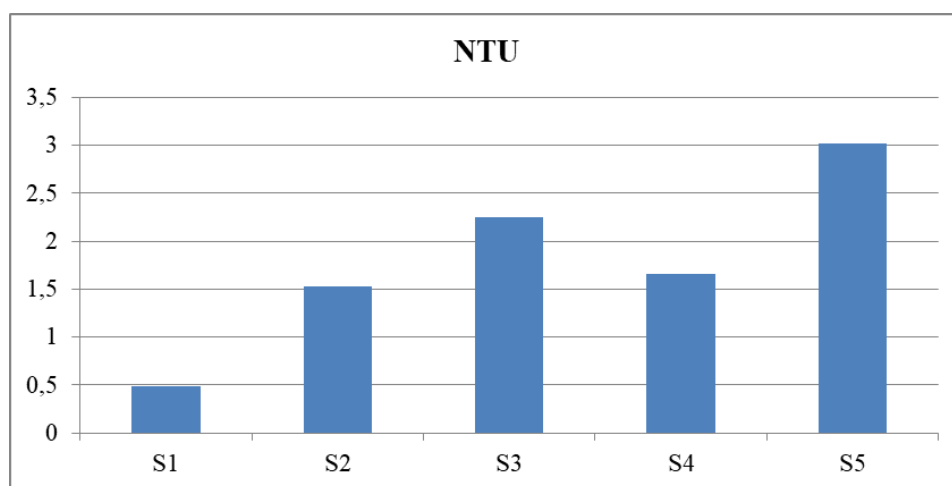


Figure41 : Variations du Total des nutriments (NTU) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les concentrations en NTU (Total des nutriments) varient de 0,49 mg/L (S1) à 3,02 mg/L (S5), avec une moyenne de 1,79 mg/L et une variance relativement élevée de 0,87475, ce qui indique une forte disparité entre les stations. Ce paramètre regroupe les principales formes de nutriments minéraux disponibles (essentiellement l'azote inorganique et le phosphate), et reflète ainsi la charge trophique globale du milieu aquatique. Bien qu'il n'existe pas de norme officielle pour l'eau potable en ce qui concerne le NTU (dans ce sens total), les valeurs observées sont inférieures aux seuils indicatifs pour l'irrigation (5 à 10 mg/L), ce qui ne suggère aucun risque immédiat pour les usages agricoles. Cependant, les valeurs élevées enregistrées dans les stations S3, S4 et surtout S5 (avec une valeur maximale de 3,02 mg/L) pourraient être le signe d'apports nutritifs excessifs, potentiellement liés à des rejets anthropiques, ruissellements agricoles ou à une accumulation de matière organique.

Ces concentrations sont particulièrement intéressantes à mettre en relation avec les rapports N/P et Si/N, ainsi qu'avec les observations biologiques (développement du phytoplancton, prolifération d'algues), dans une logique de surveillance du risque d'eutrophisation.

1.1.2.15 Rapport Si/N

Le rapport Si/N exprime la proportion entre le silicium disponible (généralement sous forme de Si(OH)_4) et l'azote inorganique dissous (DIN). Ce ratio est particulièrement pertinent pour le suivi des communautés phytoplanctoniques, car il reflète l'équilibre entre les nutriments nécessaires à la croissance des diatomées, qui ont besoin à la fois de silicium et d'azote pour se développer.

Un rapport Si/N élevé favorise les diatomées, considérées comme bénéfiques pour la chaîne trophique. À l'inverse, un rapport faible (<1 , selon les seuils écologiques) peut limiter leur développement, au profit d'algues non siliceuses, comme certaines cyanobactéries ou dinoflagellés, souvent associées à des épisodes de floraisons nuisibles. Le suivi de ce rapport permet donc de prédire des changements dans la composition du phytoplancton et d'anticiper les risques d'eutrophisation déséquilibrée.

Le rapport Si/N mesure l'adéquation entre silicium et azote pour les diatomées. Un rapport faible limite leur croissance.

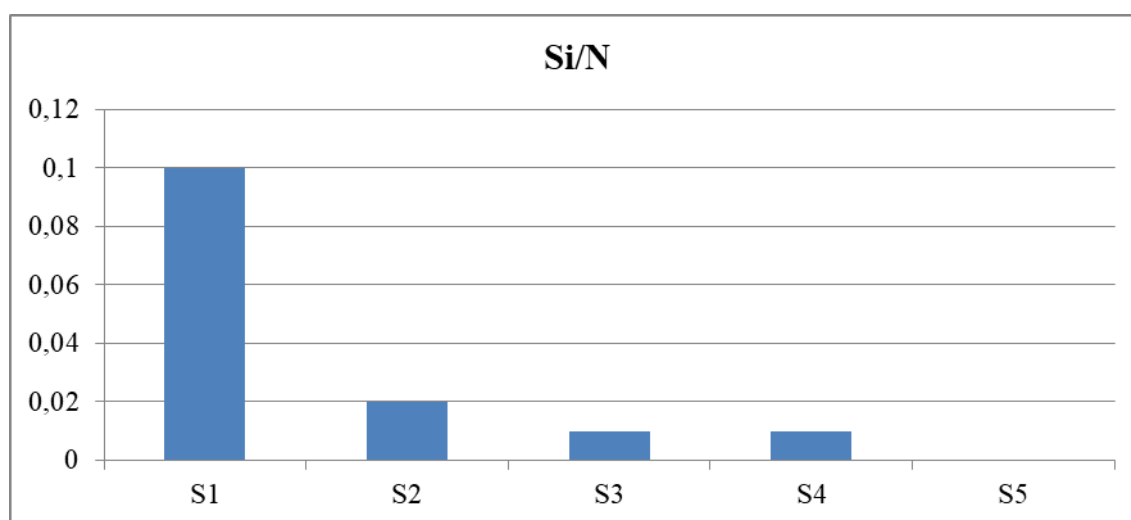


Figure42 : Variations du Rapport (Si/N) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Le rapport Si/N observé varie de 0 (S5) à 0,1 (S1), avec une moyenne très faible de 0,028 et une faible variance (0,00167), traduisant une homogénéité globale dans la carence relative en silicium par rapport à l'azote inorganique dissous. Ces rapports extrêmement bas indiquent une limitation sévère en silicium, un nutriment indispensable à la croissance des diatomées, groupe majeur du phytoplancton. En contexte écologique, un rapport Si/N faible (<1) empêche souvent le développement des diatomées, laissant place à d'autres groupes algaux comme les chlorophycées ou cyanobactéries, dont certaines espèces peuvent être moins bénéfiques voire nuisibles (toxiques, bloom). Le cas de S5, avec un rapport nul, est particulièrement révélateur : il s'agit d'un milieu riche en azote mais totalement carencé en silicium, ce qui constitue un déséquilibre marqué des conditions nutritives.

L'interprétation de ce ratio, combinée aux concentrations de DIN, PO_4^{3-} et au rapport N/P, est essentielle pour anticiper les changements dans la structure du phytoplancton, ainsi que les risques d'eutrophisation déséquilibrée. Le suivi saisonnier de ce paramètre est donc recommandé, surtout dans les stations montrant une carence chronique en silice.

1.1.2.16 IM (Indice de minéralisation)

L'indice de minéralisation (IM) est un paramètre synthétique qui permet d'évaluer la charge minérale totale d'une eau, en exprimant le niveau global d'ions dissous. Il intègre principalement les cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-), et reflète l'intensité des échanges géochimiques entre l'eau et les roches du bassin versant, ainsi que les influences anthropiques (rejets, engrais, lessivage des sols, etc.).

Un IM élevé indique une minéralisation forte, typique des eaux salines ou des zones à forte évaporation ou contamination, tandis qu'un IM faible correspond à une eau douce peu minéralisée. Cet indice est souvent utilisé pour classer les eaux naturelles, détecter des changements de qualité ou orienter les usages possibles (consommation, irrigation, industrie).

L'indice de minéralisation indique le niveau global d'ions dissous. Apprécie la charge minérale totale de l'eau. Il est généralement calculé à partir des résultats d'analyses ioniques ou estimé via la conductivité électrique, à laquelle il est fortement corrélé.

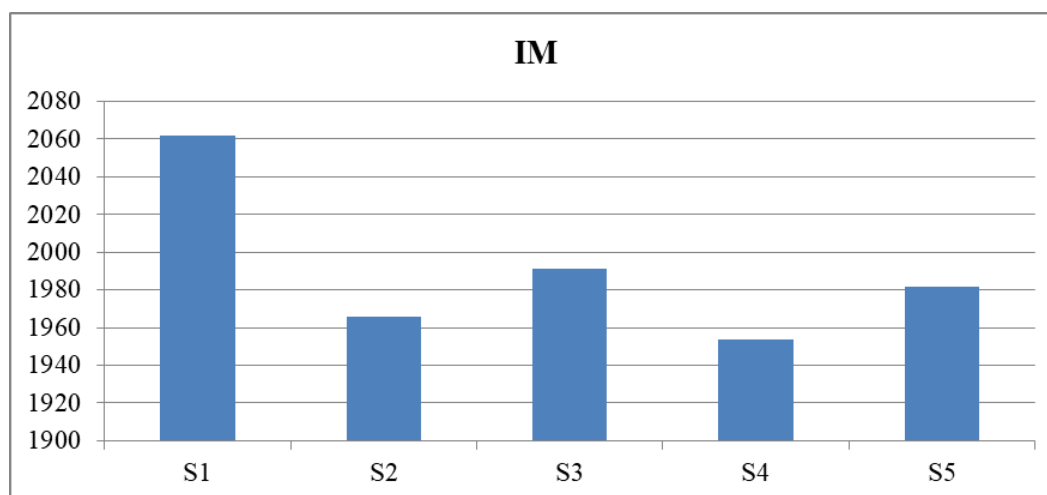


Figure43 : Variations de l'Indice de minéralisation dans le barrage de Beni Haroun (2025).

L'indice de minéralisation (IM) varie entre 1954 mg/L (S4) et 2062 mg/L (S1), avec une moyenne de 1991 mg/L et une variance modérée (1779). Ces valeurs indiquent une minéralisation relativement élevée, traduisant une forte présence d'ions dissous dans les eaux analysées. Les niveaux enregistrés se rapprochent du seuil supérieur toléré pour l'eau potable (généralement fixé autour de 2000 mg/L pour les TDS), ce qui pourrait altérer le goût de l'eau et affecter certaines populations sensibles (personnes âgées, nourrissons, etc.). Pour l'irrigation, ces valeurs restent globalement acceptables, notamment pour les cultures modérément tolérantes à la salinité, mais peuvent commencer à poser des problèmes de

salinisation des sols si l'eau est utilisée intensivement et sans gestion appropriée (drainage, rotation culturale).

L'IM étant une somme globale des sels dissous, il est influencé par des paramètres comme la conductivité électrique, les TDS, ainsi que les concentrations en ions majeurs (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} ...). Les valeurs relevées sont cohérentes avec celles de la conductivité ($\approx 960 \mu\text{S/cm}$) et des TDS ($\approx 1030 \text{ mg/L}$) observées dans les mêmes stations.

1.1.2.17 Rapport O2 / Turbidité :

Le rapport O2/Turbidité est un indicateur combiné permettant d'évaluer la qualité oxygénée de l'eau en tenant compte de la charge en matières en suspension. Il met en relation la disponibilité de l'oxygène dissous avec le niveau de turbidité, souvent lié à la présence de matières organiques, de sédiments ou de phytoplancton.

Un rapport élevé suggère une bonne oxygénation malgré la présence de particules, ce qui est généralement favorable au maintien de la vie aquatique. En revanche, un rapport faible (forte turbidité et faible teneur en O2) peut indiquer une activité de décomposition organique intense, un apport excessif de matières polluantes, ou une eutrophisation avancée, créant des conditions potentiellement anaérobies. Ce rapport est particulièrement utile pour identifier des zones à risque écologique, détecter des déséquilibres biogéochimiques et surveiller l'efficacité des processus d'autoépuration dans les systèmes aquatiques. Le rapport O2/Turbidité reflète la qualité oxygénée en lien avec les matières en suspension. Un rapport bas peut indiquer une dégradation organique active.

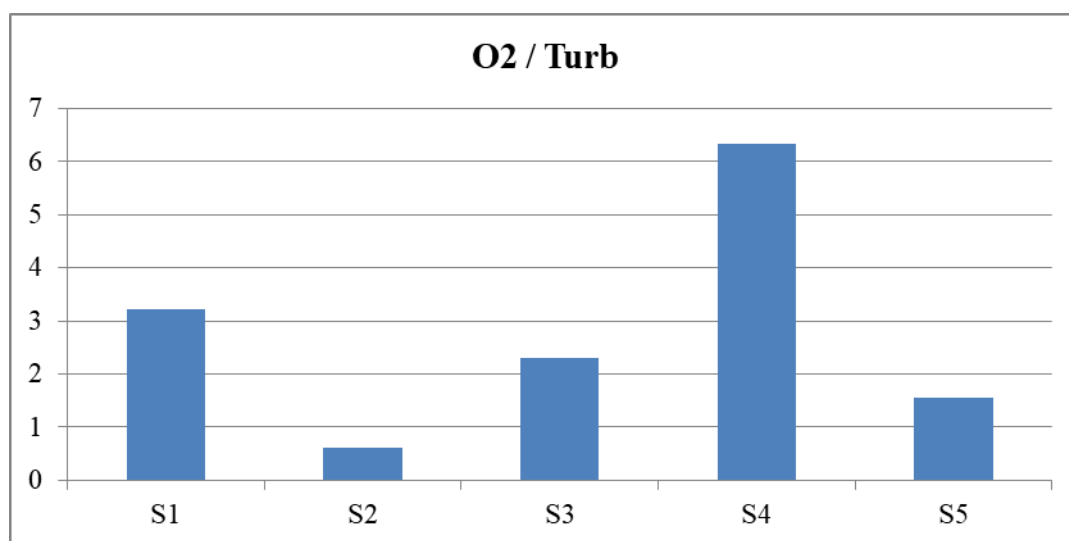


Figure44: Variations du Rapport (O2/Turbidité) dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Le rapport O_2 /Turbidité varie de 0,62 (S2) à 6,34 (S4), avec une moyenne de 2,81 et une variance relativement élevée (4,82), traduisant une grande hétérogénéité entre les stations échantillonnées. Ce ratio exprime la quantité d'oxygène dissous disponible par unité de turbidité et constitue un indicateur indirect de la qualité de l'eau et de son état trophique.

Des valeurs élevées (ex. : S4 avec 6,34) suggèrent une eau bien oxygénée avec peu de matières en suspension, traduisant un milieu peu perturbé et plus sain, favorable à la vie aquatique. À l'inverse, des valeurs faibles (ex. : S2 avec 0,62) révèlent une faible oxygénation relative à la charge particulaire, pouvant refléter des apports organiques élevés, une dégradation active de matière ou une stagnation de l'eau, toutes conditions défavorables à la faune sensible.

Ainsi, ce rapport permet de relier deux aspects fondamentaux :

- la qualité oxygénée (mesurée par l' O_2 /Turbidité),
- et la transparence du milieu (reflétée par la turbidité).

L'analyse spatiale de ce rapport indique que certaines stations (comme S2 et S5) pourraient faire l'objet de pressions anthropiques plus marquées, tandis que d'autres (comme S4 et S1) semblent bénéficier de conditions physico-chimiques plus équilibrées.

Tableau 3 : Statistiques descriptives des paramètres physicochimiques des eaux dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025

paramètres	Min	Max	Moy	Ecart-type (n-1)	Ecart-type	var	(SE)
NO2	0.0600	1.1000	0.6280	0.2904	0.3981	0.1585	0.1299
PO4	0.0100	0.1600	0.0600	0.0400	0.0587	0.0035	0.0179
SiOH4	0.0100	0.0500	0.0200	0.0120	0.0173	0.0003	0.0054
NH4	0.1400	0.7100	0.4080	0.1696	0.2221	0.0493	0.0758
SO4	0.8000	0.9000	0.8480	0.0264	0.0370	0.0014	0.0118
NO3	0.0300	1.3300	0.6960	0.4368	0.5417	0.2935	0.1953

Na	15.6000	138.0000	63.4000	55.0800	62.9941	3968.2550	24.6325
Cl	5.2000	6.3000	5.8400	0.3920	0.4722	0.2230	0.1753
SO4/Cl	0.1300	0.1600	0.1460	0.0112	0.0134	0.0002	0.0050
TA	0.0000	0.1000	0.0200	0.0320	0.0447	0.0020	0.0143
TAC	0.3000	0.4000	0.3400	0.0480	0.0548	0.0030	0.0215
DIN	0.4800	2.9600	1.7300	0.6840	0.9288	0.8627	0.3059
N/P	8.3100	80.0000	50.5560	18.6208	26.6720	711.3973	8.3275
NTU	0.4900	3.0200	1.7900	0.6760	0.9353	0.8748	0.3023
Si/N	0.0000	0.1000	0.0280	0.0288	0.0409	0.0017	0.0129
Tem	28.0000	29.0000	28.400	0.4800	0.5477	0.3000	0.2147
Turb	6.1000	64.3000	24.5800	15.8960	23.2126	538.8270	7.1089
PH	8.6000	9.3000	8.8800	0.2160	0.2775	0.0770	0.0966
TDs	1010.0000	1074.0000	1031.40000	17.0400	24.9760	623.8000	7.1089
O2	37.4000	40.0000	38.3400	0.8080	1.0526	1.1080	0.3613
Cond	944.0000	988.0000	959.6000	11.9200	17.2714	298.3000	5.3308
Sal	0.5000	0.5000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
IM	1954.0000	2062.0000	1991.0000	28.4000	42.1782	1779.0000	12.7009
O2/Turb	0.6221	6.3443	2.8067	1.5778	2.1962	4.8233	0.7056

Min : Minimum - **Max** : Maximum - **Moy** : Moyenne - **Écart-type (n-1)** : Écart-type échantillonnal - **Écart-type** : Écart-type populationnel - **Var** : Variance - **SE** : Erreur standard (Standard Error)

Le tableau regroupe les statistiques classiques : valeurs minimale, maximale, moyenne, écart-type (avec et sans Bessel), variance et erreur standard (SE) pour 23 paramètres physico-chimiques. Ces mesures donnent une idée claire sur la variabilité spatiale et la qualité globale de l'eau dans les stations échantillonnées.

Le tableau statistique met en évidence une hétérogénéité notable des paramètres physico-chimiques des eaux du barrage de Beni Haroun, révélant une qualité d'eau globalement variable selon les stations échantillonnées. Certains paramètres tels que le sodium (Na^+), les nitrates (NO_3^-), la turbidité (Turb) et l'azote inorganique dissous (DIN) présentent des amplitudes et des variances élevées, traduisant des apports différenciés, probablement liés à des sources ponctuelles ou diffuses de pollution d'origine agricole ou domestique. La minéralisation, attestée par des valeurs relativement élevées de la conductivité électrique, des TDS et de l'indice de minéralisation (IM), reflète une forte charge ionique dans l'eau, influencée par le substrat géologique ou les apports anthropiques. Le pH est systématiquement alcalin, dépassant les seuils recommandés pour la potabilité, ce qui peut affecter la biodisponibilité des éléments nutritifs et la composition biologique. Par ailleurs, certains rapports écologiques comme N/P et O_2 /Turb révèlent des déséquilibres trophiques potentiels et des contrastes en termes d'oxygénation et de turbidité entre les stations. Bien que la salinité reste faible et constante, indiquant une eau douce, la faible alcalinité totale témoigne d'un pouvoir tampon limité, ce qui pourrait rendre l'écosystème sensible aux perturbations chimiques. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que les eaux du barrage présentent des caractéristiques physico-chimiques globalement acceptables pour l'irrigation, mais certaines stations révèlent des signaux d'altération de la qualité, nécessitant une surveillance renforcée et une gestion ciblée des sources de pollution.

Tableau 4 : Normes des paramètres physicochimiques des eaux dans le Barrage de Beni Haroune Mila en Avril 2025

	S1	S2	S3	S4	S5	Nor.potable	Nor.irrrigation
NO2	0.06	0.63	0.88	0.47	1.10	$\leq 0,1 \text{ mg/L}$	$\leq 1 \text{ mg/L}$
PO4	0.10	0.16	0.04	0.03	0.06	$\leq 0,5 \text{ mg/L}$	$\leq 2 \text{ mg/L}$
SiOH4	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	$\leq 25\text{--}50 \text{ mg/L}$	Aucune limite

NH₄	0.14	0.71	0.27	0.39	0.53	≤ 0,5 mg/L	≤ 5 mg/L
SO₄	0.85	0.86	0.80	0.90	0.83	≤ 250 mg/L	≤ 960 mg/L
NO₃	0.27	0.03	1.07	0.78	1.33	≤ 50 mg/L	≤ 30 mg/L
Na	126.50	138.00	18.00	18.90	15.60	≤ 200 mg/L	≤ 69–207 mg/L
Cl	5.50	6.00	6.20	6.30	5.20	≤ 250 mg/L	≤ 140–355 mg/L
SO₄(Cl)	0.16	0.14	0.13	0.14	0.16		
TA	0.10	0.30	0.40	0.28	0.38	≥ 0,1 meq/L (≈ 5 mg/L CaCO ₃)	≥ 0,5 meq/L (≈ 25 mg/L CaCO ₃)
TAC	0.30	0.30	0.40	0.30	0.40		
DIN	0.48	1.36	2.21	1.64	2.96	Non réglementé	≤ 10 mg/L
N/P	80.00	8.31	55.30	62.92	46.25	≈ 7–16 (Redfield)	
NTU	0.49	1.53	2.25	1.66	3.02	Non normé	≤ 5–10 mg/L
Si/N	0.10	0.02	0.01	0.01	0.00		
temp	28.00	29.00	29.00	28.00	28.00		

L'analyse globale des paramètres physicochimiques des eaux du barrage de Beni Haroun en 2025 révèle un état de qualité contrasté. Plusieurs paramètres, tels que les concentrations en phosphates (PO_4^{3-}), nitrates (NO_3^-), sulfates (SO_4^{2-}), sodium (Na^+), chlorures (Cl^-), et oxygène dissous (O_2), respectent généralement les normes de potabilité et d'irrigation, indiquant une pollution organique et minérale limitée dans l'ensemble. Cependant, des dépassements notables sont enregistrés pour certains indicateurs critiques, notamment les nitrites (NO_2^-) et l'ammonium (NH_4^+), qui suggèrent une contamination ponctuelle par des rejets organiques ou des effluents domestiques. Le pH, largement supérieur aux seuils recommandés (atteignant 9,3), indique un milieu alcalin pouvant affecter la biodisponibilité des éléments nutritifs et la vie aquatique. De même, la turbidité élevée

(jusqu'à 64,3 NTU) et l'indice de minéralisation ($IM > 4$ dans toutes les stations) traduisent une forte présence de matières dissoutes et une minéralisation marquée, susceptibles de réduire la transparence de l'eau et d'entraver les processus biologiques. Le rapport azote/phosphore (N/P), très déséquilibré dans certaines stations (jusqu'à 80), reflète une limitation probable en phosphore, pouvant influencer la structure du phytoplancton. Bien que la salinité et la conductivité restent dans les marges acceptables pour l'irrigation, la valeur élevée des solides dissous totaux (TDS) dans certaines stations dépasse la norme potable. Ainsi, bien que l'eau soit globalement utilisable pour l'irrigation, son usage pour la consommation humaine directe nécessiterait un traitement préalable, notamment pour corriger l'alcalinité, la turbidité et réduire certains polluants azotés.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) :

Tableau 5 : Composantes Principales (ACP) des paramètres physicochimiques des eaux dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025

Composante	Ecart- type (valeur propre)	Variance expliquée (%)	Variance cumulée (%)
PC1	3.23	45.23%*	45.23%*
PC2	2.52	27.57%*	72.80%*
PC3	1.89	15.60%	88.40%
PC4	1.63	11.60%	100%
PC5	~ 0	0%	100%

Les deux premières composantes (PC1 et PC2) expliquent à elles seules 72.8 % de la variance totale des données. Cela signifie que la majorité de l'information peut être visualisée dans un plan en deux dimensions (PC1 x PC2).

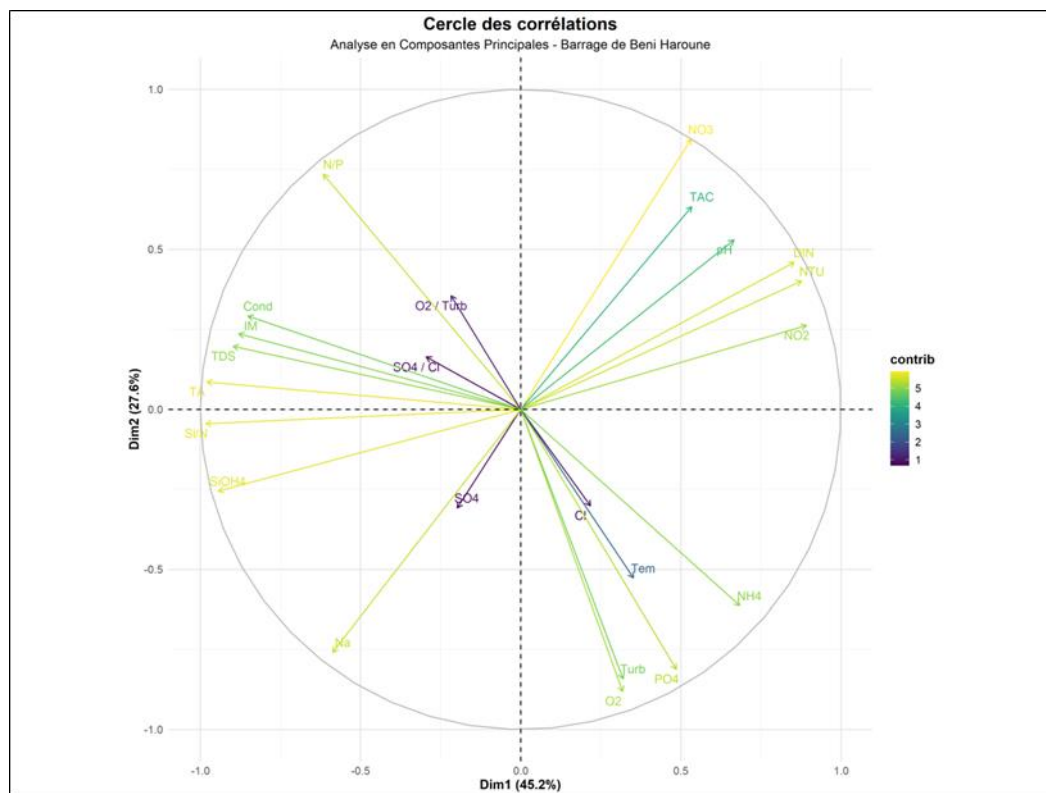


Figure45 : Cercles des corrélations d'Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physicochimiques dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Le cercle des corrélations obtenu à partir de l'analyse en composantes principales (ACP) permet de visualiser les relations entre les variables environnementales et les deux premiers axes factoriels (PC1 et PC2), qui expliquent ensemble 72,8 % de la variance totale (PC1 : 45,2 % ; PC2 : 27,6 %). De manière générale, les variables NO₂, TAC, DIN, pH, NTU et NO₃ sont positivement corrélées à la fois aux axes PC1 et PC2, ce qui signifie qu'elles contribuent conjointement à la structuration principale de l'espace factoriel. À l'opposé, les variables Si/N, Si(OH)₄ et Na sont négativement corrélées par rapport aux deux axes, indiquant une opposition forte aux premières.

D'autres variables, comme Cl⁻, température (Tem), NH₄⁺, PO₄³⁻, turbidité (Turb) et O₂, sont positivement corrélées à l'axe PC1 mais négativement corrélées à PC2, suggérant qu'elles caractérisent principalement les stations influencées par le premier axe. À l'inverse, les variables N/P, conductivité (Cond), matières inorganiques (IM), TDS et TA sont positivement corrélées à PC2 mais négativement à PC1, ce qui traduit une autre dimension de variabilité.

En ce qui concerne le poids de contribution des stations, les stations 4 et 5, très proches du bord du cercle, sont les mieux représentées dans le plan factoriel : elles possèdent des

caractéristiques marquées sur les variables fortement corrélées aux axes. La station 3 montre une contribution moyenne, tandis que les stations 1 et 2, plus proches du centre, sont faiblement représentées par ces deux axes, indiquant une variabilité moins prononcée ou des caractéristiques moins typées par rapport aux variables retenues.

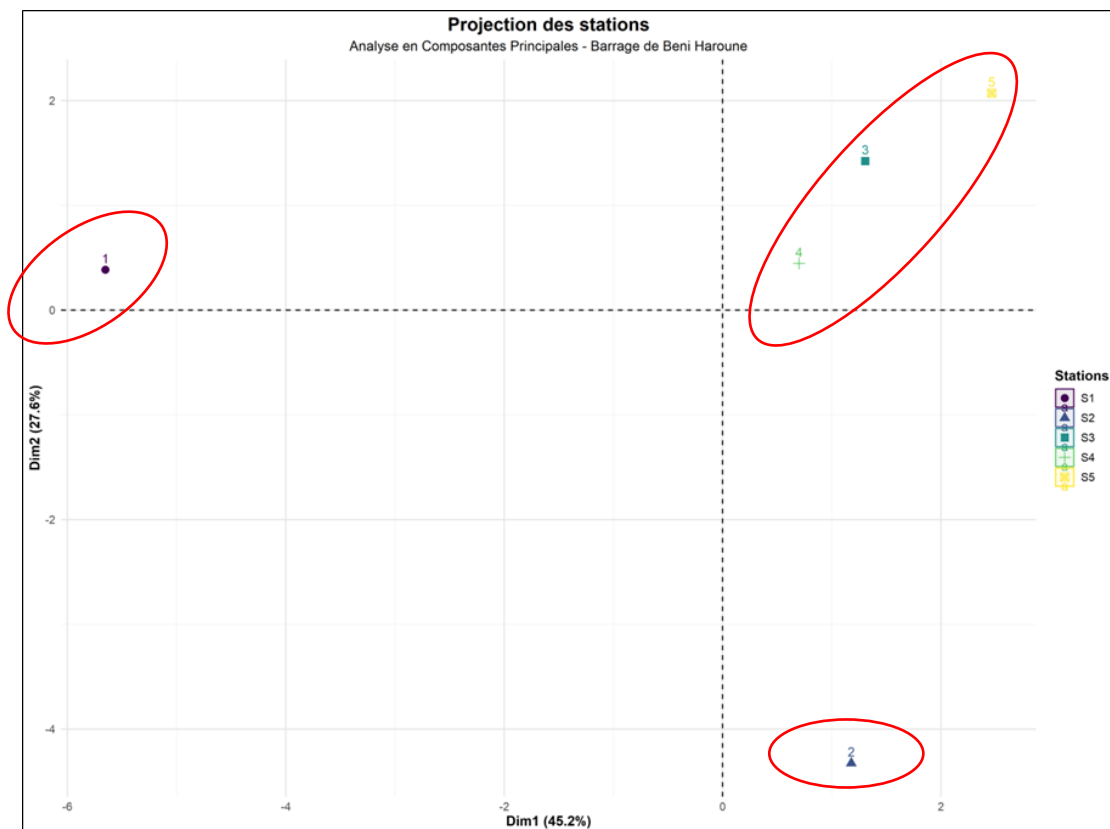


Figure 46: Projections des stations d'Analyse en Composantes Principales (ACP) selon les paramètres physicochimiques dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

La projection des stations d'échantillonnage dans le plan factoriel défini par les deux premières composantes principales (PC1 et PC2), qui expliquent ensemble 72,8 % de la variance totale, permet de visualiser les relations entre les stations en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. On observe clairement un premier groupe composé des stations S3, S4 et S5, positionnées positivement par rapport aux deux axes (PC1 et PC2). Leur proximité indique qu'elles partagent des profils environnementaux similaires, probablement caractérisés par des niveaux élevés de plusieurs paramètres physico-chimiques corrélés positivement avec ces deux axes.

La station S1, située loin du centre, est projetée positivement sur l'axe PC2 et négativement sur PC1. Cette position excentrée montre que cette station est très typée, c'est-à-

dire qu'elle présente des valeurs extrêmes pour certaines variables, ce qui la différencie fortement des autres stations. Par ailleurs, la station S2 est également éloignée du centre, mais elle est projetée positivement sur l'axe PC1 et négativement sur PC2, indiquant un profil physico-chimique distinct des autres stations, influencé par des paramètres associés à PC1.

D'une manière générale, lorsqu'une station est projetée dans la direction d'une variable sur le cercle des corrélations, cela signifie qu'elle présente des valeurs élevées ou très faibles pour cette variable, selon le sens de la corrélation. Cette représentation spatiale met en évidence la variabilité inter-stations et permet d'identifier des groupes homogènes ainsi que des stations singulières pouvant signaler des conditions locales particulières dans le barrage.

Communauté Phytoplanctonique

Tableau 6 :Liste taxonomique des genres identifiés dans le Barrage de Beni Haroune Mila en 2025

Empire	Règne	Embranchement	Classe	Ordre	Famille	Genre	Code
Prokaryota	Bacteria	Cyanophyceae	Cyanophyceae	Chroococcales	Gomphosphaeriaceae	Gomphosphaeria	SP7
					Chroococcaceae	Chroococcus	SP12
Eukaryota	Chromista	Heterokontophyta	Bacillariophyceae	Naviculales	Diploneidaceae	Diploneis	SP2
				Achnanthales	Cocconeidaceae	Cocconeis	SP3
				Bacillariales	Bacillariaceae	Nitzschia	SP4
				Thalassiophysales	Catenulaceae	Amphora	SP6
				Naviculales	Pinnulariaceae	Pinnularia	SP9
			Mediophyceae	Thalassiosirales	Thalassiosiraceae	Thalassiosira	SP13
		Dinoflagellata	Dinophyceae	Gonyaulacales	Ceratiaceae	Ceratium	SP5
	Plantae	Chlorophyta	Chlorophyceae	Volvocales	Volvocaceae	Eudorina	SP1
			Trebouxiophyceae	Chlorellales	Oocystaceae	Oocystis	SP10
			Chlorophyceae	Sphaeropleales	Scenedesmaceae	Scenedesmus	SP11
		Charophyta	Zygnematophyceae	Spirogyrales	Spirogyraceae	Spirogyra	SP8

Inventaire et richesse spécifique :

L'inventaire taxonomique des microorganismes phytoplanctoniques présents dans les échantillons d'eau du barrage de Beni Haroun a permis d'identifier 13 genres distincts, répartis dans une diversité systématique représentative des principales lignées algales d'eau douce. Ces genres se répartissent entre les empires Prokaryota et Eukaryota, relevant respectivement des règnes Bacteria (Cyanobactéries) et Chromista ainsi que Plantae (algues eucaryotes).

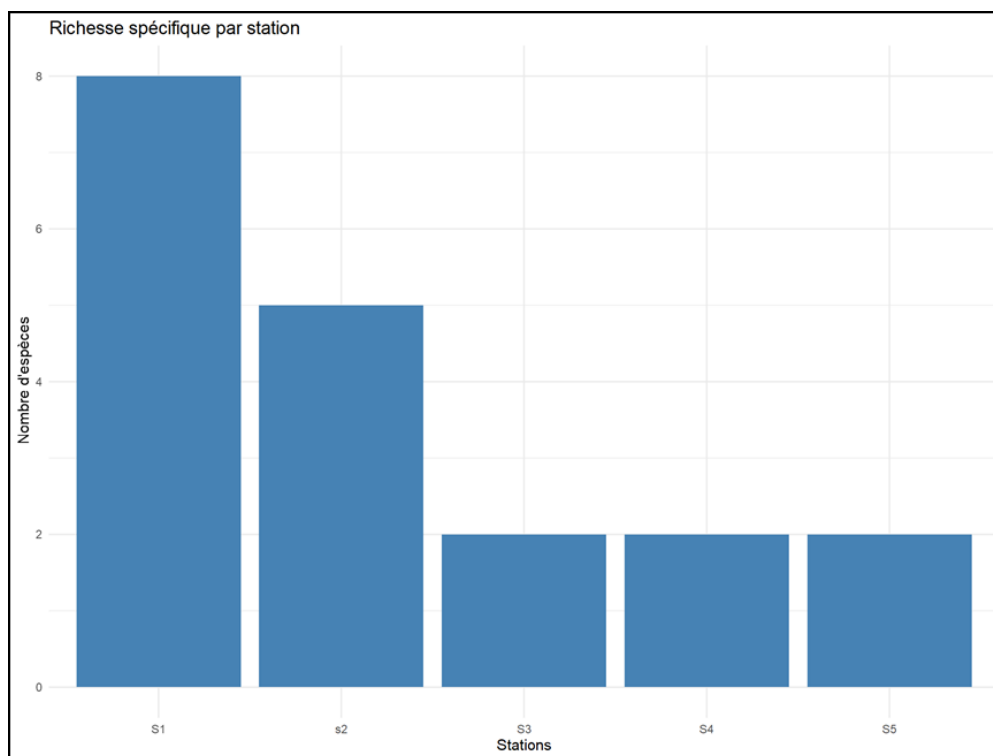


Figure47 : Richesse spécifique du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Au total, les genres recensés appartiennent à 5 embranchements (*Cyanobacteria*, *Heterokontophyta*, *Dinoflagellata*, *Chlorophyta*, *Charophyta*), 8 classes (*Cyanophyceae*, *Bacillariophyceae*, *Mediophyceae*, *Dinophyceae*, *Chlorophyceae*, *Trebouxiophyceae*, *Zygnematophyceae*), 12 ordres (dont *Chroococcales*, *Naviculales*, *Thalassiosirales*, *Gonyaulacales*, *Volvocales*, *Sphaeropleales*, *Spirogyrales*...), 13 familles et 13 genres taxonomiquement individualisés. Cette diversité reflète un peuplement phytoplanctonique équilibré et écologiquement fonctionnel, marqué par la présence de cyanobactéries (*Gomphosphaeria*, *Chroococcus*), de diatomées (*Diploneis*, *Cocconeis*, *Nitzschia*, *Amphora*, *Pinnularia*, *Thalassiosira*), de dinoflagellés (*Ceratium*), ainsi que de chlorophycées (*Eudorina*, *Oocystis*, *Scenedesmus*, *Spirogyra*).

Cette richesse spécifique (S= 13 Genres), structurée selon plusieurs lignées évolutives, témoigne à la fois d'une diversité phylogénétique significative et d'une réponse adaptative à la variabilité des conditions physico-chimiques locales.

Abondance (Abondance relative)

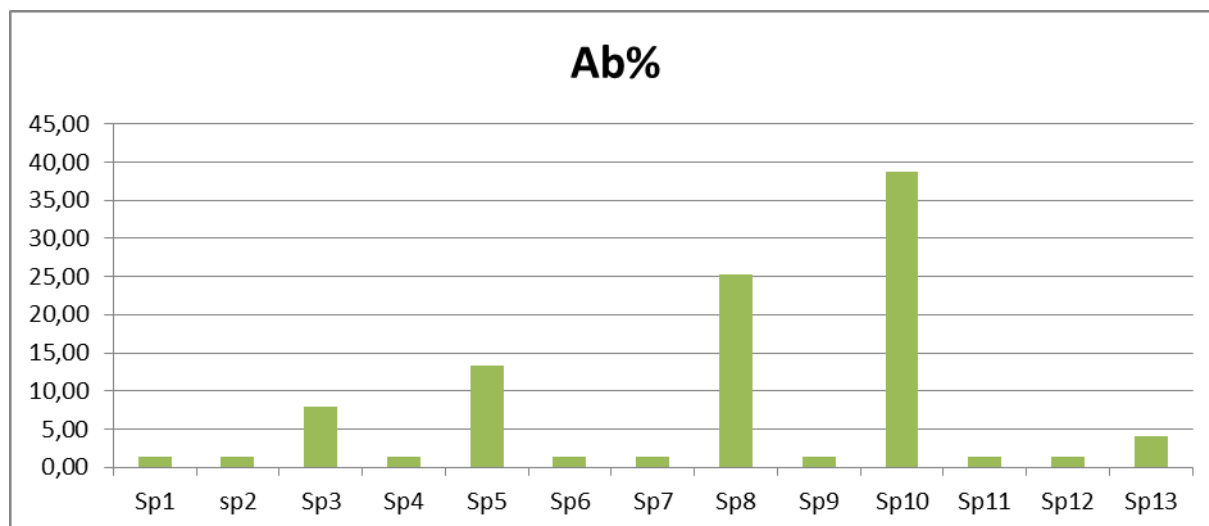


Figure48: Abondance relative des genres identifiés dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

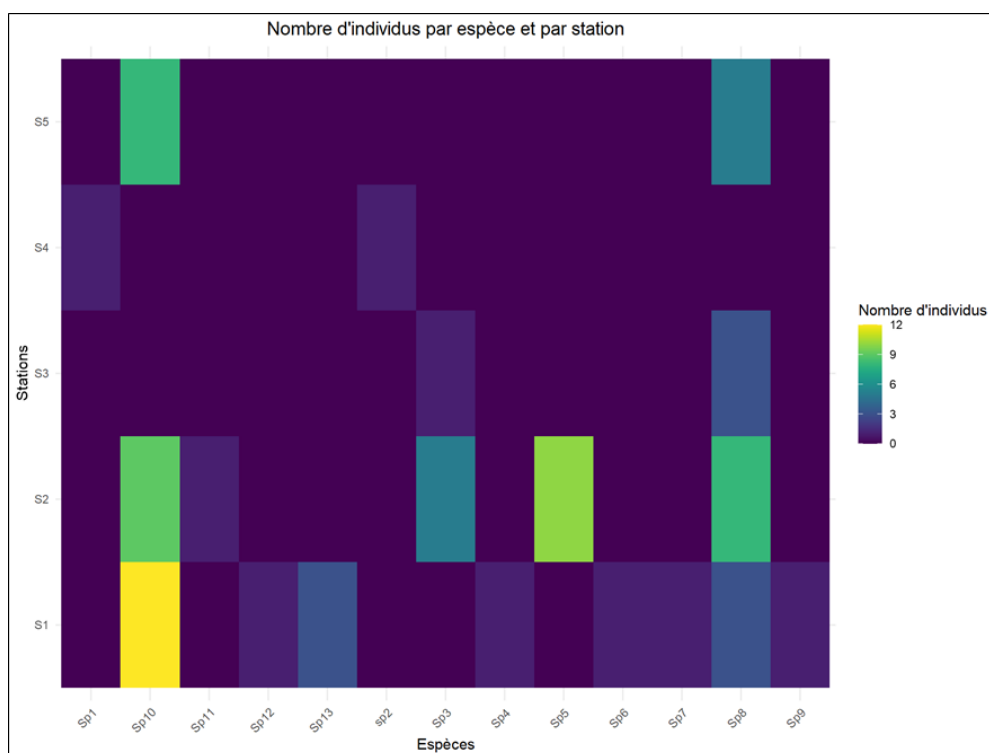


Figure49 : Nombres des individus des genres identifiés dans les stations (barrage de Beni Haroun 2025).

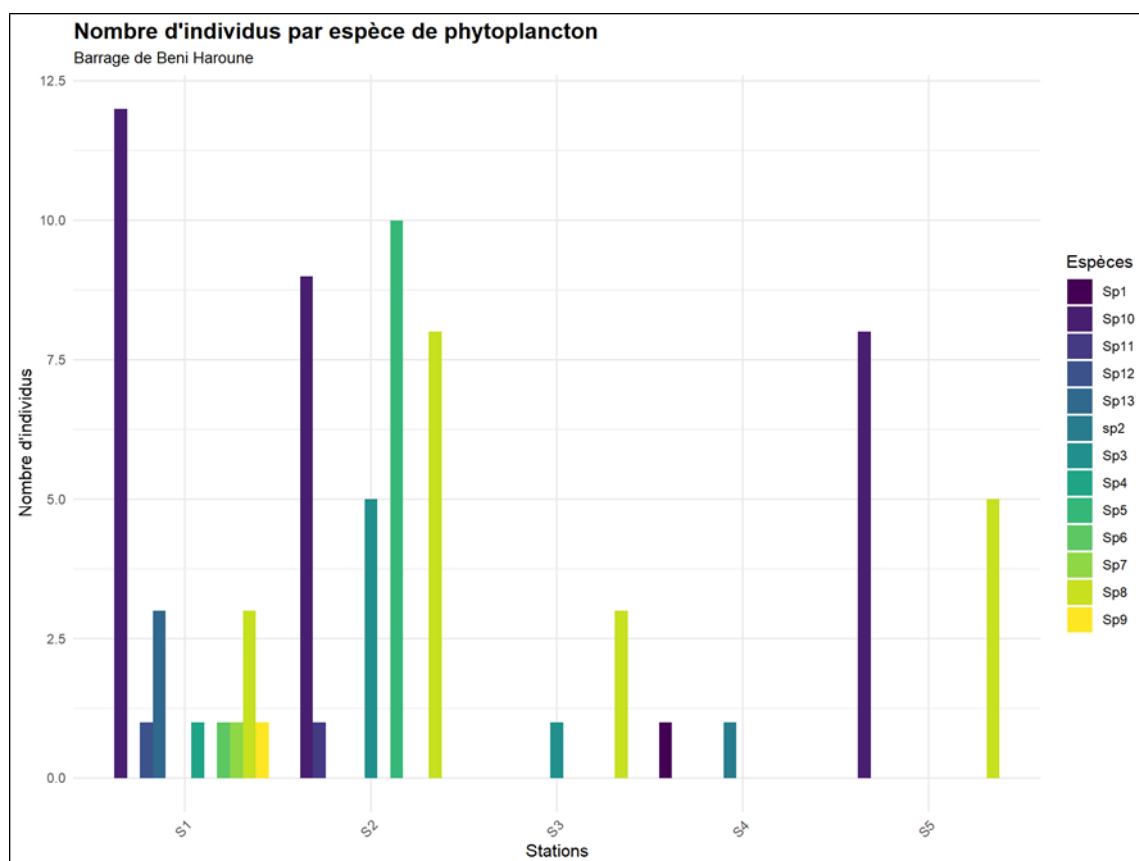


Figure50 : Nombres des individus des genres identifiés dans les stations (barrage de Beni Haroun 2025).

L'analyse de l'abondance relative des genres phytoplanctoniques révèle une nette dominance d'*Oocystis* (SP10), représentant 38,67 % du total des organismes recensés. Elle est suivie par *Spirogyra* (SP8) avec 25,33 %, tandis que *Ceratium* (SP5) affiche une contribution notable de 13,33 %, traduisant une présence significative des chlorophycées filamenteuses et des dinoflagellés dans la structure communautaire. Les diatomées comme *Diploneis* (SP2), *Cocconeis* (SP3), *Nitzschia* (SP4), *Amphora* (SP6), *Pinnularia* (SP9) et *Thalassiosira* (SP13) présentent des abondances variables allant de 1,33 % à 8,00 %, indiquant une diversité modérée au sein du groupe des bacillariophytes. Les cyanobactéries telles que *Gomphosphaeria* (SP7) et *Chroococcus* (SP12), bien que présentes, demeurent peu représentées (1,33 % chacune), suggérant une contribution limitée de ce groupe dans les conditions environnementales observées. Cette distribution inégale des genres reflète une structure phytoplanctonique dominée par des formes eucaryotes vertes et filamenteuses, potentiellement favorisées par des concentrations modérées en nutriments et des conditions physico-chimiques stables.

Fréquence d'occurrence (fréquence centésimale)

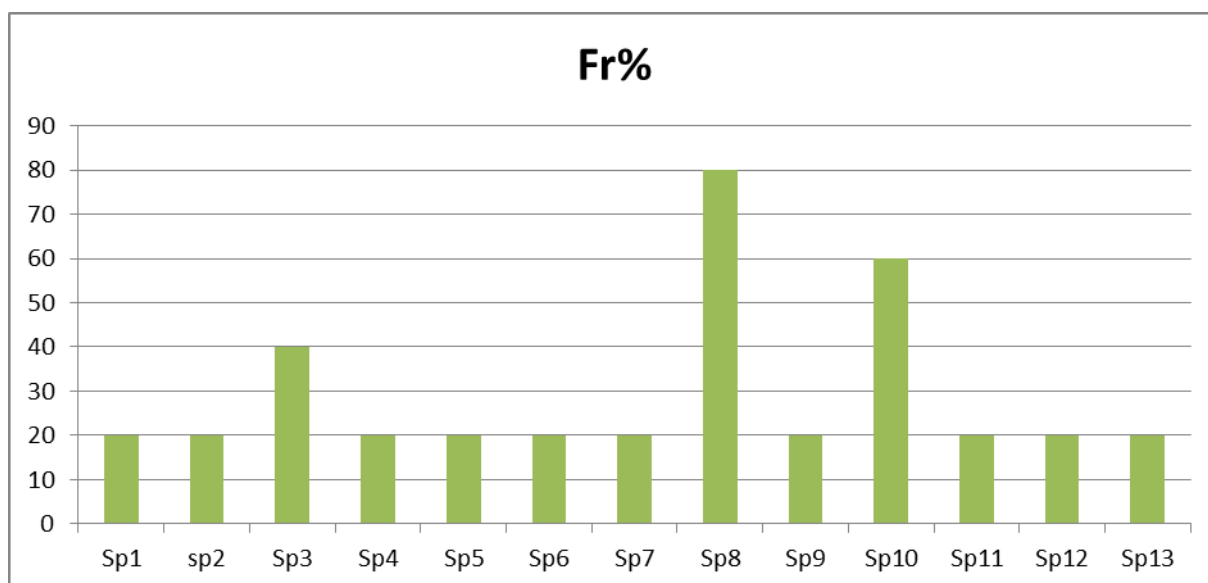
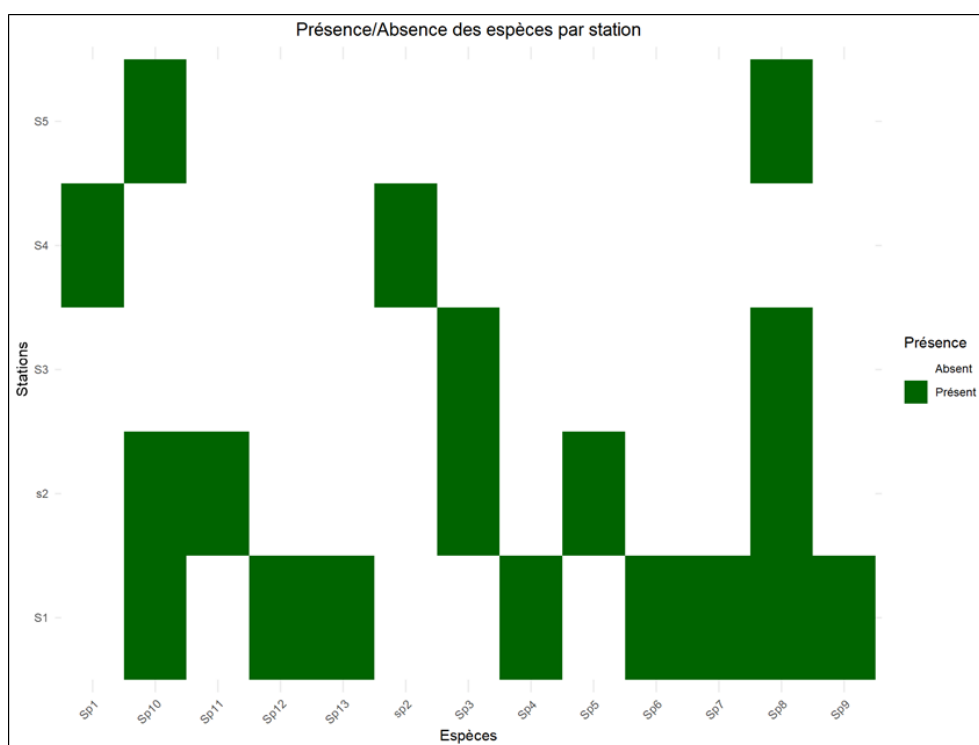


Figure51 :Fréquence d'occurrence des genres identifiés dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).



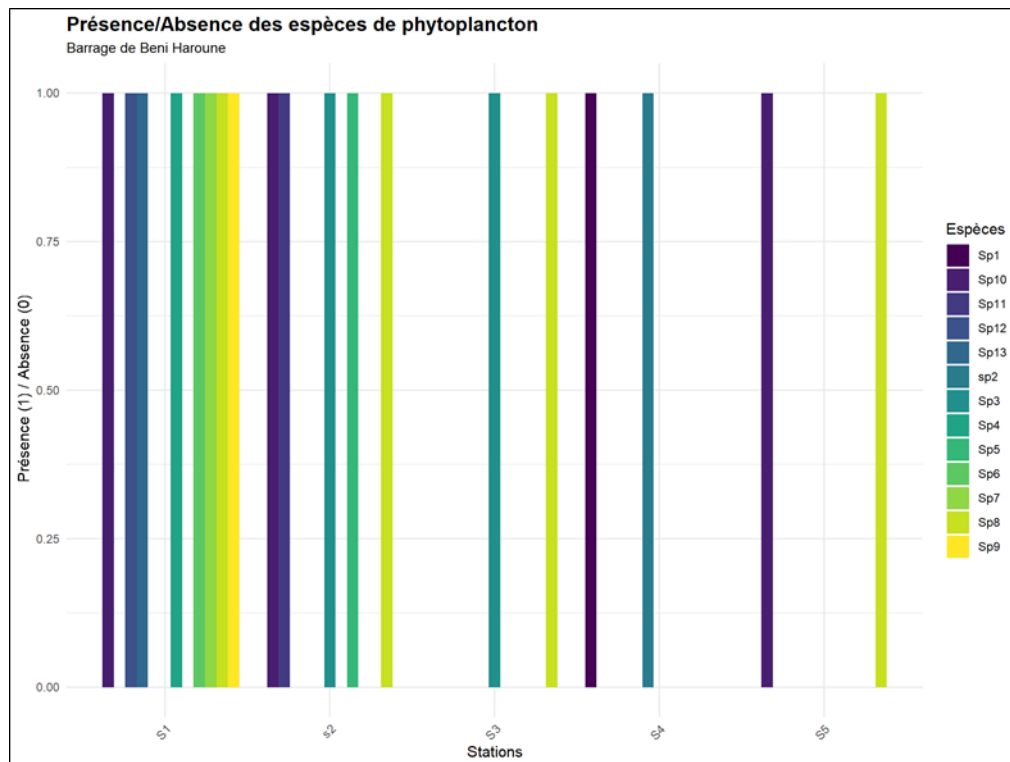


Figure52:Fréquence (Présence/absence) des genres identifiés dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

L'analyse de la fréquence d'occurrence montre une présence très variable des genres phytoplanctoniques dans les stations échantillonnées. *Spirogyra* (SP8) se distingue par une fréquence élevée de 80 %, ce qui indique sa large répartition spatiale et son adaptabilité écologique dans le plan d'eau étudié. Elle est suivie d'*Oocystis* (SP10) avec 60 %, soulignant également une bonne tolérance aux conditions environnementales locales. En revanche, la majorité des autres genres, notamment *Eudorina* (SP1), *Diploneis* (SP2), *Cocconeis* (SP3), *Nitzschia* (SP4), *Ceratium* (SP5), *Amphora* (SP6), *Gomphosphaeria* (SP7), *Pinnularia* (SP9), *Scenedesmus* (SP11), *Chroococcus* (SP12) et *Thalassiosira* (SP13), présentent une fréquence plus faible, limitée à 20–40 %, ce qui reflète une présence sporadique ou localisée, potentiellement influencée par des facteurs abiotiques ou des interactions compétitives. Cette répartition asymétrique suggère que seuls quelques genres possèdent une large amplitude écologique, tandis que d'autres semblent plus sensibles aux variations des conditions hydrologiques ou trophiques du barrage.

Indices de diversité :**Shannon et l'équitabilité :**

L'indice de diversité de Shannon-Wiener (H') est couramment utilisé en écologie pour quantifier la diversité spécifique d'une communauté. Il prend en compte à la fois la richesse spécifique (nombre d'espèces) et l'abondance relative de chaque espèce. Une valeur élevée de H' reflète une grande diversité. À cet indice s'ajoute l'équitabilité (E), qui mesure la répartition uniforme des individus entre les espèces. Elle varie entre 0 et 1, une valeur proche de 1 indiquant une répartition équitable. Ces indices sont essentiels pour évaluer la structure et la stabilité écologique d'un écosystème (Magurran, 2004).

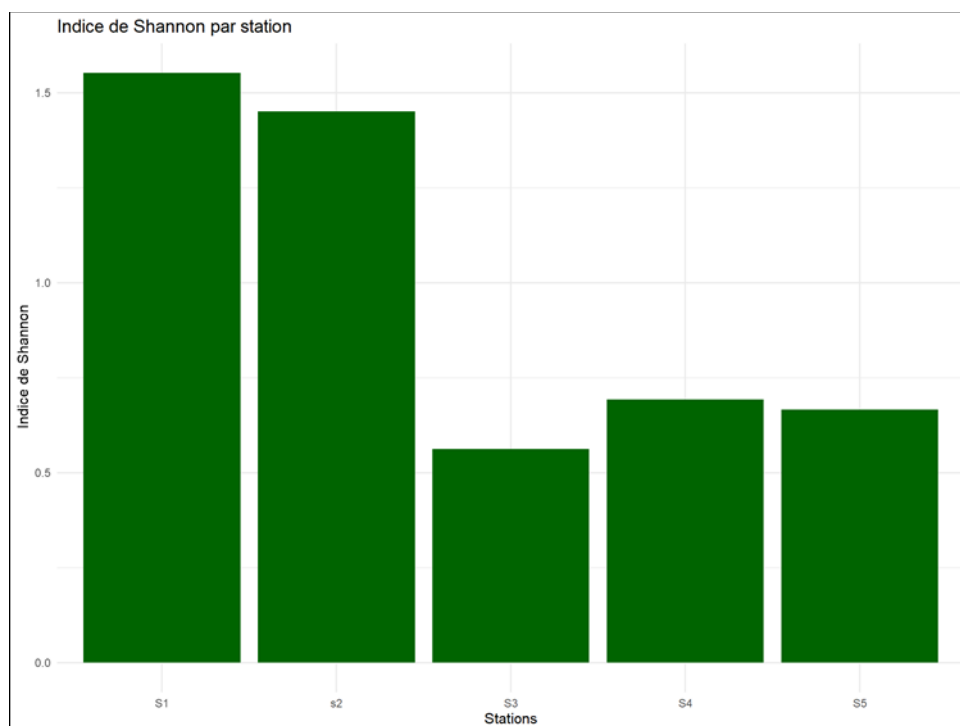


Figure53 :Indice de diversité (Shannon) du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

L'analyse de la communauté phytoplanctonique dans le barrage de Beni Haroun met en évidence une variabilité importante entre les stations en termes de richesse spécifique, de diversité (indices de Shannon et Simpson) et d'abondance totale. La station S1 se distingue par la plus forte richesse spécifique (8 espèces) et le plus haut indice de Shannon (1,55 bits), ce qui reflète une communauté relativement diversifiée, bien que l'indice de Simpson (0,68) indique une légère dominance d'une ou deux espèces. La station S2, avec une richesse spécifique de 5 espèces, affiche un indice de Simpson élevé (0,75) et une abondance totale maximale (33 individus), traduisant une communauté bien répartie, quoique légèrement moins

riche. En revanche, les stations S3, S4 et S5 présentent une richesse spécifique réduite (2 espèces), accompagnée de valeurs faibles pour les indices de Shannon (0,56 à 0,69 bits) et de Simpson (0,375 à 0,5). Cela indique des communautés pauvres, dominées par une espèce majoritaire, avec une abondance faible à modérée (entre 2 et 13 individus). Ces résultats suggèrent des conditions écologiques moins favorables à la diversité phytoplanctonique dans ces stations.

Globalement, la diversité du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun reste modérée, avec des zones à forte diversité (S1, S2), probablement soumises à des conditions physico-chimiques plus stables ou plus riches en nutriments, tandis que d'autres secteurs (S3 à S5) montrent une structure simplifiée, potentiellement affectée par des facteurs limitants tels que la turbidité, l'eutrophisation ou la pression anthropique (Bellinger&Sigee, 2011 ; Callieri&Stockner, 2002).

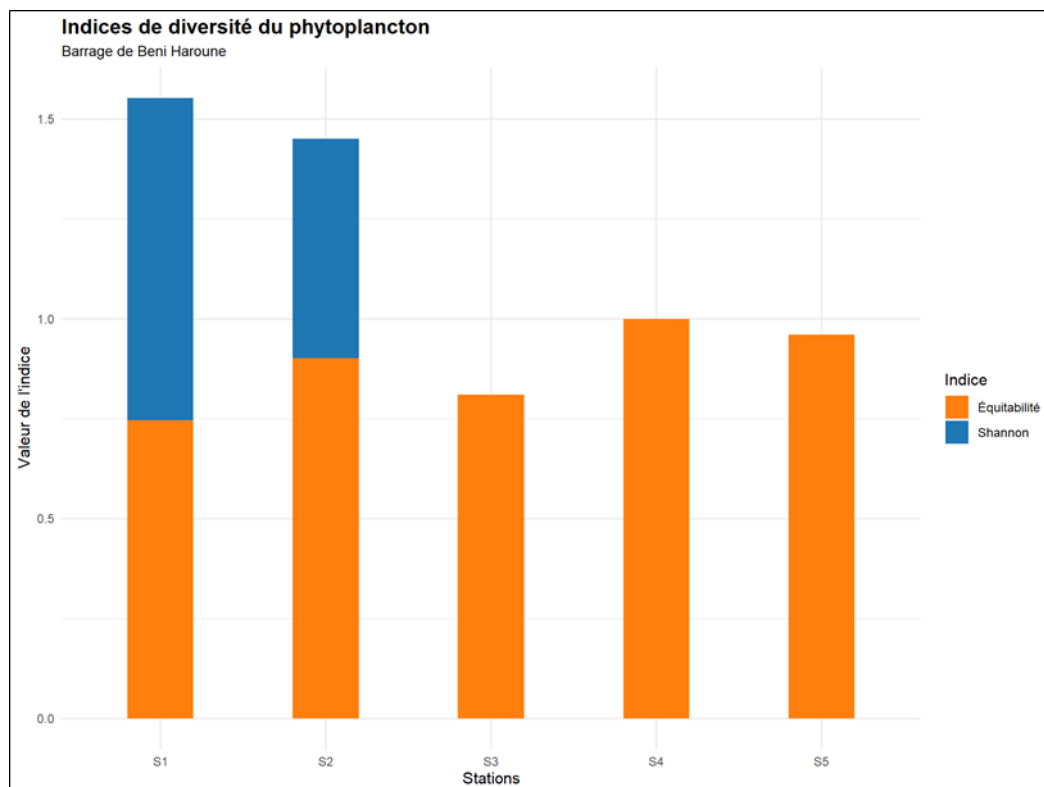


Figure54 :Indices écologique du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

L'analyse de la diversité du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun à travers l'indice de Shannon-Wiener (H'), exprimé en bits, et l'équitabilité (E) met en évidence des différences notables entre les stations. Les stations S1 (1,55 bits) et S2 (1,45 bits) présentent les valeurs les plus élevées de diversité spécifique, traduisant une communauté

phytoplanctonique modérément diversifiée, avec une bonne répartition des individus, particulièrement en S2 où l'équitabilité atteint 0,90. En revanche, les stations S3 (0,56 bits), S4 (0,69 bits) et S5 (0,67 bits) affichent une diversité plus faible, malgré une équitabilité élevée à parfaite ($\geq 0,81$), suggérant une faible richesse spécifique avec des espèces réparties de manière presque équitable. La station S4, avec une équitabilité maximale ($E = 1$), illustre la présence d'un nombre réduit d'espèces en effectifs égaux.

Globalement, la diversité du phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun apparaît modérée à faible, avec une tendance à la dominance de quelques espèces dans certaines stations, ce qui pourrait refléter des conditions environnementales variables ou des pressions anthropiques locales influençant la composition phytoplanctonique (Callieri & Stockner, 2002 ; Bellinger & Sigee, 2011).

Relations paramètres physicochimique et phytoplancton :

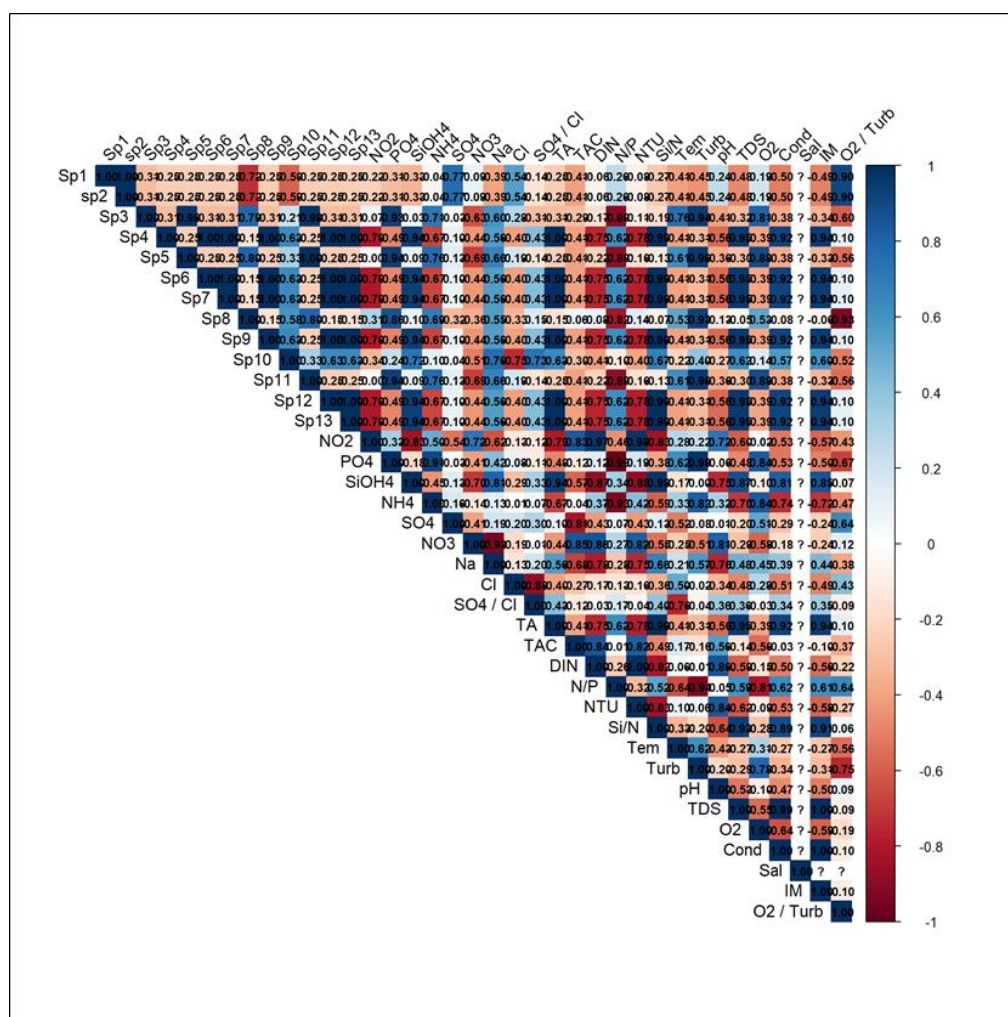


Figure 55 : Matrice des corrélations paramètres physicochimiques et phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

L'analyse de la matrice des corrélations entre les paramètres physico-chimiques et les genres phytoplanctoniques identifiés dans le barrage de Beni Haroun révèle des relations statistiques importantes pouvant éclairer les facteurs influençant la structure des communautés planctoniques.

La matrice de corrélation, présentée sous forme de triangle coloré (bleu pour les corrélations négatives, rouge pour les positives) avec des coefficients allant de +1 à -1, permet une lecture visuelle intuitive des interactions. Elle montre que certains genres phytoplanctoniques sont fortement corrélés avec la disponibilité en nutriments et l'oxygène dissous.

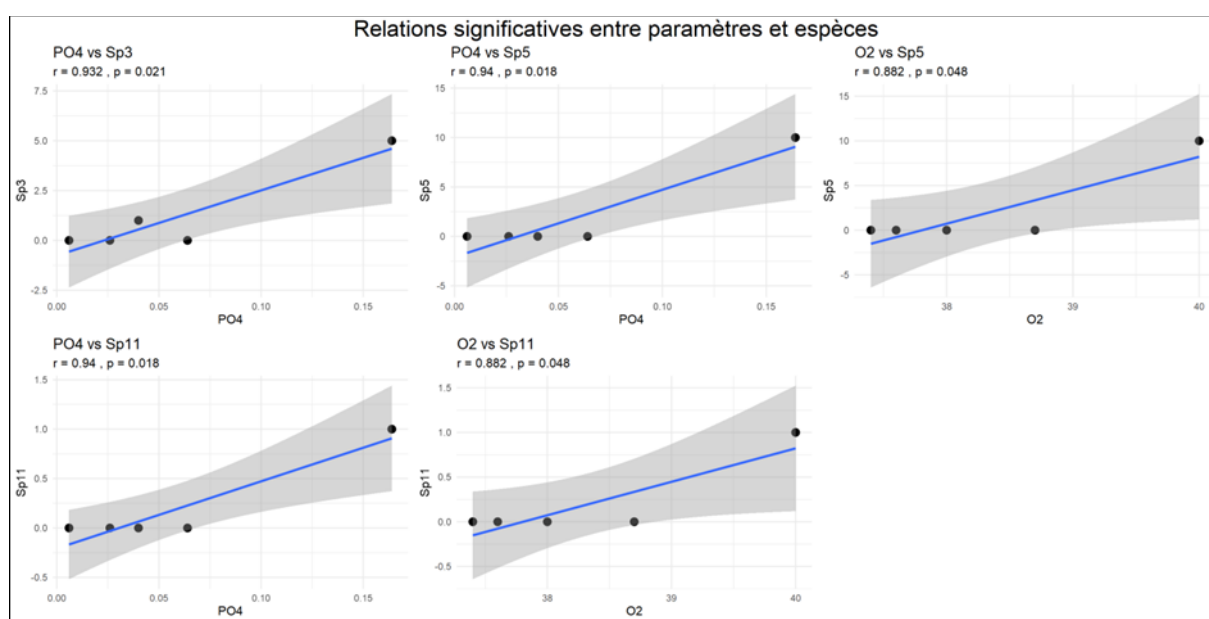


Figure 56 : Corrélations significatives entre paramètres physicochimiques et phytoplancton dans le barrage de Beni Haroun (Avril, 2025).

Les résultats montrent plusieurs corrélations significatives ($p < 0.05$) entre les genres dominants et certains paramètres chimiques :

- Sp3, Sp5 et Sp11 présentent une corrélation très forte et significative avec le phosphate (PO_4^{3-}) ($r \approx 0.93-0.94$; $p \approx 0.018-0.021$). Cela suggère que la disponibilité du phosphate constitue un facteur déterminant dans l'abondance ou la prolifération de ces genres, en accord avec le rôle du PO_4^{3-} comme élément nutritif limitant dans les systèmes aquatiques (Callieri & Stockner, 2002 ; Bellinger & Sigee, 2011).
- Sp5 et Sp11 montrent également une corrélation positive significative avec l'oxygène dissous (O2) ($r = 0.882$; $p = 0.048$). Cette relation pourrait refléter l'activité photosynthétique

accrue de ces genres, qui contribue à enrichir le milieu en **O₂**, ou indiquer que ces espèces sont favorisées dans des conditions bien oxygénées.

Ces résultats indiquent une interaction étroite entre la composition phytoplanctonique et les conditions chimiques locales. En particulier, le phosphate apparaît comme un facteur structurant majeur des communautés phytoplanctoniques du barrage, probablement en lien avec des processus d'eutrophisation ou des apports allochtones.

L'ensemble des résultats suggère que les fluctuations des nutriments, notamment le PO_4^{3-} , influencent directement la dynamique des genres phytoplanctoniques dans le barrage de Beni Haroun. De plus, la présence de corrélations positives avec l' O_2 appuie l'hypothèse d'une réponse écologique directe des espèces aux conditions de l'eau. Ces données soulignent l'importance de surveiller les paramètres chimiques clés pour comprendre, anticiper et éventuellement gérer les changements dans la biodiversité aquatique, notamment en contexte de barrage soumis à des pressions anthropiques.

1.2. Discussion générale

Notre étude réalisée en 2025 sur le barrage de Beni Haroun a permis d'évaluer l'évolution des paramètres physico-chimiques et de la communauté phytoplanctonique par rapport aux données de l'étude de Boughachiche en 2024 (Boughachiche, 2024). Les résultats mettent en lumière des modifications significatives de la qualité de l'eau et de la structure des peuplements microbiens, révélant des pressions environnementales croissantes. Cette discussion compare systématiquement les deux années d'étude, analyse les interactions entre les facteurs abiotiques et biotiques, et propose des recommandations pour une gestion durable du barrage.

Variations des Paramètres Physico-Chimiques :

PH et Alcalinité :

En 2024, le pH (7,63–8,50) était légèrement alcalin, conforme aux normes OMS. En 2025, une augmentation notable (8,6–9,3) indique une alcalinisation accrue, probablement due à une intensification de la photosynthèse (consommation de CO_2) ou à des apports géochimiques (roches carbonatées). Cette élévation pourrait affecter la biodisponibilité des nutriments et favoriser certaines espèces tolérantes comme *Oocystis* et *Spirogyra*.

Conductivité et Minéralisation (TDS, IM) :

Les valeurs de conductivité (2024 : 950–1990 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 2025 : 944–988 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et de TDS (2024 : 744–1057 mg/L ; 2025 : 1010–1074 mg/L) restent élevées, mais l'indice de minéralisation (IM) atteint 2062 mg/L en 2025, suggérant une accumulation progressive de sels dissous. Cette tendance pourrait résulter de l'évaporation accrue ou des rejets agricoles, impactant la composition des espèces planctoniques, notamment les diatomées sensibles à la salinité.

Nutriments (Azote, Phosphore, Silicium) :**Nitrates/Nitrites :**

En 2024, les nitrites (0,0181–0,553 mg/L) et nitrates (0,133–0,518 mg/L) étaient modérés, avec des pics localisés. En 2025, les nitrites dépassent les seuils OMS (1,10 mg/L), indiquant une pollution organique ou agricole accrue.

Phosphate :

Les concentrations en PO_4^{3-} chutent en 2025 (0,01–0,16 mg/L contre 0,004–0,719 mg/L en 2024), mais restent corrélées à la dominance d'Oocystis ($r \approx 0,93$), soulignant leur rôle limitant.

Silicium :

Le déclin marqué du Si(OH) (0,01–0,05 mg/L en 2025 vs. 0,081–3,295 mg/L en 2024) explique la raréfaction des diatomées (Navicula, Thalassiosira), remplacées par des chlorophytes (Spirogyra).

Turbidité et Oxygène Dissous :

La turbidité augmente significativement en 2025 (6,1–64,3 NTU vs. 3,38–10,5 NTU en 2024), probablement liée à des apports sédimentaires ou à des blooms algaux. Paradoxalement, l'oxygène dissous (**O2**) atteint des niveaux exceptionnels (37,4–40 mg/L), possiblement dus à une surproduction photosynthétique ou à des artefacts de mesure.

Évolution de la Communauté Phytoplanctonique :**Richesse et Diversité :**

- En 2024 : 26 genres identifiés, avec une dominance de diatomées (Navicula, Sigmatella) et cyanobactéries (Anabaena).

- En 2025 : Seulement 13 genres, dont *Oocystis* (38,67 %) et *Spirogyra* (25,33 %), reflétant une perte de biodiversité et une simplification de la structure trophique.

Indices Écologiques :

L'indice de Shannon (2025 : 0,56–1,55 bits) montre une diversité réduite par rapport à 2024, avec des stations (S3–S5) dominées par 1–2 espèces, signe d'un déséquilibre écologique. L'équitabilité élevée ($E \approx 1$ en S4) confirme une répartition uniforme mais appauvrie, typique des milieux stressés.

Relations Paramètres Physico-Chimiques et Phytoplancton :

L'analyse multivariée (ACP, corrélations) révèle des interactions clés :

- PO_4^{3-} influence fortement *Oocystis* et *Scenedesmus* ($r > 0,9$), confirmant le phosphore comme facteur limitant.
- Faible Si/N (2025) favorise les chlorophytes au détriment des diatomées, modifiant la chaîne trophique.
- pH élevé ($> 8,5$) et TDS impactent la sélection des espèces, avec une perte de sensibles comme *Navicula*.

Implications pour la Gestion du Barrage

- Contrôle des Nutriments : Réduire les apports agricoles (engrais, ruissellement) et traiter les eaux usées pour limiter la prolifération des algues et le début de l'eutrophisation.
- Surveillance du Silicium : Maintenir des apports suffisants pour préserver les diatomées, essentielles à l'écosystème.
- Suivi Intégré : Coupler des analyses physico-chimiques et biologiques pour une gestion adaptative mettre un plan de monitoring du barrage de Beni Haroun.

CONCLUSION

Conclusion

Notre étude réalisée en 2025 sur le barrage de Beni Haroun a permis de caractériser l'état écologique actuel de ce réservoir stratégique, en réponse aux pressions anthropiques croissantes. Les résultats obtenus apportent des éléments de réponse clés à notre problématique centrale :

• ***Comment les paramètres physico-chimiques influencent-ils la structure et la dynamique des communautés phytoplanctoniques dans ce milieu artificialisé ?***

La biodiversité planctonique du barrage de Beni Haroun, étudiée en 2025, révèle un écosystème aquatique en transition, marqué par des modifications significatives de ses paramètres physico-chimiques et de sa communauté phytoplanctonique. Les résultats montrent une eau devenue fortement alcaline (pH 8,6-9,3), dépassant les normes recommandées, avec une minéralisation accrue (TDS >1000 mg/L) et des déséquilibres trophiques prononcés, notamment un excès d'azote (nitrites jusqu'à 1,10 mg/L) couplé à une carence en silicium (0,01-0,05 mg/L). Ces conditions environnementales ont profondément restructuré les communautés phytoplanctoniques, réduisant leur diversité à seulement 13 genres contre 26 observés précédemment, avec une domination marquée d'Oocystis (38,67%) et Spirogyra (25,33%) au détriment des diatomées pourtant essentielles à l'écosystème.

L'analyse approfondie des relations entre paramètres abiotiques et communautés biologiques a mis en évidence des corrélations significatives, notamment l'influence déterminante du phosphore sur la prolifération d'Oocystis et le rôle limitant du faible rapport silicium/azote dans le déclin des diatomées. Ces modifications écologiques reflètent les pressions anthropiques croissantes sur le bassin versant, combinées aux caractéristiques propres des milieux artificialisés. La réduction de la biodiversité phytoplanctonique, particulièrement visible dans certaines stations (S3-S5) où 1-2 espèces dominent, constitue un signal d'alerte quant à la santé de l'écosystème.

Face à ces constats, il apparaît urgent de mettre en œuvre une gestion adaptative du barrage, intégrant à la fois la réduction des apports polluants et la préservation des équilibres biogéochimiques. Le contrôle des nutriments, particulièrement l'azote et le phosphore d'origine agricole et urbaine, ainsi que la surveillance du silicium dissous devraient constituer des priorités. Ces mesures, combinées à un suivi régulier des communautés phytoplanctoniques, permettraient de maintenir les fonctions écologiques du réservoir tout en garantissant ses multiples usages par les populations locales.

Cette étude, bien que limitée à une courte période d'observation, fournit des bases scientifiques solides pour aider à orienter les politiques de gestion durable du barrage de Beni Haroun. Elle souligne la nécessité de poursuivre les recherches sur les dynamiques à long terme de cet écosystème, particulièrement dans le contexte des changements climatiques et de l'augmentation des pressions anthropiques. La conservation de la biodiversité planctonique, véritable sentinelle de la qualité de l'eau, s'avère essentielle pour assurer la résilience de ce réservoir stratégique et le maintien des services écosystémiques qu'il fournit à la région du Nord-Est algérien.

RÉFÉRENCES

Références

- **Abdennadher, M., 2014.** Étude Taxonomique &Écophysiologique des dinoflagellés toxiques du Golfe de Gabès : Alexandriumminutum, Prorocentrum lima, Cooliaspp. &Ostreopsisovata. Sciences Biologiques, SFAX. Thèse de doctorat. 328p.
- **Agostinho, A. A., Pelicice, F. M., & Gomes, L. C. (2008).** Dams and the fish fauna of the Neotropical region: Impacts and management related to diversity and fisheries. Brazilian Journal of Biology, 68(4), 1119-1132. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500019>
- **AFNOR. (1994).** Qualité de l'eau – Recueil de normes françaises. Association Française de Normalisation.
- **Anctil, F., Rousselle, J., Lauzon, N., 2013.** Hydrologie : cheminements de l'eau. 2ème édition, Ed. Presses internationales polytechnique Canada. 2-3p.
- **Algerian National Bureau of Dams and Transfers (ANBT). (2021).** Annual report on dam management in Algeria. Ministry of Water Resources.
- **Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT). (1999).** Transfert de Béni Haroune, Rapport de synthèse, Vol. 1, Tractebel Engineering.
- **Anneville, O., Souissi, S., Gammeter, S., Straile, D., 2008.** Seasonal and inter-annual scales of variability in phytoplankton assemblages: comparison of phytoplankton dynamics in three peri-alpine lakes over a period of 28 years. Freshwater Biology, 53(2), 272-2904
- **Agence nationale du développement des investissements de Mila (ANDI). (2013).** Monographie de la wilaya de Mila.
- **Atmania, D., &Benaissa, A. (2010).** Minéralogie des argiles et phénomène de retrait-gonflement dans le bassin de Mila (Nord constantinois) (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- **Aslan S. &Kapdan I.K., 2006.** Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae, Ecological Engineering, 28, p. 64–70.
- **Bellinger, E. G., &Sigee, D. C. (2011).** Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators. Wiley-Blackwell.

- **Bouhadad, R., Slimani, M., & Djebbar, Y. (2018).** Water quality assessment of Beni Haroun reservoir (Algeria) using physicochemical parameters. *Journal of Water and Land Development*, 38(1), 17-25. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0002>
- **Boulahbal, S., & Mebarki, A. (2013).** Bilan et fonctionnement hydrologique du barrage de Béni Haroun (Oued Kébir-Rhumel, Algérie Orientale). In *Conference Paper*
- **Becerra G., 2009.** Proposition de stratégies de commande pour la culture de micro-algues dans une photo bioréacteur continu. Thèse doctorat Génie des Procédés. École centrale Paris, 266p.
- **Becker E.W., 1994.** *Microalgae Biotechnology and Microbiology*. Cambridge University Press.
- **Bougaran & Saint-Jean B., 2014.** Micro-algues : de petits végétaux aux grandes Promesses! *Biofutur*, (360), 28-31.
- **Boutouatou, F., Mebarki, A., Nouaceur, Z., & Laignel, B. (2019).** Les barrages de l'est algérien: caractérisation, bilans d'eau et variabilité hydrologique. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, 50, 9-23.
- **Blais S., 2008.** Guide d'identification des fleurs d'eau de cyanobactéries. Comment les distinguer des végétaux observés dans nos lacs et nos rivières, 3ème édition, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, ISBN : 978-2-550-52408-3 (version imprimée), 54 p.
- **Briere, G., 2000.** Distribution et collecte des eaux, 2ème édition, Ecole polytechnique de Montréal. 3-19p.
- **Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998).** *Principles of geographical information systems* (2nd ed.). Oxford University Press.
- **Chebbah, L., & Kabour, A. (2018).** Impact de la retenue d'un barrage sur le régime climatique local: cas de Beni Haroun (Est Algérien). *Larhyss Journal*, 33, 51-69.
- **Callieri, C., & Stockner, J. G. (2002).** Freshwater autotrophic picoplankton: a review. *Journal of Limnology*, 61(1), 1–14.
- **Cadier M., 2016,** Diversité des communautés phytoplanctoniques en relation avec les facteurs environnementaux en mer d'Iroise : approche par la modélisation 3D.

Sciences de la Terre. Université de Bretagne occidentale, Brest. 367p.
Camille Rivard-Sirois., RAPPEL, 2005 C.P. 732, Sherbrooke (Québec) J1H 5K7

- **Cavalla, M., (2000).** Les algues et les micro-algues <http://mcavalla.free.fr>.
- **Chisholm S. W., 1995.** The iron hypothesis: Basic research meets environmental policy *Reviews of Geophysics* 33, 1277-1296.
- **Chen M., Tanga H., Maa H., Holland T. C., Nga K.Y. S. & Salley S. O., 2011.** Effect of nutrients on growth and lipid accumulation in the green algae *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresource Technology* 102: 1649-1955.
- **Carpenter, G. A., & Chaney, W. R. (1983).** A fractal approach to the study of vegetation patterns. *Vegetatio*, 52(1), 45-58.
- **Couté A., & Bernard C., 2001.** Les cyanobactéries toxiques. In : *Toxines d'algues dans L'alimentation*, Frémy, J.M. & Lassus, P. (Ed), Ifremer, Brest, 21-37.
- **Costa M.R., Carneiro E. & Pereira, J.A., 2011.** Use of the native forage hay of Brazilian's northeast in the feeding of sheep and goats. *Pubvet*, 5 (7) 17.
- **C.I.Eau, 2023.** Ressource en eau potable, eau usée. (Disponible sur www.cieau.com/lemetier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-traitements-sophistiques-pour-rendre-leau-potable).
- **Dauta A & Feuillade., 1995.** Croissance et dynamique des populations algales. IN Pourriot R. et Meybeck M. (eds). *Limnologie générale*. Masson, Paris Milan Barcelone. Collection Ecologie. Pp : 328 – 350.
- **Direction du tourisme et de l'artisanat de Mila. (2024).** Monographie. Récupéré sur <https://mila.mta.gov.dz/fr/monographie/>
- **Djebbar, Y. (2019).** Gestion intégrée des ressources en eau en Algérie: Défis et perspectives. Editions Universitaires Européennes.
- **Del Campo J.A., Moreno J., Rodríguez H., Vargas M.A., Rivas J. & Guerrero M.G., 2000.** Carotenoid and phosphorus ions from synthetic waste water by the microalgae *Chlorella vulgaris* co-immobilized in alginate beads with the microalgae growth promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Research*, 36, p. 2941-2948.

- **Dhib A., 2015.** Contribution à l'étude des successions écologiques du phytoplancton dans la lagune de Ghar El Melh. Biodiversité et Ecologie. Université de Franche-Comté.
- **Dumon, A., 2021.** Chimie nouvelle, n° 138.
- **El Hourany, R. (2019).** Évaluation de la qualité des eaux de surface par approche physico-chimique et biologique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(3), 173–188.
- **Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998).** Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237-240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>
- **Fogg G.E., Stewart W.D.P., Fay P. & Walsby A.E., 1973.** The blue-green Algae. Academic Press-London and New York. Pp : 9-297
- **Foussard V & Etcheber, H., 2011.** Proposition d'une stratégie de surveillance des paramètres physico-chimiques pour les estuaires de la seine, de la Loire et de la Gironde. Rapport.
- **Fortin, M.-J., & Dale, M. (2005).** Spatial Analysis: A Guide for Ecologists. Cambridge University Press.
- **Freymy, J.M., et Lassus, P., 2001.** Toxine d'algues dans l'alimentation. Ed. Quae, France. 553p.
- **International Commission on Large Dams (ICOLD). (2023).** World register of dams. <https://www.icold-cigb.org>
- **Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989).** An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press.
- **Kennedy, R. H., Thornton, K. W., & Ford, D. E. (2015).** Characterization of the reservoir ecosystem. In *Reservoir limnology: Ecological perspectives* (pp. 27-58). John Wiley & Sons.
- **Gana N., 2014.** Détermination de certains paramètres biochimiques urinaires chez le rat Wistar recevant un régime cafeteria supplémenté en algues vertes. Mémoire Master. Physiopathologie cellulaire. Université Abou Bekr Belkadi Tlemcen, 41p.

- **Gailhard I., 2003.** Analyse de la variabilité spatio-temporelle des populations Microalgales côtières observées par le "Réseau de surveillance du phytoplancton et des Phycotoxines"(REPHY).
- **Groga, N., 2012.** Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse Université de Toulouse. 35, 38, 89, 93, 180p.
- **Galiano, E. F. (1982).** Vegetation studies using the point-centered quarter method. *Vegetatio*, 50(1), 7-21.
- **Haroun, B. (2016).** Suivi de la qualité physico-chimique des eaux du barrage (mémoire de master).
- **Hoppe H.A., 1979.** Marine algae and their products and constituents in pharmacy. In Hoppe HA, Levering T, Tanaka Y (Eds), *Marine Algae in Pharmaceutical Science*. Walter de Gruyter, Berlin -New York, pp 25-119.
- **Hassan Omer, N., 2019.** Water Quality - Science, Assessments and Policy, *intechopen*, p. 6 -13 doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89657>.
- **Jiang Y., Chen F. & Liang S.Z., 1999.** Production potential of docosahexaenoic acid By the hétérotrophic marine dinoflagellate *Cryptocodinium cohnii*. *Process Biochemistry*, 34, pp.633-637.
- **JUERY, J., 2002.** Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Direction de L'Espace Rural et de la Forêt : France.
- **Khoubach, I., Laouar, N., 2006.** Etude de la pollution organique des eaux de l'Oued Kebir (W.Jijel). Univ de Jijel. Diplôme d'ingénieur d'état. Fac des Sciences. 61p.
- **Koussa, M., & Bouziane, M.T. (2018).** Apport de SIG a la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Haroun, Mila, Algérie. *Geo-Eco-Trop*, 42(1), 43-56.
- **OMS. (2017).** Directives de qualité pour l'eau potable.
- **Lakkis S., 2011.** Le phytoplancton marin de Liban (méditerranée orientale) biologie, biodiversité, biogéographie. Ed Aracne, P 15- 17.

- **Laurienzo P., 2010.** Marine polysaccharides in pharmaceutical applications: an overview. *Mar Drugs* 8, 2435-65.
- **Leveque C., 2001.** De l'écologie à la biosphère. Dunod. Paris, 502 p.
- **Lorenzen C.J., 1967.** Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* 12 : 343-346.
- **Li, J., Heap, A. D., & Potter, A. (2011).** A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3-4), 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.03.004>
- **Merouani M, Bouguedah AB, 2013.** Etude de la pollution chimique et la vulnérabilité alla pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla. Mémoire de Master. Université KasdiMarbah Ouargla. P59
- **Mebarki, A., Benabbas, C., & Grecu, F. (2008).** Le système : Béni-Haroun (Oued Kébir-Rhumel, Algérie): aménagements hydrauliques et contraintes morpho-géologiques. *Analele Universitatii Bucuresti: Geografie*, 57, 37-51.
- **Mebarki, A. (2005).** Hydrologie des bassins de l'Est algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement (Thèse de doctorat d'État). Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire.
- **Mebarki, A. (2010).** Hydrologie, barrages et transfert d'eau en Algérie Orientale. *Bulletin des sciences géographiques de l'INCT*, 14(1), 33-41.
- **Mollo P. & Naury A., 2013.** Manuel du plancton, Charles Léopold Mayer éd. Paris, P27.
- **Muller-Feuga A., Moal J. E. & Kaas R., 2003.** The Microalgae of Aquaculture, Stott up, J. G. & McEvoy, L. A. (Eds.). *Live Feeds in Marine Aquaculture*, 1st ed. Blackwell Science Ltd, Oxford, United Kingdom, Pp 206-253
- **Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005).** Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis. World Resources Institute.
- **Ministry of Water Resources (MRE). (2020).** National water strategy 2035. Algerian Government Publications.
- **Magurran, A. E. (2004).** Measuring Biological Diversity. Blackwell Publishing

- **Moseley J.L., Chang W. & Grossman R., 2006.** Genome-based approaches to Understanding phosphorus deprivation responses and PSR1 control in *Chlamydomonas Reinhardtii*. *Eukaryotic cell*, 5 (1), 26-44.
- **Muñoz R. & Guieysse B., 2006.** Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research* 40, pp 2799-2815.
- **Nave, C.R., 2020.** Electrical conductivity. Hyperphysics. Georgia state university Atlanta, Georgia. (Disponible sur [http : // hyperphysics. phyastr. gsu. Edu / hbase / electric / conduc. Html.](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/conduc.html)).
- **Nicklin J & Graeme-Cook K., Paget P., Kiling R., 1999.** L'essentiel en microbiologie, pp.243-245-246.
- **Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005).** Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308(5720), 405-408. <https://doi.org/10.1126/science.1107887>.
- **Nouredine Bouchareb,** Rebbah Abderraouf Chouaib, Lalaoui Meriem, Bouzegag Abdelaziz, Kennouche Salah, Bouarroudj Sara, Chebbah Mohamed, Monitoring water quality in Beni Haroun Dam Northeastern Algeria: Application of Water Quality Index (WQI), Pollution Index (PI), and statistical analyses, *Desalination and Water Treatment*, Volume 323, 2025, 101267, ISSN 1944-3986, <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101267>.
- **Padisák, J., Crossetti, L. O., & Naselli-Flores, L. (2010).** Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: A critical review with updates. *Hydrobiologia*, 621(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9645-0>
- **Prescott L.M., Harley J.P. & Klein D.A., 2003.** Microbiologie, 2ème édition. De Boeck Université, Bruxelles. Quarterly Vol. 20, No. 1, pp.
- **Preston, T., et al. (1989).** Influence of environmental factors on water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 12, 241–255.
- **Pulz O. & Gross W., 2004.** Valuable products from biotechnology of microalgae. Minireview, *Applied Microbiology and Biotechnology*, Volume 65, Number 6, pp.635-648.

- **Philippe, S., 2014.** Propriétés physiques de l'eau. Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la Mer, France.
- **Paerl, H. W., & Huisman, J. (2008).** Blooms like it hot. *Science*, 320(5872), 57-58.
- **Raven, P.H., Berg, L.R., Hassanzahl, D., 2009.** Américaine par marie pascale la ceannehancock Guy lempriere, 6 édition, 97-98 p.
- **Ramade F., 2005.** Eléments d'écologie : écologie appliqué. Edit Dunod. 6édition. Paris, 863p.
- **Rabah, Boughachiche.** Etude de la biodiversité planctonique dans le Barrage de Beni Haroun (Wilaya de Mila). Diss. university centre of abdelhafidboussof-mila-, 2024.
- **Remini, B., Bouabibsa, R., & Moudjed, K. (2019).** Beni Haroun and KoudiatAcerdoune (Algeria): Two large dams threatened by the phenomenon of siltation. *Larhyss Journal*, 38, 131-151.
- **Richmond A., 2007.** Handbook of Micro-algal Culture. Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell Science.
- **Roche, D.A., Miquel, J., Gaume, E., 2012.** Hydrologie quantitative : processus, modèles et aide à la décision. Ed. Springer-Verlag France. 7p.
- **Reynolds, C. S. (2006).** Ecology of phytoplankton. Cambridge University Press.
- **Rodier, J. (1996).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (8e éd.). Dunod.
- **Robert D. & Catesson A.M., 2000.** Organisation végétative. Ed : Doin. Paris.
- **Rösch C. & Posten C., 2012.** Introduction to the thematic Focus. Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis. Karlsruher Institut für Technologie.
- **Roux-Jean Claude., 1995 ;** Les secrets de la terre ; l'eau : source de vie ; Edition BRGM. 63p.
- **Quéguiner, B., 2013,** Iron fertilization and the structure of planktonic communities in high nutrient regions of the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 90, 43–54.

- **Sari H, 2014.** Contribution à l'étude de la qualité chimique et bactériologique de l'eau de la source «ATTAR» (Tlemcen). Mémoire magister. Université Abou Baker Belkaid Tlemcen. 92 p.
- **Sournia A., 1986.** Atlas du phytoplancton marin. Volume I : Cyanophycées, Dictyophycées, Dinophycées, Raphidophycées. Ed, CNRS, Paris, 219p
- **Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E. & Isambert A., 2006.** Commercial applications of microalgae. J BiosciBioeng, 101 (2), 87-96.
- **Stolz P. & Obermayer B., 2005.** Manufacturing microalgae for skin care. Cosmetics Toiletries, 120, pp. 99-106.
- **Sheehan J., Dunahay T., Benemann J. & Roessler P., 1998.** A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program—biodiesel from algae. NREL/TP580-24190. U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development.
- **Shepard, D. (1968).** A two-dimensional interpolation functions for irregularly-spaced data. In Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference (pp. 517-524).
- **Skulberg O.M., 1996.** Toxins produced by cyanophytes in Norwegian inland waters health and environment. In: Chemical data as a basis of geomedical investigations. Ed. Lag. J., the Norwegian Academy of Sciences and Letters, Oslo, pp 131-148.
- **Suty L., 2014.** Les végétaux, évolution développement et reproduction. Ed Quae, P35.
- **Thornton, K. W., Kimmel, B. L., & Payne, F. E. (1990).** Reservoir limnology: Ecological perspectives. Wiley-Interscience.
- **Verlecar, X. N., & Desai, S. R. (2004).** Nutrient distribution and its relation with plankton in coastal waters of the central west coast of India. Indian Journal of Marine Sciences, 33(2), 181–187.
- **United Nations World Water Development Report (WWDR). (2023).** Partnerships and cooperation for water. UNESCO. <https://www.unesco.org/reports/wwdr>
- **Wetzel, R. G. (2001).** Limnology: Lake and river ecosystems (3rd ed.). Academic Press.
- **Zubkov, M.V., et Tarran, G. A., 2008.** High bacterivory by the smallest phytoplankton in the North Atlantic Ocean. Nature. 455: 224.

- **Zettam, A. (2018).** Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée-approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT; Université Abou BekrBelkaid (Tlemcen, Algérie)).