



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen -



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de L'Univers

Département d'Agronomie

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité/Option : Contrôle de Qualité et Agroalimentaire

Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Analyses physicochimiques des eaux du barrage de
Hammam Boughrara**

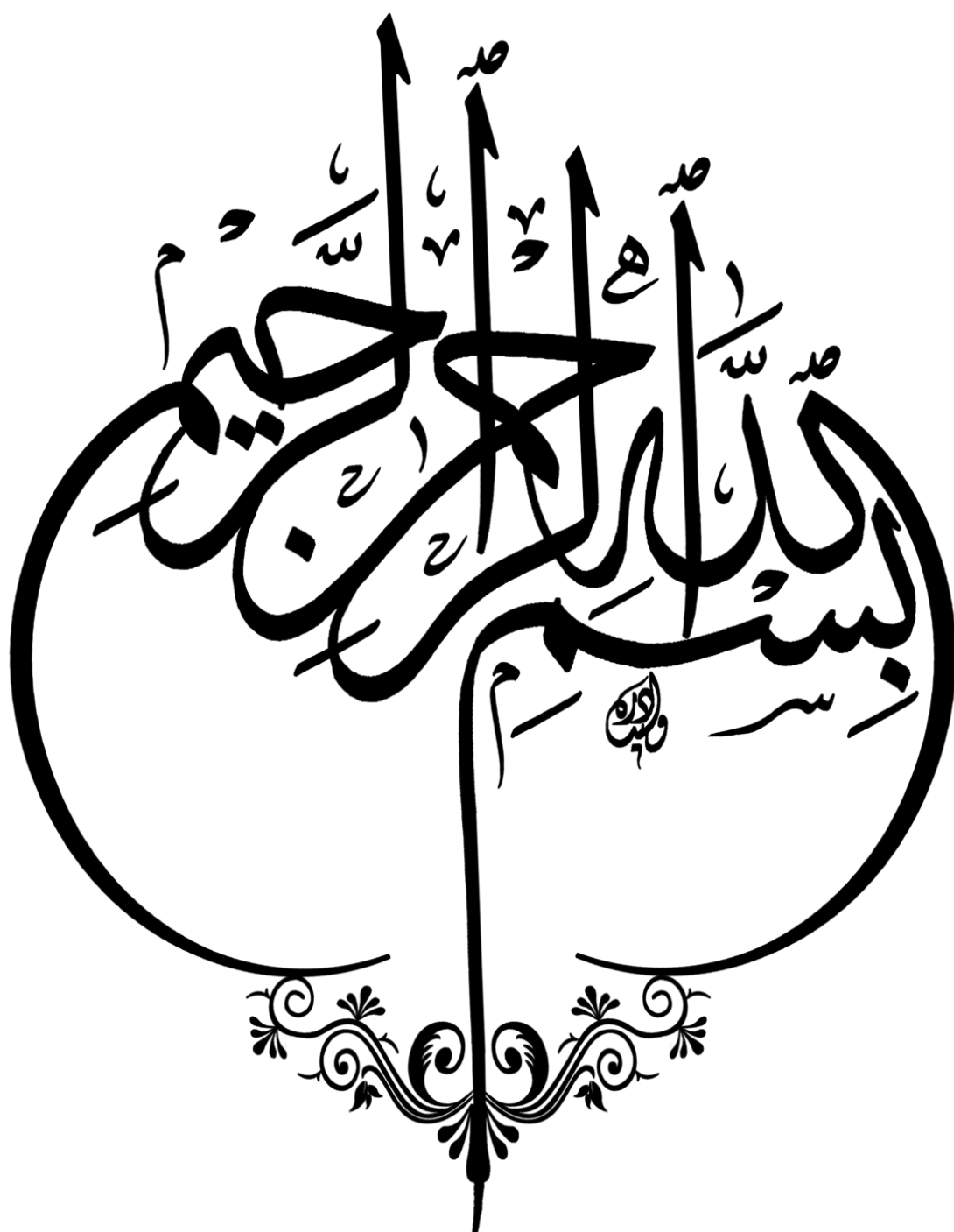
Présenté par :

➤ **Boukhalfa Aymen Oussama**

Soutenu le 23 /06/2026 devant le jury composé de :

Présidente :	M^{me} MEZIANE Radjaa	Maître de Conférences A	Université de Tlemcen
Examinatrice :	M^{me} GHANEMI Fatima Zohra	Maître de Conférences A	Université de Tlemcen
Encadrant :	M^{me} MERGHACHE Salima	Professeur	Université de Tlemcen

2025-2026





وَأَخِرُكُمْ بِاللَّحْمَةِ وَالْعِلْمِ





Dédicace

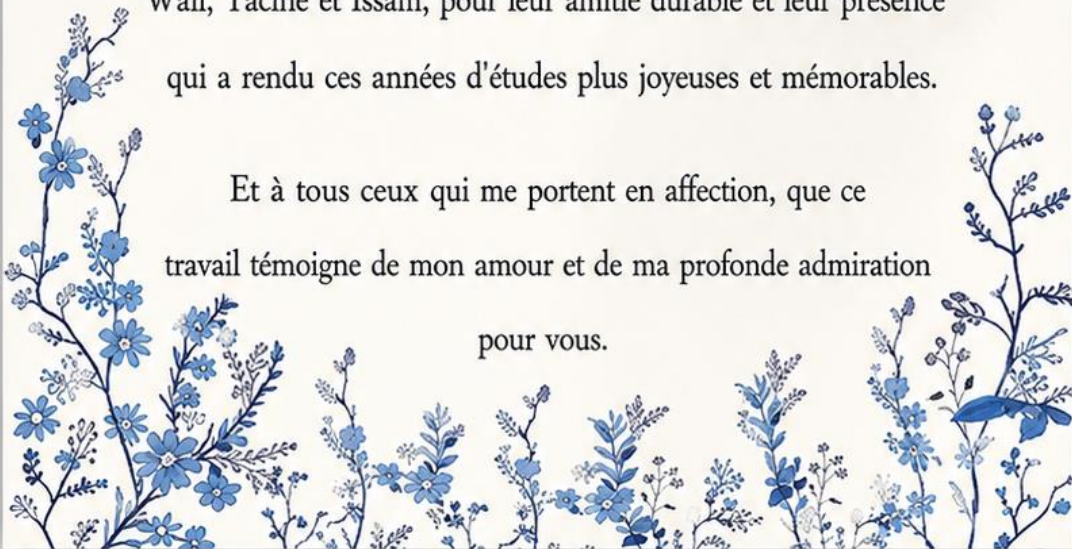
Je dédie ce modeste travail :

À mes parents, aucun hommage ne saurait égaler l'amour qu'ils continuent de me prodiguer inlassablement. Puisse Dieu leur accorder une bonne santé et une longue existence.

À mes précieux frères Hichem, Mokhtar et Mohamed, vous êtes le pilier solide sur lequel je m'appuie. Merci infiniment pour votre soutien sans faille et pour les moments de joie et de difficulté que nous avons vécus côte à côte.

À mes amis , en particulier Mouad, Azzedine, Redouane Farouk, Wail, Yacine et Issam, pour leur amitié durable et leur présence qui a rendu ces années d'études plus joyeuses et mémorables.

Et à tous ceux qui me portent en affection, que ce travail témoigne de mon amour et de ma profonde admiration pour vous.



الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الخام والمعالجة بسد حمام بوغرارة بمنطقة تلمسان. شملت المعايير المدروسة درجة الحرارة، والأس الهيدروجيني (pH)، النترت، النترات، الأمونيوم، الفوسفات، والحديد، بالإضافة إلى المادة العضوية.

وقد تمت مقارنة النتائج المتحصل عليها بالمعايير الجزائرية وتوصيات منظمة الصحة العالمية (OMS)، بحيث أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في جودة المياه بعد المعالجة، وتمثلت أساساً في الانخفاض الواضح لتراكيز النترت والأمونيوم، الفوسفات والحديد. كما بينت الدراسة أن معظم المعايير المقاسة تقع ضمن الحدود المقبولة التي تحددها التشريعات المعمول بها.

ومع ذلك، سجل عدم مطابقة طفيفة فيما يتعلق بالمادة العضوية، كما لوحظت بعض التذبذبات في تراكيز النترات حسب فترات أخذ العينات. وبشكل عام، تؤكد هذه النتائج فعالية نظام معالجة المياه وجودتها الموزعة والمخصصة للاستهلاك البشري.

الكلمات المفتاحية: سد حمام بوغرارة، المياه الخام، المياه المعالجة، التحليل الفيزيائي والكيميائي، معالجة المياه.

Résumé :

Cette étude examine la qualité physicochimique des eaux brutes et traitées provenant du barrage de Hammam Boughrara, dans la région de Tlemcen. Les paramètres évalués incluent la température, le pH, les nitrites, les nitrates, l'ammonium, les phosphates, le fer ainsi que la matière organique. Les données obtenues ont été confrontées aux normes algériennes ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Les résultats indiquent une amélioration significative de la qualité de l'eau après traitement, marquée par une réduction notable des taux de nitrites, d'ammonium, de phosphates et de fer. La majorité des paramètres mesurés se situent dans les limites acceptables définies par les normes en vigueur.

Néanmoins, une légère non-conformité a été relevée en ce qui concerne la matière organique, et des fluctuations ont été observées pour les concentrations en nitrates selon les périodes d'échantillonnage. De manière générale, ces résultats confirment l'efficacité du dispositif de traitement ainsi que la bonne qualité des eaux distribuées pour la consommation humaine.

Mots-clés : Barrage de Hammam Boughrara, Eau brute, Eau traitée, Analyse physico-chimique, Traitement de l'eau.

Abstract:

This study examines the physicochemical quality of raw and treated water from the Hammam Bouhrara dam in the Tlemcen region. The parameters assessed include temperature, pH, nitrites, nitrates, ammonium, phosphates, iron and organic matter.

The data obtained were compared with Algerian standards and the recommendations of the World Health Organisation (WHO). The results indicate a significant improvement in water quality following treatment, marked by a notable reduction in the levels of nitrites, ammonium, phosphates and iron. The majority of the parameters measured fall within the acceptable limits defined by current standards.

Nevertheless, a slight non-compliance was noted regarding organic matter, and fluctuations were observed in nitrate concentrations depending on the sampling periods. Overall, these results confirm the effectiveness of the treatment system as well as the good quality of the water distributed for human consumption.

Keywords: Hammam Bouhrara dam, Raw water, Treated water, Physicochemical analysis, Water treatment.

Sommaire

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

I. Introduction	Erreur ! Signet non défini.
II. Origine des eaux de consommation.....	Erreur ! Signet non défini.
1)Eaux souterraines	5
2)Eaux de mer et eaux saumâtres	Erreur ! Signet non défini.
3)Les eaux de surface.....	Erreur ! Signet non défini.
A. Caractéristiques générales	Erreur ! Signet non défini.
B.Les barrages hydrauliques	Erreur ! Signet non défini.
a)Définition et fonctionnement d'un barrage	Erreur ! Signet non défini.
b)Rôle des barrages dans la gestion des ressources hydriques	Erreur ! Signet non défini.
c)Stratification thermique dans les retenues	Erreur ! Signet non défini.
d)Phénomène de sédimentation	Erreur ! Signet non défini.
e)Processus d'eutrophisation	Erreur ! Signet non défini.
III. Cycle de l'eau :.....	Erreur ! Signet non défini.
1. L'évaporation et l'évapotranspiration	Erreur ! Signet non défini.
2. La condensation	Erreur ! Signet non défini.
3. Les précipitations	Erreur ! Signet non défini.
4. Le ruissellement	Erreur ! Signet non défini.
IV. Pollution des eaux de barrage	Erreur ! Signet non défini.
V. Les principaux polluants des eaux naturelles	Erreur ! Signet non défini.
1)Polluants physiques	Erreur ! Signet non défini.
2)Polluants chimiques	Erreur ! Signet non défini.
3)Polluants microbiologiques	Erreur ! Signet non défini.
VI. Normes de qualité des eaux (OMS et normes algériennes)	Erreur ! Signet non défini.
VII. Classification des eaux selon leur qualité	Erreur ! Signet non défini.

VIII.	Impact de la pollution sur la santé et l'environnement	Erreur ! Signet non défini.
-------	--	-----------------------------

Chapitre II : Présentation du Barrage de Hammam Boughrara

I.	Situation géographique du barrage	Erreur ! Signet non défini.
II.	Caractéristiques techniques du barrage	Erreur ! Signet non défini.
III.	Sources d'alimentation hydrique du barrage.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.	Principaux usages du barrage	Erreur ! Signet non défini.
	a)Approvisionnement en eau potable	Erreur ! Signet non défini.
	b)Irrigation agricole	Erreur ! Signet non défini.
	c)Régulation hydrologique	Erreur ! Signet non défini.
	d)Suivi environnemental et scientifique	Erreur ! Signet non défini.
V.	Activités humaines autour du barrage	Erreur ! Signet non défini.
	a)Activités agriculture	Erreur ! Signet non défini.
	b)Développement urbain	Erreur ! Signet non défini.
	c)Activités industrielles et artisanales	Erreur ! Signet non défini.
VI.	Pressions anthropiques sur la retenue	Erreur ! Signet non défini.
	a)Sources de pression	Erreur ! Signet non défini.
	b)Impacts environnementaux	Erreur ! Signet non défini.
	c)Mesures de gestion et de protection	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

I.	Traitement des eaux du barrage de Hammam Boughrara	Erreur ! Signet non défini.
	a)Brise de charge.....	Erreur ! Signet non défini.
	b)Pré-filtration.....	Erreur ! Signet non défini.
	c)Bassin de coagulation.....	Erreur ! Signet non défini.
	d)Chambre de floculation.....	Erreur ! Signet non défini.
	e)Bassin de decantation.....	Erreur ! Signet non défini.
	f)Bassin de nitrification.....	Erreur ! Signet non défini.
	g)Filtration sur sable	Erreur ! Signet non défini.

h)Réservoir intermédiaire.....	Erreur ! Signet non défini.
i)Filtration sur charbon actif.....	Erreur ! Signet non défini.
II. Les analyses physico-chimiques	Erreur ! Signet non défini.
1)La température (°C)	Erreur ! Signet non défini.
2)Le (pH).....	Erreur ! Signet non défini.
3)Ortho phosphate (PO ₄ -3).....	Erreur ! Signet non défini.
4)les nitrates (NO ₃ ⁻)	Erreur ! Signet non défini.
5)les nitrites (NO ₂ ⁻)	Erreur ! Signet non défini.
6)Dosage de L'Ammonium (NH ₄ ⁺)	Erreur ! Signet non défini.
7)Dosage de fer	Erreur ! Signet non défini.
8)Détermination de la matière organique (MO).....	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV: Résultats et Discussions

I. Les Résultats des analyses physico-chimiques	Erreur ! Signet non défini.
1)Suivi de la station de traitement:.....	Erreur ! Signet non défini.
2)Résultats expérimentaux (travail de laboratoire)	Erreur ! Signet non défini.
a.Temperature	Erreur ! Signet non défini.
b.Le pH.....	Erreur ! Signet non défini.
c.Nitrites NO ₂ ⁻	Erreur ! Signet non défini.
d.Matière organiques (MO)	Erreur ! Signet non défini.
e.Fer (Fe)	Erreur ! Signet non défini.
f.Nitrates (NO ₃ ⁻)	Erreur ! Signet non défini.
g.L'ammonium (NH ₄ ⁺)	Erreur ! Signet non défini.
h.Phosphates (PO ₄ ³⁻)	Erreur ! Signet non défini.
Concluison.....	71

Liste des Figures

Figure 01 : Cycle de l'eau	10
Figure 02 : L'eau circule sans cesse, transportant et répandant autour de la planète les polluants que l'activité humaine y a déversés	13
Figure 03 : Les pollutions des eaux produites par l'industrie	14
Figure °04 : Pollution des eaux d'origine domestique	15
Figure 05 : Localisation du barrage de Hammam Boughrara	22
Figure 06 : Vue générale du barrage de Hammam Boughrara	23
Figure 07: "Oued Mouillah" Source d'alimentation principale.....	25
Figure 08: Schéma de l'approvisionnement en eau potable à partir du barrage.....	26
Figure 09: Schéma du système d'irrigation agricole alimenté par le barrage	26
Figure 10: Barrage rempli illustrant la régulation hydrologique et le stockage des eaux	27
Figure 11: Schéma du suivi de la qualité de l'eau et de la biodiversité aquatique	27
Figure 12 : Brise de charge	32
Figure 13 : Bassins de coagulation	33
Figure 14 : Chambres de floculation	33
Figure 15 : Bassins de nitrification	34
Figure 16 : Filière filtration à sable	35
Figure 17 : Prélèvement d'échantillons d'eau du barrage	36
Figure 18 : pH mètre WTW.....	38
Figure 19: Dosage de phosphate	40
Figure 20: Dosage de L'Ammonium NH_4^+	44
Figure 21: Processus de dosage des matières organiques	46
Figure 22: Variations de la valeur Température de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara	51
Figure 23: Variations de la valeur pH de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara	53
Figure 24: Variations de la valeur nitrite de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.....	56

Figure 25: Variations de la valeur Matière Organique de l’eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara 58

Figure 26: Variations de la valeur Fer de l’eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara61

Figure 27: Variations de la valeur Nitrate de l’eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara63

Figure 28: Variations de la valeur Ammonium de l’eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara66

Figure 29 :Variations de la valeur Phosphate de l’eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara68

Liste des Tableaux

Tableau 01 : Les étapes du cycle de l'eau et leur importance hydrologique	12
Tableau 02 : récapitulatif des principaux polluants des eaux naturelles	18
Tableau 03 : Caractéristique des principales normes de qualité de l'eau entre l'OMS et l'Algérie.....	19
Tableau 04 : Caractéristique techniques du barrage de Hammam Bouhrara.	24
Tableau 5 : Classification des eaux d'après leur pH	28
Tableau 06: Les résultats Suivi de la station de traitement	48
Tableau 07 : Comparaison des valeurs températures T° de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Bouhrara	50
Tableau 08 : Comparaison des résultats de pH	52
Tableau 09 : Comparaison des concentrations en nitrites NO ₂ ⁻	55
Tableau 10 : Comparaison des concentrations en Matière organiques (MO).	57
Tableau 11: Comparaison des concentrations en Fer (Fe)	60
Tableau 12: Comparaison des concentrations en Nitrates (NO ₃ ⁻)	62
Tableau 13: Comparaison des concentrations en ammonium(NH ₄ ⁺)	65
Tableau 14: Comparaison des concentrations en phosphates(PO ₄ ³⁻)	67



Introduction

Introduction générale

Introduction générale

L'eau constitue une ressource naturelle fondamentale, indispensable tant à la préservation de la vie qu'au développement socio-économique. Elle joue un rôle clé dans plusieurs secteurs essentiels, incluant l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, l'industrie et le maintien des équilibres écologiques. En Algérie, comme le souligne **Bahloul (2013)**, cette ressource est caractérisée par une disponibilité limitée dans un contexte marqué par une demande croissante et des conditions climatiques souvent imprévisibles. Face à cette réalité, il devient impératif de mobiliser et de gérer les ressources hydriques de manière rationnelle et durable afin de garantir leur accessibilité et leur conservation à long terme. Dans la même perspective, **Kourdi (2021)** met en évidence que la croissance démographique et le développement des activités humaines entraînent une augmentation constante des besoins en eau, intensifiant ainsi la pression exercée sur les ressources disponibles.

Pour pallier ces défis, l'Algérie a fait de la construction de barrages hydrauliques une priorité stratégique. Ces infrastructures, destinées à mobiliser les eaux de surface, jouent un rôle primordial dans le stockage, la régulation des volumes d'eau, l'approvisionnement en eau potable et le soutien des activités agricoles (**Bahloul, 2013**). Cependant, leur fonctionnement est largement influencé par les caractéristiques climatiques et hydrologiques des bassins versants, notamment par la variabilité des précipitations et des apports en eau. Par ailleurs, l'efficacité des barrages peut être compromise par divers phénomènes naturels tels que la sédimentation ou l'eutrophisation, qui altèrent leur capacité de stockage ainsi que leurs équilibres écologiques.

La qualité des eaux stockées dans les retenues des barrages représente un autre enjeu crucial, tant sur le plan environnemental que sanitaire. D'après **Kourdi (2021)**, ces eaux sont parfois exposées à divers types de pollution engendrées par les activités industrielles, agricoles et domestiques, ainsi qu'aux impacts des facteurs naturels présents dans leur environnement. Ces pressions peuvent profondément modifier les propriétés physiques et chimiques de l'eau, diminuant ainsi sa qualité. L'évaluation fréquente des paramètres analytiques apparaît dès lors indispensable pour contrôler la conformité de l'eau aux normes établies, tout en contribuant à une gestion optimale des ressources hydriques.

Introduction générale

Dans le contexte du nord-ouest algérien, le barrage de Hammam Boughrara constitue une infrastructure hydraulique majeure au sein de la wilaya de Tlemcen. Doté d'une capacité de stockage de 177 hm³, ce barrage remplit plusieurs fonctions essentielles : alimentation en eau potable des communes voisines, soutien à l'irrigation agricole et transfert d'eau vers les zones adjacentes. Par sa fonction stratégique et les multiples pressions auxquelles il est soumis, il représente un site d'étude idéal pour analyser les questions relatives à la qualité des eaux.

À cet égard, **Benchaïba (2023)** insiste sur l'importance d'approches scientifiques adaptées pour mieux comprendre la dynamique des bassins versants et pour perfectionner les méthodes de suivi des ressources hydriques. L'évaluation des paramètres physicochimiques des eaux s'inscrit pleinement dans cette démarche, fournissant des données essentielles à une gestion durable de ces ressources.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail scientifique, focalisé sur l'étude du barrage de Hammam Boughrara et sur l'analyse spécifique de certains paramètres physicochimiques de ses eaux. Pour ce faire, la recherche s'articule autour de quatre chapitres principaux :

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les Barrage

Chapitre II : Présentation du Barrage de Hammam Boughrara

Chapitre III : Matériel et Méthodes

Chapitre IV: Résultats et Discussion

Chapitre I:
Généralités sur les eaux
et les barrages

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

I. Introduction

L'eau est une substance essentielle à la vie, composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène (H_2O). Transparente, incolore et inodore, elle joue un rôle vital dans le maintien des écosystèmes, la santé humaine et le développement économique (**Meybeck, 1998**).

La gestion des ressources en eau est aujourd'hui un défi majeur, en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation, du développement industriel et de l'intensification agricole. La qualité de l'eau destinée à la consommation humaine doit être strictement surveillée, car elle peut être contaminée par divers polluants chimiques, physiques ou microbiologiques (**Kourdi, 2021**).

Ce chapitre présente les ressources en eau, leurs principales origines, les barrages comme outils de gestion hydrique, ainsi que les facteurs influençant la qualité de l'eau.

I. Origine des eaux de consommation

1. Eaux souterraines

Les eaux souterraines proviennent principalement des précipitations qui s'infiltrent dans le sol. Sous l'effet de la gravité, elles circulent à travers les pores et les fissures des roches souterraines jusqu'à atteindre des couches imperméables, où elles s'accumulent pour former des aquifères. Ces couches rocheuses contenant de l'eau sont appelées aquifères. Cette eau peut parcourir de longues distances et réapparaître à la surface sous forme de sources ou de cours d'eau (**Bakalowicz, 1999**).

Les eaux souterraines sont généralement mieux protégées des sources de pollution et leurs propriétés physico-chimiques restent stables dans le temps, ce qui contribue à garantir la qualité constante de l'eau utilisée dans les procédés de fabrication en usine (**Desjardins, 1997**).

Parmi leurs principales caractéristiques, on peut citer:

- Turbidité faible;
- Contamination bactérienne limitée;
- Température relativement constant;
- Débit stable;

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

- Concentration parfois élevée en fer et en manganèse

Toutefois, les aquifères situés à proximité des zones urbaines peuvent être vulnérables aux contaminations. De plus, la connexion entre eaux de surface et eaux souterraines peut favoriser la propagation de polluants par infiltration ou drainage (SDEA, 2017).

2. Eaux de mer et eaux saumâtres

Les eaux de mer représentent une source alternative d'eau brute lorsque les ressources en eau douce sont limitées. Elles se caractérisent principalement par leur forte concentration en sels dissous, appelée salinité, qui varie généralement entre 33 000 et 37 000 mg/L (Desjardins, 1997).

L'eau de mer est composée d'environ 95 % d'eau pure et d'une cinquantaine d'éléments chimiques dissous, principalement sous forme de sels tels que les chlorures, sulfates et carbonates, ainsi que des gaz dissous (Lagowski, 2026). Les ions les plus abondants sont le sodium et le chlorure, responsables de la salinité moyenne d'environ 35 ‰ (Lagowski, 2026). Les océans et les mers couvrent approximativement 71 % de la surface de la Terre, constituant le principal réservoir d'eau de la planète (IPCC, 2022).

Les eaux saumâtres, qui présentent une salinité intermédiaire entre les eaux douces et marines, sont souvent rencontrées dans les estuaires et zones côtières où les eaux fluviales se mélangent à l'eau de mer. Elles constituent une ressource exploitable pour certains usages industriels et agricoles après traitement adapté (Day et al., 2012).

3. Les eaux de surface

Les eaux de surface comprennent toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents, telles que les rivières, les fleuves et les lacs. Elles proviennent soit de l'émergence des nappes souterraines, soit du ruissellement des précipitations sur les bassins versants. Dans de nombreuses régions, ces eaux sont retenues dans des réservoirs artificiels, les barrages, qui jouent un rôle essentiel dans la régulation et la gestion des ressources en eau (Chow et al., 1988).

A. Caractéristiques générales

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés et de la durée de séjour dans le bassin. L'eau dissout les éléments minéraux rencontrés et interagit avec l'atmosphère et les organismes aquatiques, influençant la concentration en gaz

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

dissous (*oxygène, azote, dioxyde de carbone*) et la teneur en matières organiques (**Chapman, 1996**).

Dans les retenues artificielles, comme les barrages, les paramètres physico-chimiques (température, pH, oxygène dissous, fer, manganèse, plancton) peuvent varier fortement en fonction de la stratification thermique et de la circulation des masses d'eau selon les saisons (**Chapman, 1996**).

Les caractéristiques principales des eaux de surface incluent :

- Présence de gaz dissous, surtout l'oxygène (**U.S. Geological Survey, 2018**);
- Concentration variable en matières en suspension, allant des particules colloïdales aux sédiments grossiers (**Wilson, 2019**);
- Matières organiques issues du métabolisme et de la décomposition des organismes végétaux et animaux (**Abu Shmeis, 2018**);
- Développement possible de plancton (phytoplancton et zooplancton), surtout en cas d'eutrophisation (**Loperfido, 2014**);
- Variations journalières et saisonnières liées au climat et à l'activité biologique (**Loperfido, 2014**).

Les rivières en amont des barrages se situent souvent dans des zones peu peuplées, avec une faible activité industrielle, une turbidité élevée et une contamination bactérienne limitée (**Desjardins, 1997**). Les rivières en aval traversent des zones plus densément peuplées et industrielles, où la qualité de l'eau est généralement moindre, avec des contaminations bactériennes et chimiques plus importantes (**Desjardins, 1997**).

Les lacs et les retenues artificielles servent de bassins de décantation, où la turbidité est souvent faible et la contamination bactérienne limitée. Cependant, certaines retenues présentent une stratification thermique et chimique, influençant la répartition de l'oxygène et des nutriments (**Pierre-Alain, 2003**). Ces retenues jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable et le maintien des écosystèmes aquatiques (**CMI, 2004**).

Enfin, les précipitations atmosphériques sous forme de pluie ou de neige constituent le principal apport d'eau aux bassins versants, alimentant directement les rivières et les retenues (**Humbert & Najjar, 1992**).

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

B. Les barrages hydrauliques

a) Définition et fonctionnement d'un barrage

Un barrage hydraulique est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau afin de retenir, stocker ou dériver l'eau (**Maheu, 2015**). Les premiers barrages construits à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle avaient principalement pour objectif de dériver l'eau vers des conduites forcées ou des canaux d'irrigation (**Durand et al., 1999**). Avec les progrès techniques et l'utilisation du béton au début du XX^e siècle, il est devenu possible de réaliser des retenues d'eau plus importantes, capables de réguler la production hydroélectrique (**Durand et al., 1999**).

Le choix du type de barrage dépend généralement de la géologie du site et de la topographie de la vallée (**Durand et al., 1999**).

On distingue principalement deux grandes catégories de barrages:

- Les barrages rigides en béton ou en maçonnerie, dont le calcul repose sur la résistance des matériaux et la théorie de l'élasticité.
- Les barrages souples en terre ou en enrochement, qui constituent un champ d'application majeur de la mécanique des sols (**Labidi & Lakrid, 2017**).

b) Rôle des barrages dans la gestion des ressources hydriques

Les barrages jouent un rôle essentiel dans la gestion des ressources en eau, en permettant de stocker l'eau et de réguler les débits des cours d'eau pour répondre aux besoins humains et environnementaux.

Ils contribuent notamment à:

- L'alimentation en eau potable ;
- L'irrigation agricole ;
- La production d'énergie hydroélectrique (**Guiraud, 2016**).

Par ailleurs, ils participent à la prévention des inondations en contrôlant les débits lors des crues. Ces ouvrages constituent donc un élément stratégique pour la valorisation et la gestion durable des ressources hydriques. (**Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2016**).

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

c) Stratification thermique dans les retenues

Dans les retenues d'eau des barrages, la stratification thermique peut se produire (**Maheu, 2015**), caractérisée par la formation de couches d'eau ayant des températures différentes (**U.S. Geological Survey, n.d.**). La couche superficielle est généralement plus chaude et moins dense que les couches profondes, plus froides (**Li, Han, & Wang, 2022**). Cette organisation influence la circulation de l'eau et la distribution de l'oxygène dissous, et peut donc avoir un impact direct sur la qualité de l'eau dans le réservoir (**Li, Han, & Wang, 2022**).

d) Phénomène de sédimentation

La sédimentation correspond au dépôt progressif des particules solides transportées par les cours d'eau dans la retenue du barrage. Ces particules proviennent principalement de l'érosion des sols du bassin versant et s'accumulent avec le temps, réduisant la capacité de stockage de la retenue. La sédimentation représente ainsi un enjeu majeur pour la gestion et l'exploitation des barrages (**Islam, 2018**).

e) Processus d'eutrophisation

Les retenues de barrages peuvent être affectées par un processus d'eutrophisation, caractérisé par un enrichissement en nutriments, principalement le phosphore et l'azote, provenant des activités agricoles et urbaines du bassin versant. Cette concentration favorise la prolifération du phytoplancton, diminue la transparence de l'eau et entraîne des variations de l'oxygène dissous. Ce phénomène modifie l'état écologique du réservoir et peut altérer la qualité de l'eau si aucune gestion appropriée des apports nutritifs n'est mise en place (**Bouزيد Lagha & Djelita, 2012**).

L'eutrophisation est donc un processus qui perturbe l'équilibre écologique des milieux aquatiques, nécessitant des mesures de gestion pour limiter son impact sur la qualité de l'eau et la santé des écosystèmes (**Bouزيد Lagha & Djelita, 2012**).

II. Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, également appelé cycle hydrologique, représente l'ensemble des processus physiques qui assurent la circulation continue de l'eau entre l'atmosphère, la surface terrestre et le sous-sol. Ce cycle constitue un système dynamique contrôlé principalement par l'énergie solaire et la gravité, permettant la transformation de l'eau entre ses différents états

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

(liquide, solide et gazeux) et garantissant ainsi le renouvellement permanent des ressources hydriques sur Terre (**Durand et al., 1999**).

Les principales étapes du cycle hydrologique peuvent être décrites comme suit (Figure 01) :

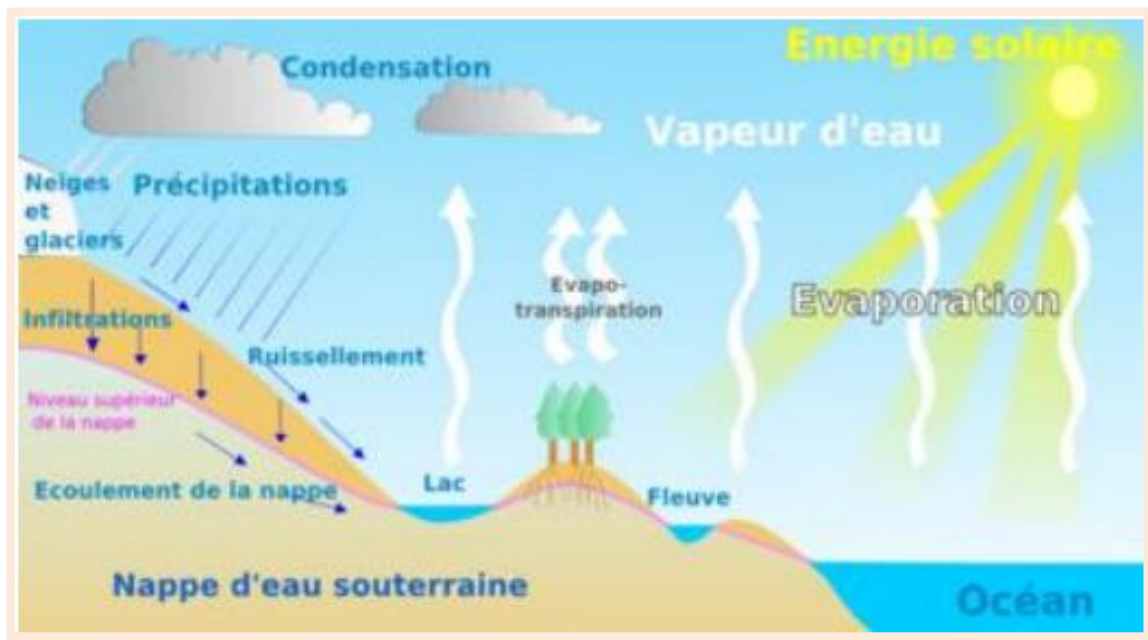


Figure 01 : Cycle de l'eau (D'après CIE, 2013).

1. L'évaporation et l'évapotranspiration

L'évaporation correspond au passage de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur sous l'effet du rayonnement solaire. Elle se produit principalement à la surface des océans, des mers, des lacs et des cours d'eau. À ce phénomène s'ajoute la transpiration des plantes, appelée évapotranspiration, qui contribue également au transfert de l'eau vers l'atmosphère. Ensemble, ces processus représentent l'un des mécanismes essentiels du cycle hydrologique en assurant le transport de l'eau depuis la surface terrestre vers l'atmosphère (**Renard, 2007**).

2. La condensation

Lorsque l'air contenant de la vapeur d'eau s'élève dans l'atmosphère, il se refroidit progressivement. Cette diminution de température provoque la transformation de la vapeur d'eau en fines gouttelettes liquides ou en cristaux de glace. Les particules ainsi formées s'agrègent autour de noyaux de condensation pour donner naissance aux nuages. La

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

condensation constitue une étape clé du cycle hydrologique, car elle précède directement la formation des précipitations (**Water Science School, 2019**).

3. Les précipitations

Les précipitations correspondent au retour de l'eau de l'atmosphère vers la surface terrestre. Elles se produisent lorsque les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glace dans les nuages deviennent suffisamment lourds pour tomber sous forme de pluie, neige, grêle ou bruine. Les précipitations constituent la principale manière dont l'eau atmosphérique revient vers la surface de la terre, alimentant ainsi à la fois les ressources en eau de surface et les nappes souterraines (**Water Science School, 2019**).

4. Le ruissellement

Le ruissellement désigne la partie de l'eau provenant des précipitations qui s'écoule à la surface du sol pour rejoindre les rivières, les lacs et, finalement, les océans. Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature du sol, la pente du terrain et la couverture végétale, qui influencent la capacité d'infiltration et l'écoulement de l'eau. Le ruissellement est un élément important du cycle hydrologique, contribuant à l'alimentation des cours d'eau et au transport des sédiments et des substances dissoutes (**Water Science School, 2018**).

5. L'infiltration et la recharge des nappes souterraines

Une autre fraction de l'eau de pluie pénètre dans le sol par infiltration. Cette eau traverse les différentes couches du sol et peut atteindre les aquifères souterrains où elle contribue à la recharge des nappes phréatiques. Ce processus est essentiel pour le maintien des réserves d'eau souterraines utilisées pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation (**Renard, 2007**).

Ainsi, le cycle de l'eau constitue un système naturel complexe et continu qui assure la circulation permanente de l'eau entre les différents réservoirs de la planète et joue un rôle fondamental dans l'équilibre des écosystèmes et la gestion des ressources hydriques (Tableau 01) (**Durand et al., 1999**).

Ces différentes étapes illustrent le fonctionnement global du cycle hydrologique qui assure la circulation continue de l'eau dans la nature et garantit la disponibilité des ressources hydriques nécessaires aux écosystèmes et aux activités humaines.

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

Tableau 01 : Description des principales étapes du cycle de l'eau et leur importance hydrologique (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Étapes du cycle de l'eau	Description	Importance hydrologique
Évaporation	Transformation de l'eau liquide en vapeur sous l'effet de la chaleur solaire à partir des océans, des lacs et des rivières.	Permet le transfert de l'eau vers l'atmosphère.
Condensation	Refroidissement de la vapeur d'eau dans l'atmosphère formant des nuages.	Étape nécessaire à la formation des précipitations.
Précipitation	Chute de l'eau de l'atmosphère vers la surface terrestre sous forme de pluie, neige ou grêle.	Source principale d'alimentation des ressources en eau.
Ruissellement	Écoulement de l'eau à la surface du sol vers les cours d'eau et les lacs.	Contribue à l'alimentation des rivières et des barrages.
Infiltration	Pénétration de l'eau dans le sol pour alimenter les nappes souterraines.	Assure la recharge des aquifères et des nappes phréatiques.

III. Pollution des eaux de barrage

Les barrages concentrent naturellement les apports provenant de leur bassin versant, ce qui les rend particulièrement vulnérables à diverses formes de pollution. Ces pollutions peuvent être classées selon leur origine et leur nature (Figure 02).



Figure 02 : Circulation continue de l'eau et dispersion des polluants à l'échelle planétaire (Benhamrouche, 2020).

1. Industrie

Les activités industrielles situées dans le bassin versant peuvent rejeter des eaux contenant des métaux lourds (plomb, cadmium, mercure), des solvants organiques et des composés chimiques persistants (**Benkaddour, 2018**). Ces polluants se déposent souvent dans les sédiments et peuvent se bio accumuler dans les organismes aquatiques, entraînant une toxicité chronique et une perturbation des chaînes alimentaires. La proximité d'industries intensifie la vulnérabilité des retenues aux pollutions chimiques et peut rendre certaines zones du réservoir impropres à l'usage domestique (Figure 03) (**Benkaddour, 2018**).

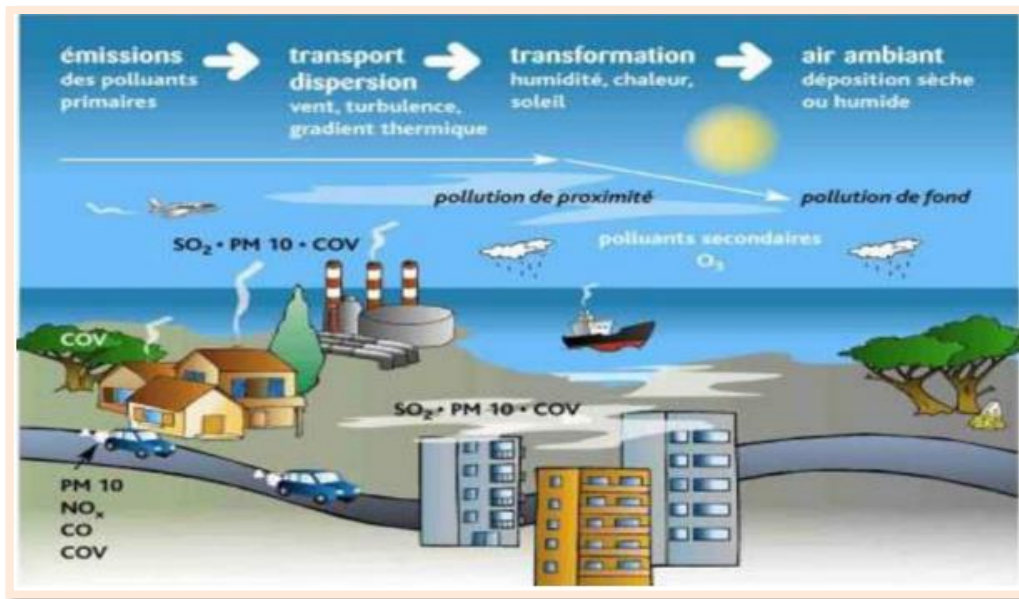


Figure 03 : Les pollutions des eaux produites par l'industrie (Tonye, 2015).

Le ruissellement agricole est une source majeure de pollution des barrages. Il transporte :

- **Nutriments** : L'azote et le phosphore provenant des engrais favorisent l'eutrophisation, entraînant la prolifération de phytoplancton et d'algues, et provoquant des fluctuations importantes de l'oxygène dissous (**Commissariat général au développement durable, 2026**).
- **Pesticides** : Herbicides, insecticides et fongicides sont transportés vers les réservoirs, présentant des risques de contamination chimique et biologique (**Benkaddour, 2018**).
- **Sédiments et matières organiques** : Les sédiments et les matières organiques provenant des sols et des terres agricoles sont transportés vers les cours d'eau par le ruissellement. Ce phénomène augmente la turbidité et modifie les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. S'ils ne sont pas correctement éliminés lors du traitement, ces éléments peuvent compliquer les processus de purification et affecter la qualité de l'eau potable (**Matilainen & Sillanpää, 2010**).

2. Pollution domestique

Les eaux usées domestiques apportent des matières organiques biodégradables, nutriments et microorganismes pathogènes. Cette pollution augmente la demande biochimique en oxygène (DBO) et peut provoquer des zones d'hypoxie dans le réservoir. La présence de bactéries, virus et protozoaires peut représenter un risque sanitaire direct pour les populations utilisant l'eau du barrage (Figure 04) (**Bengouga, 2010**).



Figure 04 : Pollution des eaux d'origine domestique (ISO GOURDE, 2023).

3. Eaux pluviales

Les précipitations entraînent le lessivage des sols urbains, agricoles et industriels, transportant divers polluants tels que les hydrocarbures, les métaux lourds et les particules fines vers les plans d'eau et les réservoirs. Les pluies intenses augmentent la charge polluante et provoquent une variabilité spatiale et temporelle de la qualité de l'eau (**Paul & Meyer, 2001**).

4. Pollution naturelle

Les eaux peuvent contenir naturellement des éléments dissous tels que le fer, le manganèse, l'arsenic ou l'aluminium, provenant de la dissolution des roches et de l'érosion. Bien que ces éléments soient naturels, ils peuvent atteindre des concentrations préoccupantes pour la potabilité et la santé des écosystèmes aquatiques (**Hem, 1992**).

5. Substances liées au traitement de l'eau

L'ajout de produits chimiques lors des opérations de coagulation, de floculation ou de désinfection dans les stations de traitement peut laisser des résidus dans l'eau. Ces substances sont susceptibles de réagir avec la matière organique naturelle et de former des sous-produits potentiellement toxiques, ce qui rend nécessaire un suivi strict de la qualité de l'eau (**Richardson & Ternes, 2014**).

IV. Les principaux polluants des eaux naturelles

Les eaux naturelles peuvent être contaminées par différentes substances provenant des activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie ou les rejets domestiques, mais aussi par

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

certaines phénomènes naturels. Ces polluants modifient la qualité de l'eau et peuvent perturber les écosystèmes aquatiques ainsi que représenter un risque pour la santé humaine. Selon leur nature, les polluants des eaux naturelles sont généralement classés en trois catégories principales : **(World Health Organization, 2017)**

Polluants physiques

Les polluants physiques correspondent aux éléments qui modifient les caractéristiques physiques de l'eau sans changer nécessairement sa composition chimique. Ils influencent notamment la transparence, la température et la charge solide de l'eau.

Les principaux polluants physiques sont :

➤ **Les matières en suspension (MES)**

Elles sont constituées de particules solides comme les argiles, les sables, les limons ou les débris organiques. Elles proviennent souvent de l'érosion des sols, du ruissellement agricole ou des rejets urbains. Leur présence augmente la turbidité de l'eau et limite la pénétration de la lumière, ce qui peut perturber la photosynthèse des organismes aquatiques.

➤ **La turbidité**

Elle correspond au trouble de l'eau provoqué par la présence de particules fines en suspension. Une forte turbidité réduit la qualité esthétique de l'eau et peut favoriser la prolifération de micro-organismes **(World Health Organization, 2017)**.

➤ **La pollution thermique**

Elle est causée par le rejet d'eaux chaudes provenant notamment des centrales électriques ou de certaines industries. L'augmentation de la température de l'eau diminue la solubilité de l'oxygène dissous et perturbe l'équilibre biologique des écosystèmes aquatiques.

➤ **Les déchets solides et flottants**

Il s'agit de déchets visibles comme les plastiques, les feuilles ou d'autres matières organiques qui altèrent l'aspect physique des milieux aquatiques **(World Health Organization, 2017)**. Ces polluants peuvent modifier les conditions de vie des organismes aquatiques et perturber l'équilibre écologique des écosystèmes aquatiques **(Chapman, 1996)**.

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

Polluants chimiques :

Les polluants chimiques regroupent les substances chimiques présentes dans l'eau à des concentrations pouvant être nocives pour les organismes vivants ou pour la santé humaine. Ils peuvent être d'origine naturelle ou résulter d'activités humaines (**Meybeck, Chapman, & Helmer, 1990**).

Parmi les principaux polluants chimiques, on distingue :

➤ **Les nutriments (nitrates et phosphates)**

Ils proviennent principalement des engrais agricoles et des eaux usées domestiques. Leur accumulation dans l'eau peut provoquer le phénomène d'eutrophisation caractérisé par une prolifération excessive d'algues.

➤ **Les métaux lourds**

Comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et l'arsenic (As). Ces éléments proviennent souvent des activités industrielles ou minières et peuvent être toxiques même à de faibles concentrations.

➤ **Les pesticides et produits phytosanitaires**

Utilisés en agriculture pour lutter contre les ravageurs, ils peuvent contaminer les eaux de surface et les eaux souterraines par ruissellement ou infiltration.

➤ **Les hydrocarbures et solvants industriels**

Ils sont issus principalement des activités pétrolières, du transport ou des rejets industriels.

➤ **Les composés organiques et minéraux dissous**

Comme l'ammonium, les sulfates ou certains composés organiques qui modifient les propriétés chimiques de l'eau. La présence de ces substances peut entraîner des effets toxiques sur la faune et la flore aquatiques et compromettre l'utilisation de l'eau pour la consommation humaine (**Meybeck, Chapman, & Helmer, 1990**).

Polluants microbiologiques

Les polluants microbiologiques sont constitués de micro-organismes pathogènes présents dans l'eau et pouvant provoquer des maladies chez l'homme et les animaux. Ils proviennent

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

principalement des rejets d'eaux usées, des déjections animales ou de la contamination fécale (Bitton, 2005).

Les principaux polluants microbiologiques sont :

- **Les bactéries pathogènes** : telles qu'*Escherichia coli*, les *coliformes fécaux*, les *salmonelles* ou les *vibrions*.
- **Les virus** : comme les virus responsables de l'hépatite A ou de certaines infections intestinales.
- **Les protozoaires et parasites** : tels que *Giardia* ou *Cryptosporidium*, qui peuvent provoquer des maladies gastro-intestinales.

La présence de ces micro-organismes dans l'eau constitue un indicateur important de contamination et représente un risque sanitaire majeur, en particulier pour les eaux destinées à la consommation humaine (Bitton, 2005).

Nous donnons dans le tableau 02, un récapitulatif des différents types de polluants des eaux naturelles.

Tableau 02 : Récapitulatif des principaux polluants des eaux naturelles.

Type de polluants	Exemples	Sources principales	Effets
Polluants physiques	Matières en suspension, turbidité, pollution thermique, déchets solides	Érosion des sols, ruissellement, rejets industriels	Diminution de la transparence, perturbation de la photosynthèse, modification de la température
Polluants chimiques	Nitrates, phosphates, métaux lourds, pesticides, hydrocarbures	Agriculture, industrie, rejets urbains	Toxicité pour les organismes aquatiques, eutrophisation
Polluants microbiologiques	Bactéries, virus, protozoaires	Eaux usées domestiques, déjections animales	Maladies hydriques, contamination de l'eau potable

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

V. Normes de qualité des eaux (OMS et normes algériennes)

Les normes de qualité des eaux ont pour objectif principal de protéger la santé humaine et l'environnement. Selon **Ben Kaddour (2018)**, elles établissent des seuils pour les paramètres microbiologiques, chimiques et physico-chimiques afin de garantir la potabilité de l'eau et de prévenir les risques sanitaires. L'OMS fournit des lignes directrices mondiales qui servent de référence pour l'élaboration des normes nationales. En Algérie, ces recommandations sont adaptées aux conditions locales, avec des limites spécifiques pour les nitrates, phosphates, métaux lourds et indicateurs bactériologiques. Le respect de ces normes assure non seulement la sécurité sanitaire, mais aussi une qualité acceptable sur le plan organoleptique (goût, couleur, odeur), renforçant ainsi la confiance des consommateurs dans l'eau potable (**Benkaddour, 2018**).

Nous donnons dans le tableau 03, une comparaison entre les principales normes OMS et algériennes

Tableau 03 : Les normes OMS et algériennes de la qualité de l'eau (Benkaddour, 2018).

Paramètres	Normes OMS	Normes algérienne	Remarques
pH	6,5–9,5	6,5–8,5	Ajustement national pour des conditions locales
Turbidité (NTU)	≤ 5	≤ 5	Valeurs identiques pour potabilité
Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	1400	2800	Tolérance locale plus élevée aux ions dissous
Nitrates (mg/L)	50	50	Seuil critique pour la santé infantile
Orthophosphates (mg/L)	0,2	0,5	Valeur nationale plus permissive
Ammoniaque (mg/L)	0,5	0,5	Limite identique
Coliformes fécaux	Absence/100 mL	Absence/100 mL	Contrôle microbiologique strict

Classification des eaux selon leur qualité (Tableau 04) : elle repose sur l'analyse combinée de paramètres physicochimiques, microbiologiques et biologiques, permettant d'évaluer leur qualité et leur aptitude à différents usages. Les paramètres physicochimiques incluent le pH, la turbidité, la conductivité et la concentration en nutriments ou polluants

Chapitre I : Généralités sur les eaux et les barrages

chimiques. Les paramètres microbiologiques mesurent la présence d'organismes indicateurs de contamination fécale, tels que les coliformes totaux et fécaux, tandis que les paramètres biologiques reflètent l'état trophique et la biodiversité aquatique. Selon cette analyse, les eaux peuvent être classées en très bonne, bonne, moyenne, médiocre et mauvaise qualité. Cette classification est essentielle pour la gestion des barrages et pour déterminer les traitements adaptés à chaque type d'eau, que ce soit pour la consommation humaine, l'irrigation agricole ou les usages industriels (Bengouga, 2010).

Tableau 04 : Classification des eaux selon leur qualité et critères d'évaluation (Bengouga, 2010).

Classe de la qualité	Critères physicochimiques	Critères microbiologiques	Critères biologiques	Usage recommandé
Très bonne	pH équilibré, faible turbidité, faible conductivité, absence de polluants chimiques	Absence de coliformes totaux et fécaux	Biodiversité équilibrée, faible charge organique	Consommation humaine directe, usage agricole et industriel sans traitement
Bonne	Paramètres légèrement variables, présence minime de nutriments	Coliformes détectés à très faible niveau	Légère variation biologique	Consommation humaine après traitement léger, irrigation et usage industriel
Moyenne	Niveaux modérés de nitrates, phosphates ou autres substances	Présence modérée de bactéries indicatrices	Déséquilibre biologique modéré	Nécessite traitement avant consommation, usage agricole adapté
Médiocre	Concentrations élevées de polluants chimiques, pH ou conductivité irréguliers	Présence significative de coliformes et autres pathogènes	Déséquilibre biologique important	Non recommandée pour consommation humaine directe, traitement nécessaire pour usage agricole ou industriel
Mauvaise	Pollution chimique élevée, turbidité et conductivité élevées	Contamination microbiologique élevée	Dégradation biologique sévère	Usage fortement limité, traitement intensif indispensable

VI. Impact de la pollution sur la santé et l'environnement

La pollution des eaux du réservoir de Hammam Boughrara résulte principalement du ruissellement agricole et industriel des bassins versants environnants. Les nitrates, pesticides et métaux lourds sont transportés vers le barrage, affectant la qualité de l'eau et augmentant le risque pour la santé humaine, notamment les maladies hydriques (diarrhée, gastro-entérite) et les effets chroniques dus aux contaminants chimiques **(Babuji et al., 2023)**.

Sur le plan écologique, l'excès de nutriments favorise la prolifération du phytoplancton et des algues, réduisant l'oxygène dissous et perturbant la biodiversité aquatique. Ces phénomènes soulignent l'importance d'une gestion stricte des apports polluants et du suivi régulier de la qualité de l'eau pour protéger les populations locales et les écosystèmes **(Babuji et al., 2023)**.

**Chapitre II :
Présentation du Barrage
de Hammam Boughrara**

I. Situation géographique du barrage

Le barrage de Hammam Boughrara (figure 05) est localisé dans le Nord-Ouest de l'Algérie, au niveau de la wilaya de Tlemcen, à proximité de la ville de Maghnia et à environ 15 km de la frontière algéro-marocaine (**Hadjel et al., 2014**). Il est implanté sur l'oued Mouillah, un affluent majeur de l'oued Tafna, ce qui lui confère un rôle stratégique dans la gestion des ressources en eau d'une région semi-aride caractérisée par une forte variabilité pluviométrique (**Bahloul, 2017**).

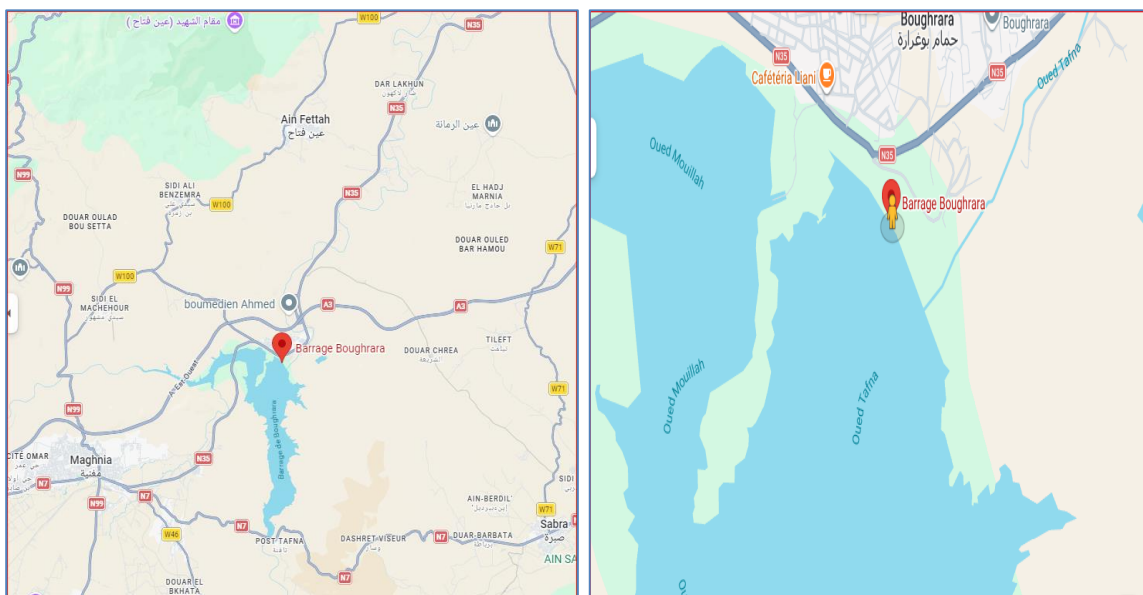


Figure 05 : Localisation du barrage de Hammam Boughrara (Google Maps, 2026).

Le bassin versant de l'oued Tafna constitue le principal système hydrologique de la région, avec un réseau dense d'affluents qui convergent vers le barrage (**Bouzaïd-Laghaa & Djelita, 2011**). La localisation géographique du barrage permet de collecter efficacement les eaux de ruissellement, limitant ainsi les pertes hydriques et maximisant le stockage (**Benadda, 2022**). La zone environnante est soumise à des pressions anthropiques et environnementales qui influencent la qualité et la quantité des apports hydriques (**Hadjel et al., 2014**).

Rôles géographiques et importance stratégique du barrage:

- Protection contre les sécheresses fréquentes.
- Régulation du débit des oueds.
- Approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation.

Chapitre II : Présentation du Barrage de Hammam Boughrara

- Localisation favorable à la collecte des eaux de ruissellement dans le bassin versant de l'oued Tafna.

II. Caractéristiques techniques du barrage

Le barrage de Hammam Boughrara (figure 06) a été mis en service en 1998 et est conçu comme un barrage en remblai pour optimiser la mobilisation des ressources en eau dans cette zone semi-aride (**Adjim & Djedid, 2018**).

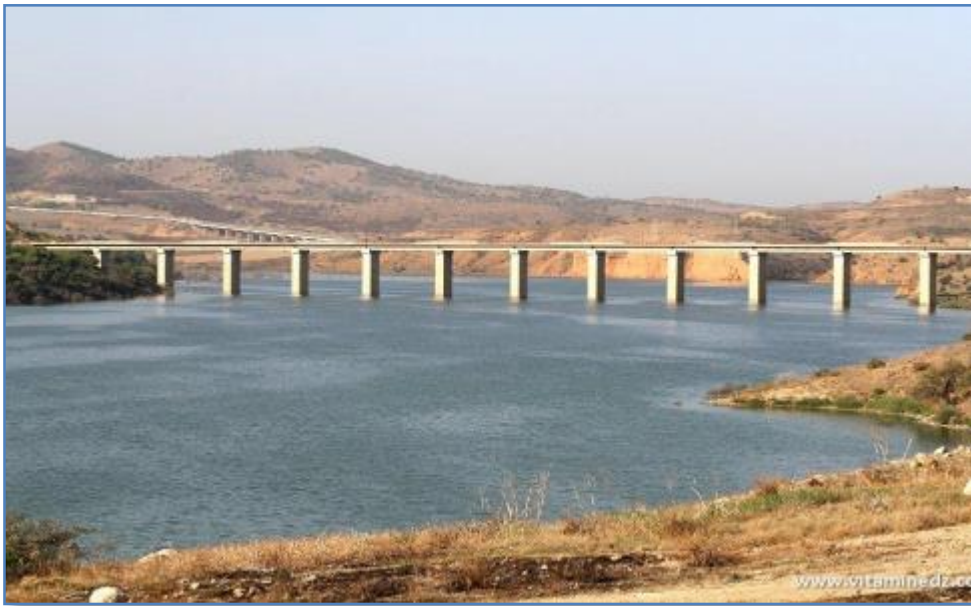


Figure 06: Vue générale du barrage de Hammam Boughrara (Hichem, 2014).

Il joue un rôle stratégique dans la gestion des ressources en eau de la région (**Benadda, 2022**). Il assure la régulation des fluctuations saisonnières des débits des oueds en aval (**Adjim & Djedid, 2018**), permettant ainsi un approvisionnement stable en eau potable et pour l'irrigation (**Benadda, 2022**). L'ouvrage contribue également à la réduction des risques d'inondation pour les zones situées en aval (**Bahloul, 2017**). Sa conception en remblai est adaptée aux conditions géologiques locales, garantissant la stabilité et la durabilité de l'ouvrage (**Bahloul, 2017**). La retenue couvre une superficie importante de 894 hectares (**Benadda, 2022**), offrant un stockage suffisant pour les périodes de sécheresse (**Hadjel et al., 2014**) et participant à la régulation des apports solides transportés par le cours d'eau (**Adjim & Djedid, 2018**).

Chapitre II : Présentation du Barrage de Hammam Boughrara

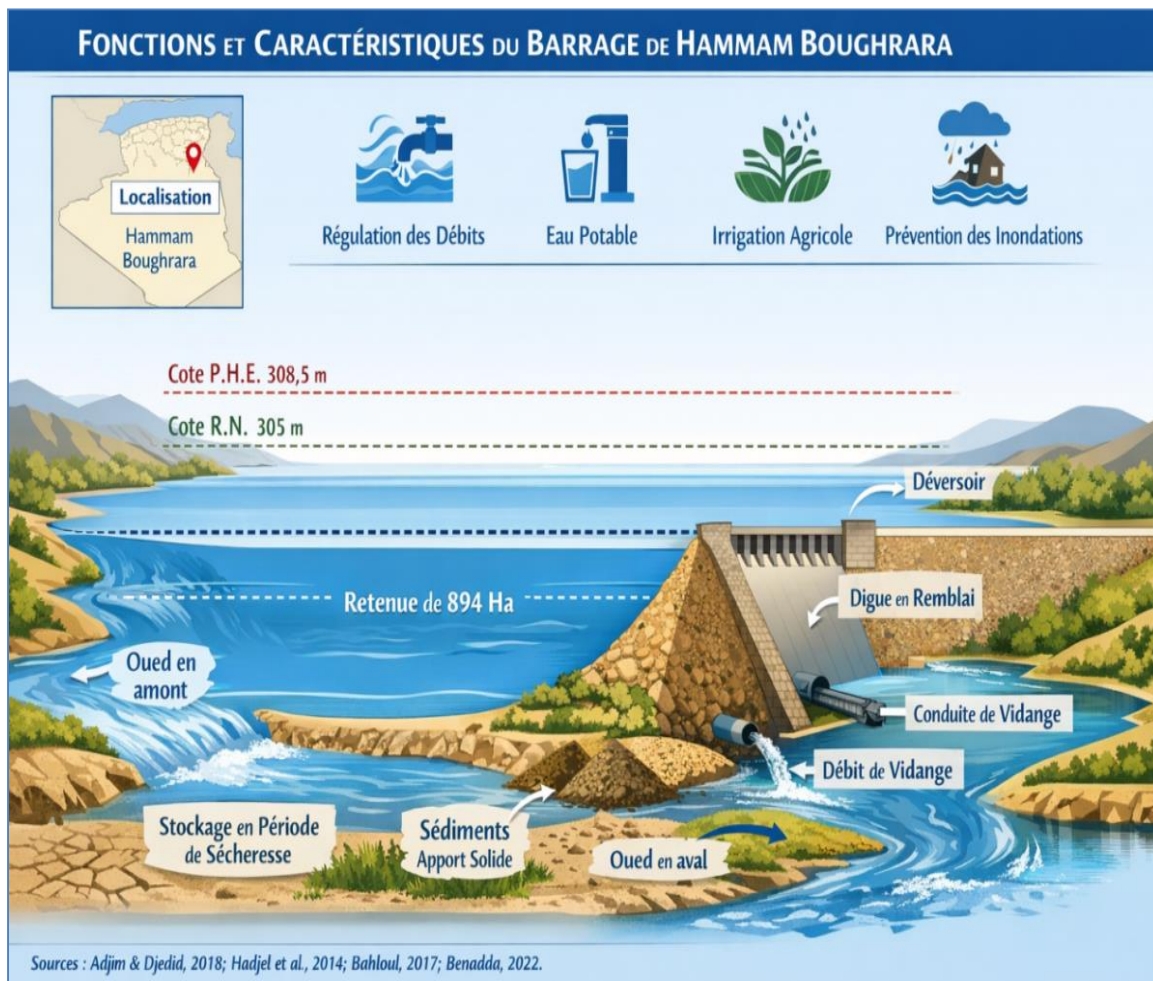


Figure 07 : Fonctions et caractéristiques du barrage de Hammam Boughrara (Adjim & Djedid, 2018 ; Hadjel et al., 2014 ; Bahloul, 2017 ; Benadda, 2022).

Le tableau ci-dessous et la figure 07 présentent les principales caractéristiques techniques du barrage, mettant en évidence sa capacité de stockage, ses dimensions et ses paramètres hydrologiques. Ces données confirment son importance dans la gestion des ressources hydriques régionales.

Chapitre II : Présentation du Barrage de Hammam Boughrara

Tableau 05: Caractéristiques techniques du barrage de Hammam Boughrara
(Benslimane, 2022).

État d'exploitation du barrage	En exploitation
Capacité totale	177(Hm ³)
Volume régularisé	59(Hm ³)
Volume mort	23.30(Hm ³)
Longueur en crête	1100(m)
Volume de remblai	3491000(m ³)
Largeur en crête	10(m)
La hauteur de la digue	61(m)
Côte de retenue normale (R.N)	305 (m)
Côte plus hautes eaux (P.H.E)	308,5(m)
Côte prise inférieure	272(m)
Côte vidange de fond	257(m)
Apport moyen annuel	54.15 (Hm ³ /an)
Débit sortant de vidange de fond	310(m ³ /s)
Apport solide moyen	501100(T/an)
Débit d'infiltration	100 (m ³ /j)
Débit de crue (1000 ans)	5880(m ³ /s)
Surface de lac	894 (Ha)
Superficie du bassin versant	4000(Km ²)

III. Sources d'alimentation hydrique du barrage

Le barrage est alimenté principalement par l'oued Mouillah (figure 08), complété par les précipitations annuelles. Les variations climatiques influencent fortement le remplissage et la régulation de la retenue (**Benadda, 2022**).



Figure 08: Oued Mouillah "Source d'alimentation principale" (Vitamedz, 2016).

La pluviométrie annuelle moyenne est de 325 mm, mais elle varie fortement d'une année à l'autre, affectant le remplissage et le volume régularisé du barrage (**Bouzi-Laghaa & Djelita, 2011**). La gestion technique de ces flux hydriques variables est essentielle pour maintenir un niveau optimal de la retenue (**Adjim & Djedid, 2018**). La recharge naturelle étant limitée, des stratégies de stockage et d'optimisation sont indispensables (figure 09) (**Benadda, 2022**).

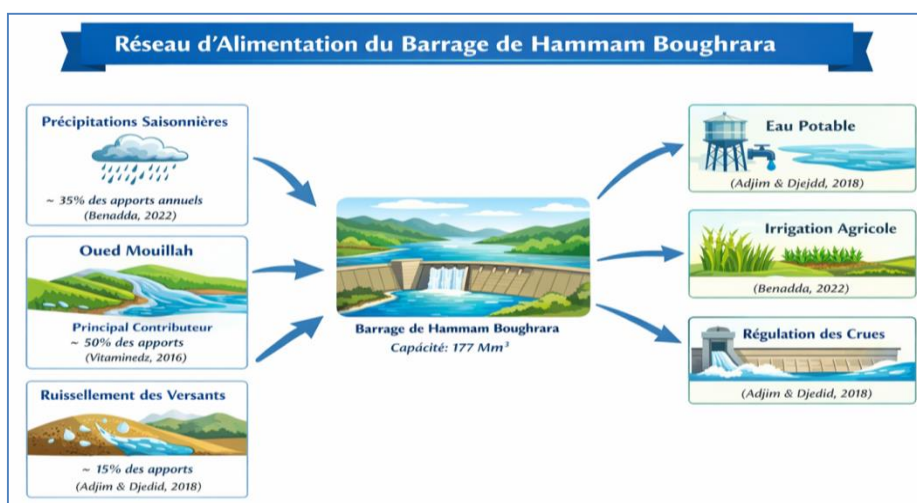


Figure 09: Réseau d'alimentation du Barrage de Hammam Boughrara (Adjim & Djedid, 2018; Benadda, 2022; Vitamedz, 2016).

IV. Principaux usages du barrage

Le barrage de Hammam Boughrara a été construit pour répondre à divers besoins essentiels de la région. Il joue un rôle central dans l’approvisionnement en eau, le soutien de l’agriculture, la régulation des crues et la surveillance environnementale, contribuant ainsi au développement socio-économique et à la sécurité alimentaire locale (**Adjim & Djedid, 2018; Bahloul, 2017**).

a) Approvisionnement en eau potable

Le barrage assure l’approvisionnement (figure 10) en eau potable des communes voisines, notamment Maghnia et certaines zones de Tlemcen (**Adjim & Djedid, 2018**). Les systèmes de traitement de l’eau dépendent du débit régulier fourni par le barrage pour maintenir les normes sanitaires (**Hadjel et al., 2014**).



Figure 10 : Schéma de l’approvisionnement en eau potable à partir du barrage (Rocheservière, 2022).

b) Irrigation agricole

Le barrage alimente des périmètres étendus autour de l’oued Mouillah, contribuant à l’amélioration de la productivité des cultures et au renforcement de la sécurité alimentaire locale (figure 11) (**Benadda, 2022**). Les cultures irriguées comprennent les céréales, les légumes et certains arbres fruitiers (**Bouزيد-Laghia & Djelita, 2011**).



**Figure 11 : Schéma du système d'irrigation agricole alimenté par le barrage.
(Sawadogo, 2025)**

c) Régulation hydrologique

Le barrage joue un rôle essentiel dans la régulation hydrologique (figure 12), en contrôlant les crues et en limitant les risques d'inondations en aval (**Adjim & Djedid, 2018**). Il garantit également un flux continu d'eau pendant les périodes de sécheresse, assurant ainsi la stabilité des ressources en eau pour tous les usages (**Hadjel et al., 2014**).



**Figure 12 : Barrage rempli illustrant la régulation hydrologique et le stockage des
eaux (Cochin & Moureaux, 2022).**

d) Suivi environnemental et scientifique

Le barrage est utilisé pour des études scientifiques et la surveillance environnementale, notamment sur la qualité de l'eau et la biodiversité aquatique (figure 13) (Bahloul, 2017; Benadda, 2022).

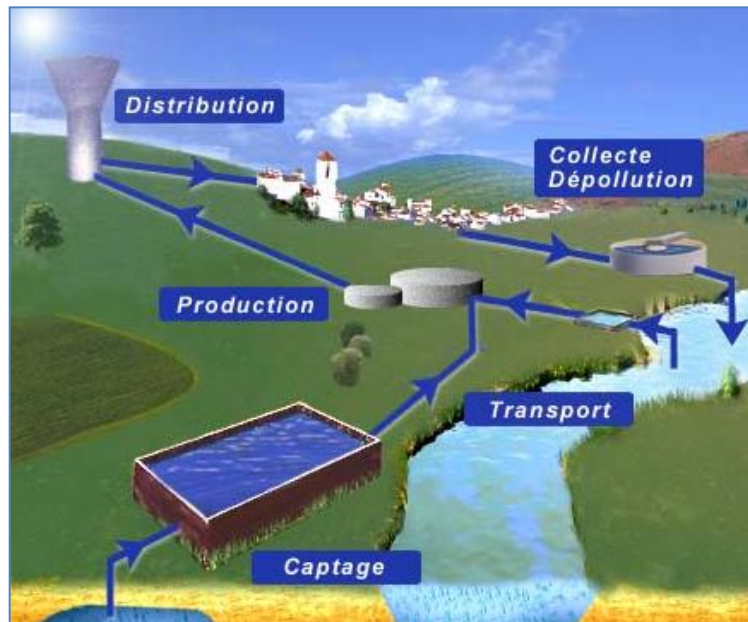


Figure 13 : Schéma du suivi de la qualité de l'eau et de la biodiversité aquatique (Georgi, 2011

Ces données permettent d'orienter la gestion durable du bassin versant et de protéger les écosystèmes aquatiques.

V. Activités humaines autour du barrage

Les activités humaines dans le bassin versant du barrage influencent directement la qualité et la quantité de l'eau, ainsi que la durabilité de la retenue. Ces activités modifient le cycle hydrologique naturel et introduisent divers polluants qui nécessitent une gestion attentive pour préserver les ressources en eau (figure 14) (Adjim & Djedid, 2018; Benadda, 2022).



Figure 14 : Activités humaines et impacts environnementaux autour du barrage de Hammam Boughrara (Adjim & Djedid, 2018 ; Hadjel et al., 2014 ; Bahloul, 2017 ; Benadda, 2022).

a) Activités agriculture

L'agriculture intensive dans la zone utilise des engrais chimiques et des pesticides, qui représentent une source majeure de pollution potentielle pour le barrage (Bouzid-Laghaa & Djelita, 2011; Benadda, 2022). Les cultures irriguées par le barrage modifient le cycle hydrologique et peuvent affecter le niveau des nappes phréatiques locales (Adjim & Djedid, 2018).

b) Développement urbain

L'expansion des villes et des villages autour du barrage génère des eaux usées domestiques et des déchets solides, dont certains sont directement rejetés dans la retenue (Hadjel et al., 2014; Bahloul, 2017). Ces rejets, souvent non traités, impactent la qualité de l'eau et augmentent les risques de pollution (Benadda, 2022).

c) Activités industrielles et artisanales

Les petites activités économiques, y compris l'artisanat et les industries légères, contribuent au ruissellement de polluants dans le bassin versant (Hadjel et al., 2014).

Chapitre II : Présentation du Barrage de Hammam Boughrara

L'exploitation irrégulière de l'eau et des matériaux à des fins commerciales représente une pression supplémentaire sur l'écosystème du barrage **(Bouزيد-Laghaa & Djelita, 2011)**.

VI. Pressions anthropiques sur la retenue

La retenue du barrage est soumise à de multiples pressions anthropiques qui affectent directement la qualité de l'eau et l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Ces pressions proviennent des activités humaines dans le bassin versant et nécessitent des mesures de gestion adaptées pour préserver les ressources en eau **(Hadjel et al., 2014; Benadda, 2022)**.

a) Sources de pression

Les rejets urbains et domestiques, directs ou indirects, dégradent la qualité de l'eau de la retenue **(Hadjel et al., 2014; Benadda, 2022)**. Les apports agricoles, incluant engrais, nutriments et pesticides, constituent une source supplémentaire de pollution **(Bouزيد-Laghaa & Djelita, 2011)**. De plus, l'exploitation irrégulière des ressources naturelles et les activités économiques et industrielles légères contribuent également à la pression sur l'écosystème **(Bahloul, 2017; Benadda, 2022)**.

b) Impacts environnementaux

Ces pressions entraînent un risque d'eutrophisation de la retenue, favorisant la prolifération d'algues et de plantes aquatiques **(Hadjel et al., 2014)**. Elles provoquent également la dégradation de la qualité de l'eau pour l'usage domestique et agricole **(Bouزيد-Laghaa & Djelita, 2011)**, ainsi que la perturbation des écosystèmes aquatiques et une réduction de la biodiversité **(Benadda, 2022)**.

c) Mesures de gestion et de protection

Pour limiter ces impacts, des mesures incluent la surveillance continue de la qualité de l'eau **(Adjim & Djedid, 2018)**, la réglementation stricte des rejets domestiques et industriels **(Hadjel et al., 2014)**, la sensibilisation et la formation des communautés locales **(Bahloul, 2017)**, ainsi que la mise en place de plans de gestion intégrée des ressources en eau **(Benadda, 2022)**.



Chapitre III : Matériel et Méthodes

Chapitre III : Matériels et Méthodes

I. Traitement des eaux du barrage de Hammam Boughrara

Les eaux brutes provenant du barrage de Hammam Boughrara sont utilisées pour l'approvisionnement en eau potable, à condition de passer par plusieurs étapes de traitement réalisées dans la station de potabilisation. Ces traitements visent à éliminer les particules en suspension, les substances organiques, les microorganismes pathogènes ainsi que tout autre élément pouvant compromettre la qualité de l'eau.

D'après Kettab (1992), les finalités du traitement des eaux se divisent en deux grandes catégories:

➤ **Finalité sanitaire (santé publique):** Le but principal est de fournir une eau exempte de tout danger pour la santé des consommateurs. Cela implique que l'eau distribuée ne doit contenir ni substances toxiques, qu'elles soient d'origine organique ou minérale, ni microorganismes pathogènes. Elle doit ainsi respecter les normes physicochimiques et bactériologiques établies.

➤ **Finalité technique:** Le traitement vise également à préserver le réseau de distribution et les équipements des usagers contre les phénomènes de corrosion et d'entartrage. Ces impératifs sont encadrés par la réglementation en vigueur, laquelle s'appuie à la fois sur des exigences de santé publique et sur les avancées technologiques.

Le processus de traitement suit généralement les étapes suivantes:

a) Brise de charge

L'eau en provenance du barrage s'écoule par gravité vers la station de traitement via une conduite de dérivation DN1400. Une dérivation DN800 se sépare de cette conduite principale pour alimenter l'installation d'entrée connue sous le nom de brise de charge. Les infrastructures situées en aval, entre la brise de charge et le réservoir intermédiaire (bâche d'eau), sont conçues pour assurer un écoulement par gravité sans besoin de pompage (figure 15) (Madouri Sid Ahmed & Yagoub Zakarya, 2020).



Figure 1 5: Brise de charge (Madouri Sid Ahmed & Yagoub Zakarya, 2020).

b) Pré-filtration

Depuis la chambre d'entrée de la brise de charge, l'eau traverse une paroi submergée avant de se diriger vers une seconde chambre dotée d'un tamis à tambour rotatif motorisé. Ce dispositif élimine les particules grossières dépassant 1,4 mm. Après décolmatage automatique, l'eau se dirige vers la chambre de sortie. Un système d'injection de soude caustique (NaOH) est prévu pour ajuster le pH de l'eau brute en vue de faciliter la précipitation des métaux lourds et phosphates possibles (Madouri Sid Ahmed & Yagoub Zakarya, 2020).

c) Bassin de coagulation

L'eau est conduite par une canalisation DN600 depuis la chambre de mesure vers deux bassins de coagulation fonctionnant par gravité (figure 16). Chaque bassin possède un mélangeur rapide vertical (64 tr/min) et traite un débit de 1100 m³/h avec un séjour de 3 minutes. Le chlorure ferrique (FeCl_3) est injecté comme coagulant pour favoriser la formation de micro floccs, grâce à deux pompes doseuses et deux réservoirs de stockage contenant la solution. Le dosage est déterminé par des tests de jar-test réalisés lors du démarrage (Bentrar Ahlem, 2023).



Figure 16 : Bassins de coagulation (Référence personnelle).

d) Chambre de floculation

Des bassins de coagulation, l'eau passe aux bassins de floculation qui possèdent deux chambres de réaction séparées par un déversoir et un compartiment d'évacuation (figure 17), chacune équipée d'un mélangeur lent (20 tr/min). Le volume utile total est de 286 m³, garantissant un temps de rétention de 15 minutes à un débit nominal de 1050 m³/h. Le coagulant déstabilise les particules colloïdales qui forment des floccs aptes à la décantation en présence d'un polymère synthétique (Madouri Sid Ahmed & Yagoub Zakarya, 2020).



Figure 17 : Chambres de floculation (Bentrar Ahlem, 2023).

e) Bassin de decantation

L'eau issue du processus de floculation est dirigée par gravité vers deux clarificateurs combinant bassin de sédimentation et épaisseur de boues. Ils permettent le recyclage d'environ 20 % des boues, tandis que les 80 % restants sont évacués vers l'oued (**Madouri Sid Ahmed & Yagoub Zakarya, 2020**).

f) Bassin de nitrification

Post-décantation, l'eau est transférée via une canalisation DN600 vers le bassin de nitrification avec pour objectif l'élimination de l'ammonium (NH_4^+) et la réduction des nitrites et nitrates restants dans l'eau brute (figure 18). La nitrification convertit l'azote ammoniacal en nitrates grâce à l'action des bactéries autotrophes aérobies *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*. Ce processus comprend deux étapes : la nitrification ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$), suivie de la nitrification ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) (**Bentrar Ahlem, 2023**).



Figure 18 : Bassin de nitrification (Madouri Sid Ahmed & Yagoub Zakarya, 2020).

g) Filtration sur sable

La filtration débarrasse physiquement l'eau des matières en suspension en passant à travers un milieu poreux comme les filtres à sable (figure 19). La station comporte trois filtres à sable ouverts disposés en parallèle, chacun ayant une surface de 63 m² (**Manuel de la station, 2006**).



Figure 19 : Filière filtration à sable (Bentrar Ahlem, 2023).

h) Réservoir intermédiaire

L'eau filtrée est acheminée vers un réservoir intermédiaire (bâche de 680 m³) servant au lavage des filtres à sable et des filtres à charbon actif granulé (CAG), ainsi qu'à assurer un temps de contact suffisant pour la désinfection au chlore (**Manuel de la station, 2006**).

i) Filtration sur charbon actif

La filtration sur charbon actif emploie quatre filtres destinés aux deux filières pour enlever les oxydants, substances organiques et améliorer les paramètres organoleptiques tels que le goût, l'odeur et la couleur (**Manuel de la station, 2006**).

II. Les analyses physicochimiques

Les analyses physicochimiques des eaux du barrage de Hammam Boughrara ont été réalisées au sein du laboratoire, conformément aux protocoles et normes applicables. Cette étude s'inscrit dans une démarche d'évaluation de la qualité des eaux superficielles à travers l'analyse d'un ensemble de paramètres physicochimiques représentatifs.

La méthodologie adoptée repose, dans un premier temps, sur le prélèvement d'échantillons d'eau directement au niveau du site d'étude, en respectant les conditions de conservation et de transport afin d'éviter toute altération des paramètres (figure 20).



Figure 20 : Prélèvement d'échantillons d'eau du barrage (Référence personnelle).

Dans un second temps, les échantillons ont été soumis à différentes techniques analytiques au laboratoire, incluant les mesures directes, les méthodes titrimétriques ainsi que les analyses spectrophotométriques, selon la nature de chaque paramètre étudié.

1) La température (°C)

La température constitue un paramètre physicochimique important dans l'évaluation de la qualité des eaux. Elle influence directement plusieurs caractéristiques du milieu aquatique, notamment la solubilité des gaz dissous, en particulier l'oxygène, ainsi que la dissociation des sels minéraux. Elle agit également sur certains paramètres tels que la conductivité électrique et le pH. Une élévation de la température entraîne généralement une diminution de la concentration en oxygène dissous dans l'eau, ce qui peut perturber l'équilibre biologique du milieu aquatique (**Robier, 1996**). Ces variations thermiques peuvent ainsi affecter les écosystèmes aquatiques et le développement des organismes vivants qui y évoluent (**Dajoz, 2006**).

✓ Principe

La mesure de la température consiste à déterminer l'état thermique de l'échantillon d'eau à l'aide d'un pHmètre muni d'une sonde thermique. Les valeurs obtenues sont exprimées en degré Celsius (°C).

Chapitre III : Matériels et Méthodes

✓ **Matériel**

- Eau à analyser
- Bécher de 250 mL
- pHmètre muni d'une sonde de température

✓ **Mode opératoire**

La température de l'échantillon a été mesurée à l'aide d'une sonde thermique appropriée. Pour cela, l'échantillon a d'abord été introduit dans un bécher propre afin d'éviter toute contamination pouvant influencer les résultats. Ensuite, la sonde a été soigneusement immergée dans l'eau de l'échantillon tout en veillant à assurer un bon contact avec le milieu. Après quelques instants, la lecture a été laissée se stabiliser afin d'obtenir une mesure précise et fiable. Enfin, la valeur de la température affichée par l'appareil a été relevée et exprimée en degré Celsius (°C).

2) Le (pH)

Le potentiel hydrogène (pH) est un paramètre essentiel dans l'évaluation de la qualité des eaux. IL permet de déterminer le degré d'acidité ou d'alcalinité d'un milieu aqueux. Ce paramètre dépend de la concentration en ions hydronium (H^+) présents dans l'eau et s'exprime sur une échelle allant de 0 à 14. Une valeur de pH égale à 7 correspond à un milieu neutre, tandis qu'une valeur inférieure ou supérieure traduit respectivement un milieu acide ou basique (**Yazli, 2020**).

✓ **Principe**

La mesure du pH repose sur une méthode électrochimique utilisant une électrode en verre reliée à un pHmètre, permettant de mesurer le potentiel généré par les ions hydrogène présents dans l'échantillon.

✓ **Matériel**

- Eau à analyser
- Bécher de 250 mL
- Eau distillée
- PHmètre à électrode en verre (figure 21).

Chapitre III : Matériels et Méthodes

✓ Mode opératoire

Le pH de l'échantillon a été déterminé à l'aide d'un pHmètre approprié. Pour cette analyse, un bécher a d'abord été rempli avec l'échantillon d'eau à analyser. L'électrode de l'appareil a ensuite été soigneusement nettoyée à l'eau distillée afin d'éviter toute contamination susceptible d'altérer les résultats. Après le nettoyage, l'électrode a été immergée dans le bécher contenant l'échantillon. La mesure a été lancée en appuyant sur le bouton « AR », puis sur « ENTRER ». Après quelques instants d'attente, le temps nécessaire à la stabilisation de la lecture, la valeur du pH affichée par l'appareil a été relevée et enregistrée.

Tableau 6 : Classification des eaux d'après leur pH (Zerdoudi & Segouali, 2022).

pH<5	Acidité forte
pH=7	pH neutre
7<pH<8	Neutralité approchée
5.5<pH<8	Neutralité approchée
pH=8	Alcalinité forte

✓ Appareillage

- PHmètre à électrode en verre (Figure 21).



Figure 21 : pH mètre WTW (Zerdoudi & Segouali, 2022).

3) Orthophosphate (PO_4^{-3})

Les orthophosphates constituent la forme minérale du phosphore présente dans les eaux naturelles, soit à l'état dissous, soit en suspension. Leur présence peut être d'origine naturelle, notamment à travers la décomposition de la matière organique ou l'altération des

Chapitre III : Matériels et Méthodes

roches. Toutefois, ils peuvent également provenir d'activités humaines telles que les rejets domestiques et industriels ainsi que l'utilisation d'engrais en agriculture (**Tardat, 1992**). Des concentrations élevées en orthophosphates favorisent le phénomène d'eutrophisation, caractérisé par une prolifération excessive des micro-organismes et une dégradation progressive de la qualité des eaux (**Rodier, 2005**).

✓ Principe

En milieu acide, les ions orthophosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine et de potassium pour former un complexe phosphomolybdique. Ce complexe est ensuite réduit par l'acide ascorbique, donnant une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en orthophosphates. La lecture spectrophotométrique s'effectue à une longueur d'onde maximale située autour de 880 nm (**ISO 6878**).

✓ Matériel

- Balance analytique
- Fioles jaugées
- Pipettes graduées ou jaugées
- Béchers
- Agitateur en verre ou agitateur magnétique
- Réfrigérateur
- Bain de refroidissement
- Spectrophotomètre
- Cuvettes spectrophotométriques

✓ Réactifs

- Acide ascorbique
- Acide sulfurique
- Eau distillée
- Heptamolybdate d'ammonium tétrahydraté
- Tartrate de potassium et d'antimoine hémihydraté

Chapitre III : Matériels et Méthodes

✓ Mode opératoire

Les solutions nécessaires au dosage des orthophosphates ont été préparées selon la méthode colorimétrique. Tout d'abord, une solution d'acide ascorbique a été obtenue en dissolvant $10 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ du composé dans 100 mL d'eau distillée. Cette solution a été conservée au froid et à l'abri de la lumière afin de préserver sa stabilité. Ensuite, une solution d'acide sulfurique à $9 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ a été préparée par dilution contrôlée, en ajoutant lentement l'acide à l'eau distillée sous agitation continue et refroidissement, puis en laissant la solution revenir à température ambiante.

Par ailleurs, une solution d'heptamolybdate d'ammonium tétrahydraté a été préparée en dissolvant $13 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ du réactif dans $100 \text{ mL} \pm 5 \text{ mL}$ d'eau distillée. Une autre solution contenant du tartrate de potassium et d'antimoine hémihydraté a également été préparée par dissolution de $0,35 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$ dans $100 \text{ mL} \pm 5 \text{ mL}$ d'eau distillée.

Le réactif de mélange a ensuite été obtenu en combinant successivement la solution d'heptamolybdate d'ammonium, environ 300 mL de la solution diluée d'acide sulfurique, puis la solution de tartrate de potassium et d'antimoine. Le réactif ainsi préparé a été utilisé pour le dosage des orthophosphates par méthode colorimétrique (figure 22).



Figure 22 : Dosage des orthophosphates (Kourdi, 2021).

4) les nitrates (NO_3^-)

Les nitrates représentent l'une des formes les plus oxydées de l'azote dans le milieu aquatique. Leur concentration dans les eaux naturelles varie généralement entre 1 et 15 mg/L selon la saison et l'origine de l'eau (Nisbet et al., 1970). Ils sont présents dans les sols ainsi

Chapitre III : Matériels et Méthodes

que dans les eaux superficielles et souterraines. Leur formation résulte principalement de l'oxydation biologique des composés azotés issus de la décomposition de matières organiques végétales et animales. Ce processus débute par la formation d'ions ammonium, qui sont ensuite transformés en nitrates par nitrification. Leur présence dans les eaux est donc directement liée au cycle naturel de l'azote (**Schuddeboom, 1993**).

✓ Le principe

Le dosage des nitrates repose sur une méthode colorimétrique. Les ions nitrates réagissent avec un réactif spécifique pour former un composé coloré jaune en milieu alcalin. L'intensité de cette coloration est proportionnelle à la concentration en nitrates présente dans l'échantillon qui est déterminée par lecture spectrophotométrique (**Yazli, 2020**).

✓ Matériel

- Spectrophotomètre
- Cuvettes rondes
- Pipette graduée
- Agitateur manuel

✓ Réactifs

- Réactif NitraVer 5
- Échantillon à analyser
- Eau distillée (nécessaire pour rinçage)

✓ Mode opératoire

La concentration en nitrates a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre en utilisant le programme spécifique « Nitrate ». Pour cette analyse, 10 mL de l'échantillon ont été introduits dans une cuve ronde propre, puis une pochette de réactif NitraVer 5 a été ajoutée. Après fermeture de la cuve, le mélange a été agité vigoureusement pendant une minute afin d'assurer une dissolution complète du réactif. La solution a ensuite été laissée au repos pendant 5 minutes pour permettre le développement d'une coloration ambrée en présence de nitrates. Un blanc a été préparé à partir de l'échantillon traité, puis les cuves ont été soigneusement essuyées avant leur introduction dans le compartiment de mesure. Après le réglage du zéro à l'aide du blanc, la lecture de l'échantillon a été effectuée et la concentration en nitrates a été directement affichée par l'appareil en mg/L.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

5) les nitrites (NO_2^-)

Les nitrites (NO_2^-) se forment principalement à travers deux processus : une oxydation incomplète de l'ammoniac ou une réduction des nitrates (**Boualem , 2009**).

✓ **Principe**

En milieu acide, à un pH de 1.9, les ions nitrites interagissent avec la sulfamilamide pour donner naissance à un sel dediazonium, résultat d'une réaction de diazotation. Ce dernier réagit ensuite avec le N-(1-naphtyl) éthylènediamine-dichlorohydraté pour produire un colorant azoïque rouge. Cette méthode suit les réglementations établies par les normes (ISO 6777NA 1657) et (ISO 5667,2004(F)).

✓ **Matériel**

- Spectrophotomètre DR/2500
- Cuvettes rondes
- Pipette graduée
- Chronomètre
- Agitateur manuel

✓ **Réactifs :**

- Réactif NitriVer 3
- Échantillon à analyser
- Eau distillée

✓ **Mode opératoire**

La concentration en nitrites a été déterminée par la méthode de diazotation à l'aide d'un spectrophotomètre DR/2500 en sélectionnant le programme approprié. Pour cette analyse, 10 mL de l'échantillon ont été introduits dans une cuve ronde propre, puis une pochette de réactif NitraVer 3 a été ajoutée. Après fermeture de la cuve, le mélange a été agité pendant une minute afin d'assurer une bonne homogénéisation, puis laissé au repos pendant 5 minutes pour permettre le développement de la réaction. Une cuve blanche contenant l'échantillon non traité a été préparée pour le réglage du zéro. Les cuves ont ensuite été soigneusement essuyées avant leur introduction dans le spectrophotomètre. Après l'étalonnage avec la cuve blanche, la cuve contenant l'échantillon traité a été analysée et la

Chapitre III : Matériels et Méthodes

concentration en nitrites a été lue directement sur l'appareil en mg/L NO_2^- .

6) Dosage de l'Ammonium (NH_4^+)

✓ Principe

Le dosage de l'ammonium repose sur une méthode spectrophotométrique basée sur la formation d'un composé coloré bleu vert. Ce dernier résulte de la réaction de l'ion ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite, en présence de Nitroprussiate de sodium comme catalyseur. L'intensité de la coloration obtenue est proportionnelle à la concentration en ammonium(ISO 7150/1-1984 (F)).

✓ Matériel

- Verrerie de laboratoire (fioles jaugées, pipettes)
- balance analytique
- Spectrophotomètre

✓ Réactifs

- Réactif I : solution de salicylate (pour la formation du complexe coloré)
- Réactif II : solution d'hypochlorite en milieu alcalin
- Nitroprussiate de sodium (catalyseur de la réaction)
- Eau distillée (blanc et dilution)
- Échantillon à analyser

✓ Mode opératoire

Le dosage de l'ammonium a été réalisé selon la norme ISO 7150/1-1984. Pour cette analyse, 40 mL de l'échantillon à analyser ont été prélevés dans une fiole jaugée de 50 mL. Ensuite, 4 mL du réactif I puis 4 mL du réactif II ont été ajoutés successivement. Le volume a été complété avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, puis la solution a été homogénéisée. Après un temps de réaction de 1 h 30, l'apparition d'une coloration variant du bleu au vert, selon la concentration, a indiqué la présence d'ammonium dans l'échantillon (figure 23).

✓ Expression des résultats

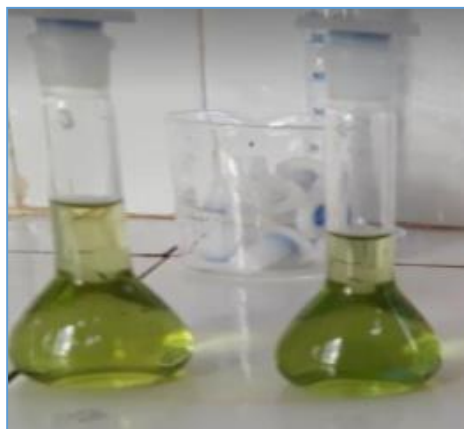


Figure 23 : Dosage de L'Ammonium NH_4^+ (Zerdoudi & Segouali, 2022).

7) Dosage de Fer

✓ Principe

Le dosage du fer ferreux repose sur la formation d'un complexe stable entre les ions fer (II) et la 1,10-phénanthroline. Ce complexe présente une coloration orangée à rougeâtre dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en Fe^{2+} dans l'échantillon. La réaction est optimale dans une plage de pH comprise entre 2,5 et 9. L'absorbance du complexe est mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde d'environ 510 nm. La relation entre la concentration en fer et l'absorbance est linéaire jusqu'à 5 mg/L. Le coefficient d'absorption molaire est estimé à $11 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (ISO 6332 et ISO 5667).

✓ Matériel

- Spectrophotomètre DR/2500
- Cuvettes rondes
- Pipette graduée
- Chronomètre
- Agitateur manuel

✓ Réactifs

- Réactif à la 1,10-phénanthroline
- Échantillon à analyser
- Eau distillée (blanc analytique)

Chapitre III : Matériels et Méthodes

✓ Mode opératoire

Le dosage du fer ferreux a été réalisé par la méthode à la 1,10-phénanthroline à l'aide du spectrophotomètre DR/2500. Pour cela, le programme 255 « Fer ferreux » a été sélectionné. Ensuite, 25 mL de l'échantillon ont été introduits dans une cuvette propre et sèche, puis un sachet de réactif spécifique a été ajouté. La cuvette a été fermée et agitée afin d'assurer l'homogénéisation du mélange, jusqu'à l'apparition d'une coloration orangée indiquant la présence de Fe^{2+} . Après un temps de réaction de 3 minutes, la cuvette a été soigneusement essuyée avant son introduction dans le spectrophotomètre. Le zéro a été effectué à l'aide du blanc si nécessaire, puis la concentration en fer ferreux a été lue directement sur l'appareil.

8) Détermination de la matière organique (MO)

✓ Principe

La détermination de la matière organique repose sur une méthode oxydimétrique basée sur la consommation de l'oxygène par les substances organiques présentes dans l'eau. Ces substances, d'origine animale ou végétale, sont oxydées par le permanganate de potassium (KMnO_4) en milieu acide et basique. La quantité de KMnO_4 consommée est proportionnelle à la teneur en matière organique (ISO 8467 NA 2064).

✓ Matériel

- Erlenmeyers de 250 mL
- Bécher (si nécessaire pour préparation des solutions)
- Pipettes graduées ou jaugées
- Burette de titrage
- Agitateur magnétique ou agitateur manuel
- Source de chauffage (plaque chauffante ou bain-marie)
- Thermomètre (pour contrôle de la température)

✓ Réactifs

- Eau distillée (blanc)
- Acide sulfurique (H_2SO_4) 2 mol/L
- Solution de permanganate de potassium (KMnO_4) 2 mmol/L
- Solution d'oxalate de sodium ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 5 mmol/L

Chapitre III : Matériels et Méthodes

✓ Mode opératoire

L'analyse de la matière organique a été réalisée par oxydation au permanganate de potassium. Deux erlenmeyers de 250 mL ont été préparés, l'un contenant 100 mL d'eau distillée (blanc) et l'autre 100 mL d'échantillon. À chacun, 20 mL d'acide sulfurique (H_2SO_4 , 2 mol/L) ont été ajoutés, puis les solutions ont été chauffées progressivement jusqu'à l'apparition des premières bulles sans atteindre une ébullition violente. Ensuite, 20 mL de solution de permanganate de potassium (KMnO_4 , 2 mmol/L) ont été incorporés, et la réaction a été maintenue sous chauffage et agitation pendant 10 minutes. Par la suite, 20 mL de solution d'oxalate de sodium ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, 5 mmol/L) ont été ajoutés, puis un titrage à chaud avec le KMnO_4 a été effectué jusqu'à l'apparition d'une coloration rose pâle persistante, correspondant au point d'équivalence. La température a été maintenue autour de 80 °C afin d'assurer une réaction complète (figure 24).



Figure 24 : Processus de dosage des matières organiques (Kourdi, 2021).

Chapitre IV:
Résultats et Discussion

Chapitre IV : Résultats et Discussions

I. Introduction

Dans cette partie, les résultats des analyses physicochimiques sont présentés et interprétés afin d'évaluer la qualité de l'eau ainsi que les performances de la station de traitement de Hammam Boughrara. Plusieurs paramètres physicochimiques ont été déterminés à partir d'échantillons d'eau brute et d'eau traitée, puis comparés aux normes de qualité de l'eau potable en vigueur afin de vérifier leur conformité. Les résultats obtenus ont également été confrontés aux travaux antérieurs de Kourdi et al. (2021), dans le but d'évaluer l'évolution de la qualité de l'eau au cours du temps et de mettre en évidence l'efficacité du procédé de traitement mis en œuvre au sein de la station.

II. Analyse comparative de la qualité physicochimique de l'eau brute et de l'eau traitée au niveau de la station de Hammam Boughrara

Le tableau 07 présente les résultats du suivi physicochimique de l'eau brute et de l'eau traitée au niveau de la station de traitement de Hammam Boughrara durant quatre campagnes de prélèvement réalisées entre le 25 mars et le 15 avril. Les paramètres analysés comprennent la température, le pH, les nitrites, les matières organiques, le fer, les nitrates, l'ammonium et les phosphates. La comparaison des valeurs mesurées avant et après traitement permet d'évaluer les performances de la station et de vérifier la conformité de l'eau produite aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

L'analyse des résultats montre que la station de traitement de Hammam Boughrara assure globalement une amélioration significative de la qualité physicochimique de l'eau.

La température de l'eau varie entre 14,8 °C et 23,1 °C dans l'eau brute et entre 14,5 °C et 19,5 °C dans l'eau traitée. Toutes les valeurs restent inférieures à la limite recommandée pour l'eau potable (≤ 25 °C), ce qui indique des conditions favorables à la stabilité physicochimique de l'eau.

Les valeurs du pH sont comprises entre 7,36 et 7,88 dans l'eau brute et entre 7,56 et 7,85 dans l'eau traitée. Ces valeurs se situent dans l'intervalle recommandé par l'OMS (6,5 à 9), traduisant une eau neutre à légèrement alcaline. La faible variation du pH après traitement témoigne d'une bonne maîtrise des procédés de potabilisation.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Les concentrations en nitrites diminuent de manière remarquable après traitement. Les rendements d'élimination atteignent environ 91 % lors des campagnes du 25 mars et du 1er avril. Toutes les concentrations mesurées dans l'eau traitée demeurent largement inférieures à la valeur guide de l'OMS (3 mg/L), indiquant une excellente qualité sanitaire vis-à-vis de ce paramètre.

Les matières organiques présentent également une réduction importante après traitement, avec des rendements variant entre 35 et 44 %. Cette diminution reflète l'efficacité des étapes de coagulation-floculation, de décantation et de filtration dans l'élimination de la charge organique présente dans l'eau brute.

Les teneurs en fer montrent une diminution significative au cours des deux premières campagnes, passant respectivement de 0,25 à 0,09 mg/L et de 0,26 à 0,11 mg/L. Cependant, lors des campagnes du 8 avril et du 15 avril, les concentrations en fer augmentent dans l'eau traitée pour atteindre respectivement 0,14 mg/L et 0,71 mg/L. La dernière valeur dépasse la limite recommandée par l'OMS (0,3 mg/L), ce qui pourrait être attribué à des phénomènes de corrosion des équipements ou à la remise en suspension de dépôts ferriques dans les installations.

Les concentrations en nitrates restent largement inférieures à la norme OMS de 50 mg/L. Une réduction importante est observée après traitement, notamment lors des deux premières campagnes. Les teneurs enregistrées dans l'eau traitée varient entre 0,015 et 12,5 mg/L, indiquant l'absence de risque sanitaire lié à ce paramètre.

L'ammonium présente une diminution notable après traitement avec des rendements supérieurs à 70 % pour l'ensemble des campagnes. Les concentrations observées dans l'eau traitée demeurent relativement faibles, traduisant une bonne élimination des formes réduites de l'azote.

Les phosphates affichent les meilleurs rendements d'abattement, compris entre 80 et 99%. Les concentrations dans l'eau traitée restent faibles et témoignent d'une élimination efficace de ce paramètre. Bien qu'aucune valeur guide OMS ne soit fixée pour les phosphates dans l'eau potable, leur réduction contribue à limiter les risques d'eutrophisation des milieux aquatiques.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Dans l'ensemble, les résultats démontrent la bonne performance de la station de traitement de Hammam Boughrara. La majorité des paramètres étudiés présentent des diminutions significatives après traitement et respectent les recommandations de l'OMS. Seule la concentration en fer enregistrée lors de la dernière campagne dépasse la valeur recommandée, ce qui justifie un contrôle régulier des installations afin de prévenir toute dégradation de la qualité de l'eau distribuée.

Tableau 07: Résultats du suivi physicochimique de l'eau brute et de l'eau traitée de la station de Hammam Boughrara.

Période	25 mars		1 avril		8 avril		15 avril		Norme (OMS)
Eau	Eau Brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée	Eau Brute	Eau traitée	Eau brute	Eau traitée	
Température T (°C)	14,8	15	14	14,5	15,5	16,5	23,1	19,5	≤ 25 °C
pH	7,68	7,64	7,36	7,56	7,88	7,85	7,64	7,73	6,5 – 9
Nitrites NO ₂ ⁻ (mg /L)	0,19 7	0,017	0,07 0	0,006	0,095	0,058	0,079	0,060	3 mg/L
Matière organiques (MO)	8,34	5,07	7,18	4,40	8,70	5,6	8,33	4,69	--
Fer (mg /L)	0,25	0,09	0,26	0,11	0,08	0,14	0,09	0,71	0,3 mg/L
Nitrates NO ₃ ⁻ (mg/L)	35,3	7,2	7,3	2,2	17	12,5	0,971	0,015	50 mg/L
L'Ammonium (NH ₄ ⁺) (mg/L)	0,53	0,14	0,44	0,05	0,49	0,06	1,09	0,20	--
Phosphates (PO ₄ ³⁻) (mg/L)	0,49	0,06	0,71	0,01	0, 278	0,055	0,577	0,025	--

Chapitre IV : Résultats et Discussions

III. Comparaison des caractéristiques physicochimiques de l'eau brute et de l'eau traitée du barrage de Hammam Boughrara avec les résultats rapportés par Kourdi (2021) et les Normes

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude portent sur la comparaison des caractéristiques physicochimiques de l'eau brute et de l'eau traitée du barrage de Hammam Boughrara prélevées le 24-02-2026. Ils sont analysés en les confrontant, d'une part, aux données rapportées par Kourdi (2021), afin d'évaluer la cohérence des tendances observées dans un contexte spatio-temporel différent, et d'autre part, aux normes de qualité de l'eau en vigueur, dans le but d'apprécier le degré de conformité de l'eau traitée aux exigences sanitaires. Cette approche comparative permet de mieux situer l'efficacité du traitement et la qualité globale de l'eau distribuée.

a. La température

Les résultats obtenus pour la température sont présentés dans le tableau 08 et représentés graphiquement dans la figure 25

Tableau 08: Synthèse comparative des températures de l'eau du barrage de Hammam Boughrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Température (°C)	Eau brute				Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	15,5				14,9			
Norme (Décret n°11-219 / OMS)	≤ 25 °C				≤ 25 °C			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020	
	19,7	19,1	15,63		20	19,27	15,7	
	21janv / 2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav/2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021
	12,73	14,65	14,33	17,2	13,83	15,38	15,1	17,7

Chapitre IV : Résultats et Discussions

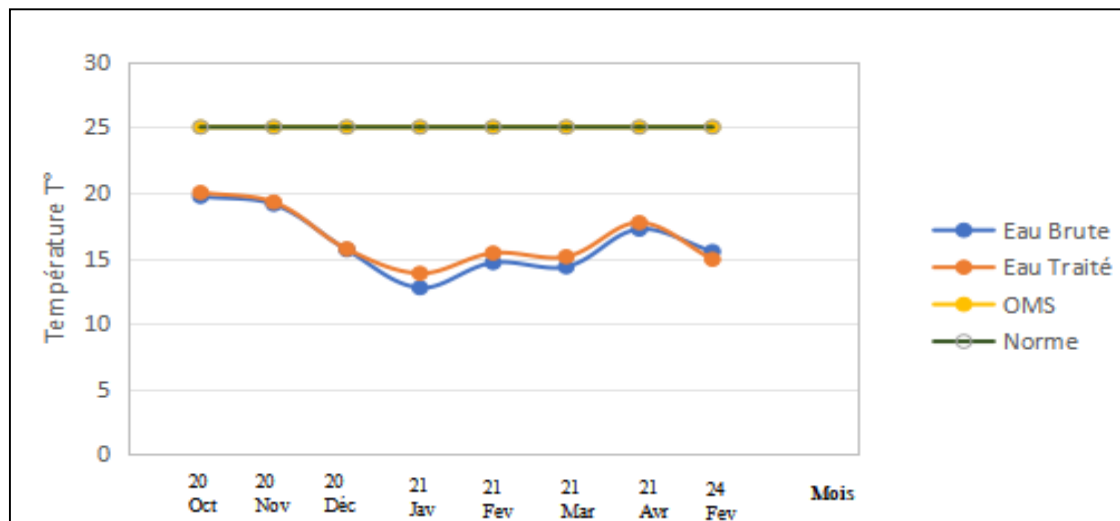


Figure 25 : Variation de la valeur température des eaux brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.

La température relevée au niveau de l'eau brute atteint 15,5 °C, tandis que celle mesurée sur l'eau traitée s'établit à 14,9 °C. Une diminution subtile mais notable de 0,6 °C est ainsi observée après le processus de traitement. Ce léger écart peut être attribué aux conditions de circulation et de stockage au sein des installations de traitement.

En mettant en perspective ces résultats avec l'étude de **Kourdi (2021)**, on constate que la température de l'eau traitée présente une certaine variabilité, oscillant entre une valeur minimale de 12,73 °C et une maximale de 19,7 °C, avec une moyenne située à 16,19 °C. Concernant l'eau brute, les relevés montrent une température minimale de 13,83 °C, un maximum de 20 °C. Ces données confirment la diversité thermique observée dans d'autres analyses similaires.

Selon les dispositions du **Décret exécutif n°11-219 du 12 juin 2011**, qui fixe les exigences en matière de qualité pour les eaux de surface et souterraines destinées à la consommation humaine, la température maximale tolérée pour les eaux brutes est fixée à 25 °C. Les résultats obtenus dans cette étude demeurent donc largement inférieurs à cette limite réglementaire, attestant ainsi de la conformité des échantillons aux Normes algériennes.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Par ailleurs, comme le précise l'**Organisation mondiale de la santé (OMS, 2022)**, une eau fraîche est généralement perçue comme plus acceptable pour les consommateurs qu'une eau plus chaude. La température influe également sur la perception des constituants inorganiques et de certains contaminants chimiques susceptibles d'altérer le goût. De plus, des températures élevées favorisent le développement des microorganismes, accentuant alors les problèmes liés aux saveurs désagréables, aux odeurs inhabituelles, à la détérioration des couleurs et à la corrosion.

Globalement, les températures relevées reflètent des conditions thermiques propices au maintien des propriétés physicochimiques optimales de l'eau. Ces données offrent un indicateur précieux pour évaluer l'état physique des ressources en eau analysées au niveau du barrage de Hammam Boughrara.

b. Le pH

Les résultats obtenus pour le pH sont présentés dans le tableau 09 et représentés graphiquement dans la figure 26.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau 09 : Synthèse comparative des pH de l'eau du barrage de Hammam Bouhrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

pH	Eau brute				Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	7,08				7,27			
Décrets exécutifs n°11-219 du 12 juin 2011	6,5 – 8,5				/			
Décrets exécutifs n°14-97 du 4 mars 2014	/				6,5 – 8,5			
l'Organisation mondiale de la santé (OMS)	/				6,5 – 9			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020	
	8,21	7,96	7,63		7,41	7,39	7,2	
	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021
	7,59	7,33	7,54	8,12	7,29	7,36	7,46	7,59

Chapitre IV : Résultats et Discussions

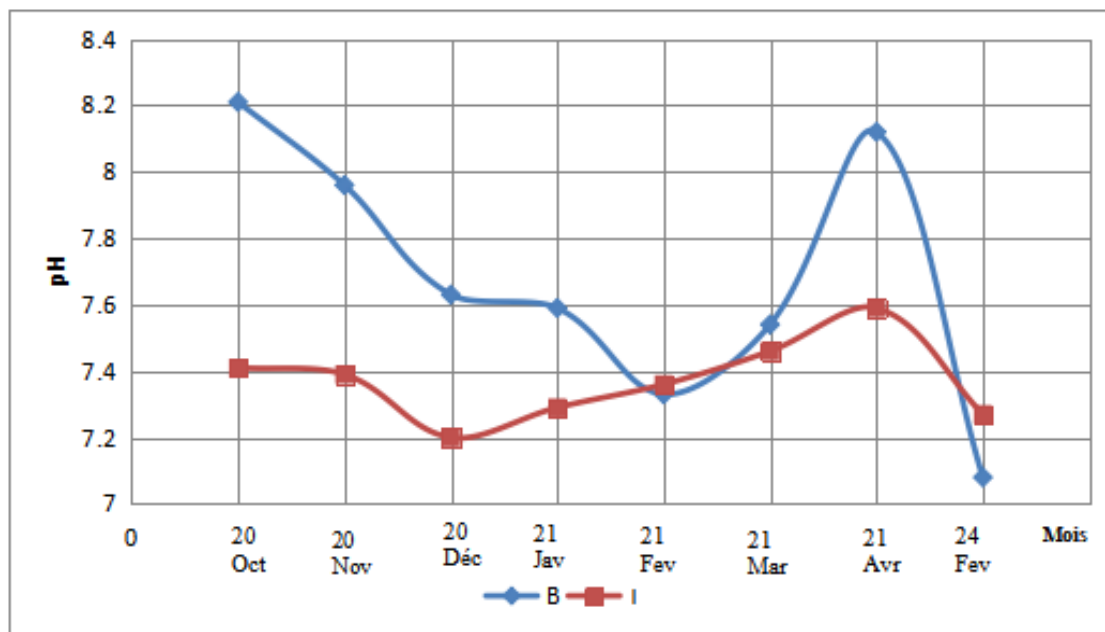


Figure 26 : Variation de la valeur du pH de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.

Comparée à une analyse précédente des eaux du même barrage effectuée par Kourdi en 2021, la présente étude révèle des variations légères dans les valeurs du pH. En effet, le pH mesuré oscille entre 7,08 pour l'eau brute et 7,27 pour l'eau traitée, tandis que les résultats de Kourdi (2021) montrent des valeurs comprises entre 7,33 et 8,21 pour l'eau brute et entre 7,20 et 7,59 pour l'eau traitée. Bien que les deux travaux portent sur la même source d'eau, ces écarts peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs : les variations saisonnières, les conditions hydrologiques propres au barrage, ainsi que les fluctuations dans la charge polluante et la qualité de l'eau brute au moment des prélèvements.

De plus, les procédés de traitement appliqués et leur performance opérationnelle jouent un rôle notable dans ces divergences. Désajustements réalisés lors des phases clés comme la coagulation, la filtration et la désinfection influencent directement les valeurs de pH. Malgré ces différences, les résultats des deux études demeurent globalement cohérents avec la nature de l'écosystème du barrage. Ils mettent en lumière la sensibilité de ce paramètre aux changements aussi bien environnementaux que technologiques.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Conformément aux exigences réglementaires algériennes édictées dans les **Décrets exécutifs n°11-219 du 12 juin 2011** et **n°14-97 du 4 mars 2014**, les valeurs admissibles de pH dans l'eau potable se situent entre 6,5 et 8,5. Les résultats obtenus dans cette nouvelle étude respectent cette norme, attestant de leur conformité avec les standards de qualité algériens.

Au-delà des obligations réglementaires locales, **l'Organisation mondiale de la santé (OMS)** rappelle dans son édition 2022 que, bien que le pH n'ait pas d'effet direct sur la santé humaine, il demeure un paramètre fondamental dans la gestion opérationnelle de la qualité de l'eau. Un contrôle rigoureux du pH est indispensable à tous les stades du traitement pour garantir une clarification optimale, une désinfection efficace et prévenir les risques de corrosion dans les canalisations du réseau de distribution. Selon l'OMS, une plage optimale de pH se situe généralement entre 6,5 et 9.

En résumé, les valeurs mesurées, proches de la neutralité chimique, reflètent un équilibre acido-basique stable. Cela favorise non seulement la bonne gestion des processus de traitement, mais aussi une excellente stabilité physico-chimique de l'eau. En dépit des légères variations relevées par rapport à l'étude précédente, ces résultats confirment une qualité de l'eau globalement stable avec des valeurs de pH conformes tant aux normes nationales qu'aux recommandations internationales en vigueur.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

c. Les nitrites NO₂⁻

Les résultats obtenus pour les nitrites sont présentés dans le tableau 10 et représentés graphiquement dans la figure 27.

Tableau 10 : Synthèse comparative des concentration en nitrites de l'eau du barrage de Hammam Bouhrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Nitrites NO ₂ ⁻	Eau brute				Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	0,16 mg/L				0,01 mg/L			
Décrets exécutifs n°14-97 du 4 mars 2014	/				0,02 mg/L			
l'Organisation mondiale de la santé (OMS,2022)	/				3 mg/L			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020	
	/	/	/		0,004	0,048	0,007	
	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021
	/	/	/	/	0,014	0,026	0,017	0,012

Chapitre IV : Résultats et Discussions

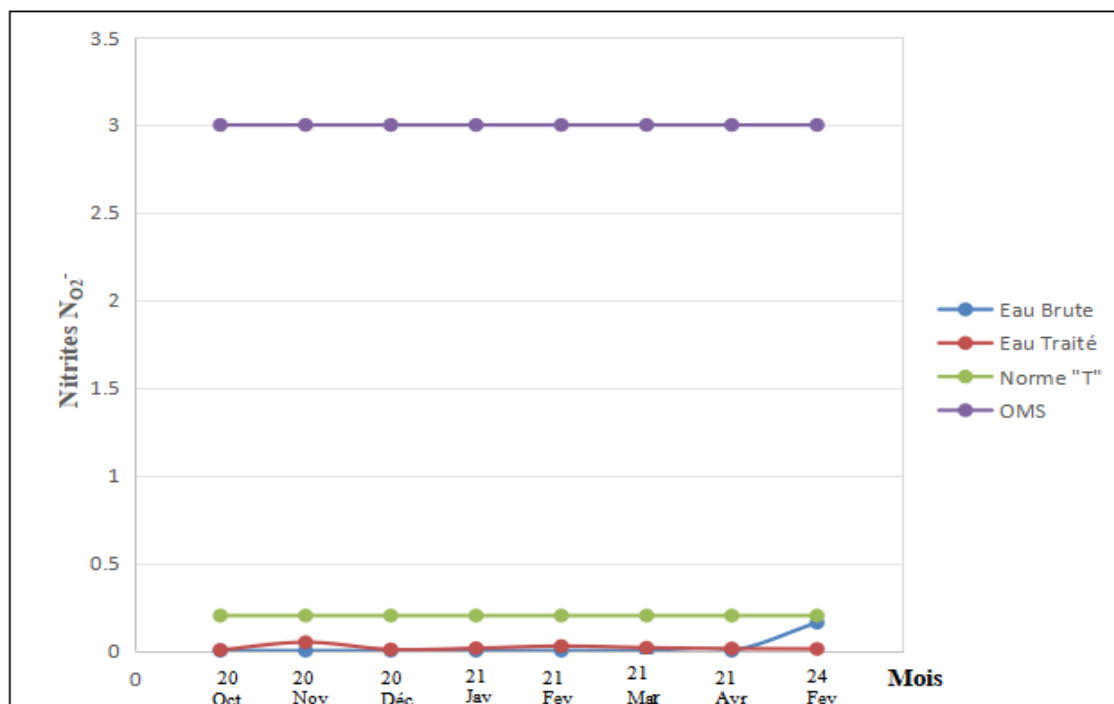


Figure N°27 : Variation de la valeur des nitrites de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.

La concentration de nitrites mesurée dans l'eau brute atteint 0,16 mg/L, tandis qu'elle descend à 0,01 mg/L après traitement, illustrant une réduction notable grâce au processus de purification mis en œuvre.

Comparée aux résultats issus d'une étude de référence, la teneur en nitrites de l'eau traitée (0,01 mg/L) s'avère inférieure aux valeurs maximales rapportées par Kourdi (2021), qui varient entre 0,004 mg/L et 0,048 mg/L dans l'eau traitée. La valeur obtenue se situe parmi les faibles concentrations observées dans cette étude de référence, ce qui témoigne d'une bonne efficacité du traitement et d'une faible présence des nitrites dans l'eau analysée.

Conformément au **Décret exécutif n°14-97 du 4 mars 2014**, qui délimite les normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine en Algérie, la concentration maximale autorisée en nitrites (NO_2^-) est fixée à 0,02 mg/L. Les analyses montrent que l'eau traitée respecte largement cette exigence avec une teneur de seulement 0,01mg/L, validant ainsi son adéquation aux normes nationales en vigueur.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Sur le plan international, les recommandations de l'**Organisation mondiale de la Santé (OMS)** indiquent une valeur guide pour les nitrites établie à 3 mg/L. Selon l'OMS, les niveaux typiques de nitrites dans l'eau sont souvent faibles, ne dépassant rarement quelques mg/L et bien inférieurs à ceux des nitrates. Dans le cadre de cette étude, les concentrations relevées restent considérablement en dessous des seuils définis par l'OMS et encore plus éloignées de la norme nationale, confirmant ainsi la parfaite qualité de l'eau après traitement.

La réduction marquée observée entre l'eau brute et l'eau purifiée met également en évidence l'efficacité des procédés appliqués pour éliminer les composés azotés. Ces résultats témoignent du succès des systèmes de purification et leur rôle primordial dans l'amélioration de la qualité de l'eau destinée à la consommation.

En conclusion, cette analyse révèle que l'eau traitée respecte pleinement les normes du Décret exécutif n°14-97 (2014) ainsi que les directives internationales de l'OMS. Elle est donc parfaitement conforme pour répondre aux exigences liées à la consommation humaine.

d. Les matières organiques (MO)

Les résultats obtenus pour les matières organiques sont présentés dans le tableau 11 et représentés graphiquement dans la figure 28.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau N°11: Synthèse comparative des concentrations en matière organique de l'eau du barrage de Hammam Boughrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Eau brute			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	Kourdi (2021)		
	21 Mar/2020	21 Avr/2021	
8,91 mg/L	3,6 mg/L	3,78 mg/L	
Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	Décrets exécutifs n°14-97 du 4 mars 2014	Kourdi (2021)	
		21 Mar/2020	21 Avr/2021
4,12 mg/L	3 mg/L	2,23 mg/L	1,68 mg/L

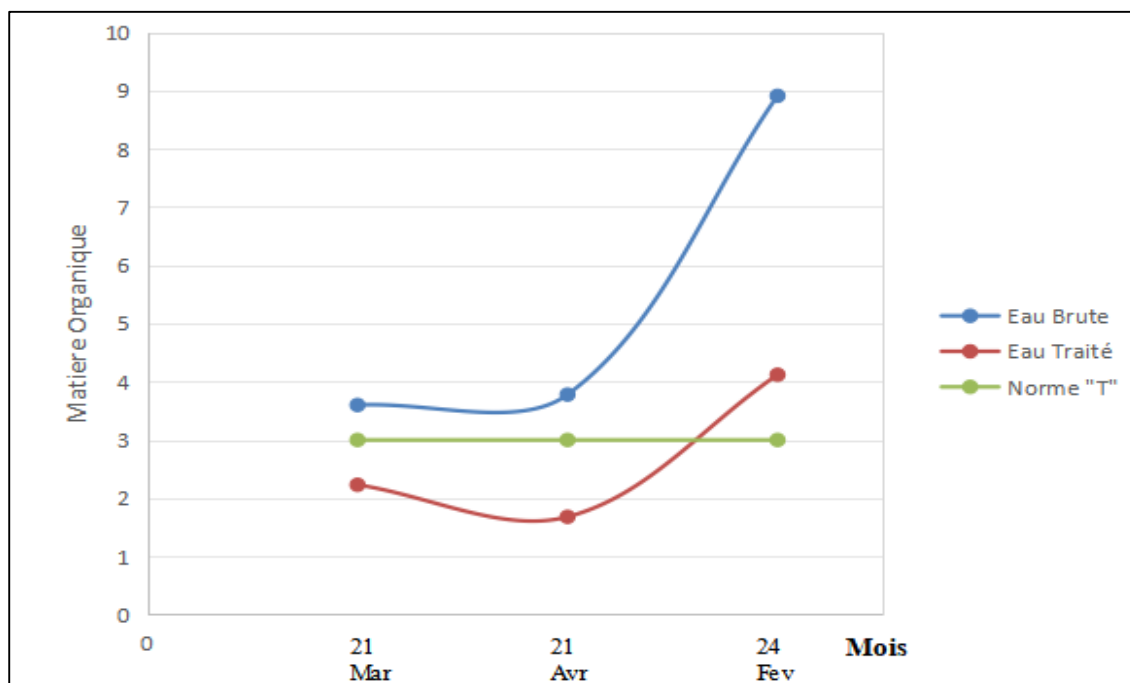


Figure 28 : Variation de la valeur des matières organiques de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Les résultats obtenus indiquent que la concentration en matières organiques (MO) dans l'eau brute atteint 8,91 mg/L, alors qu'elle est réduite à 4,12 mg/L après traitement, ce qui démontre une diminution significative suite à ce processus.

Comparée aux données d'une étude précédente réalisée sur les eaux du même barrage, où les concentrations en matières organiques variaient entre 3,6 et 3,78 mg/L dans l'eau brute, et entre 2,23 et 1,68 mg/L dans l'eau traitée, la présente étude révèle des valeurs considérablement plus élevées. Ces écarts peuvent être expliqués par des facteurs tels que les fluctuations saisonnières, les apports de matières organiques en provenance du bassin versant et des modifications des conditions hydrologiques et environnementales entourant le barrage au moment des prélèvements. Par ailleurs, la nature et la quantité de la matière organique contenue dans l'eau peuvent changer en fonction du ruissellement, des activités humaines environnantes, ainsi que du niveau de la retenue.

Conformément aux normes algériennes, telles que stipulées dans le Journal Officiel de la République Algérienne (**Décret exécutif n°14-96 du 4 mars 2014**), la limite acceptable de matières organiques dans l'eau destinée à la consommation humaine ne doit pas excéder 3 mg/L pour l'eau traitée. Bien qu'une réduction de la charge organique ait été constatée après traitement, la concentration finale mesurée dans l'eau traitée reste à 4,12 mg/L, excédant ainsi le seuil réglementaire. Cela souligne que le procédé de traitement utilisé n'a pas permis d'atteindre le niveau requis.

Selon l'**Organisation mondiale de la Santé (OMS)**, les substances organiques peuvent altérer l'acceptabilité de l'eau en affectant ses caractéristiques organoleptiques, notamment son aspect, son goût et son odeur. Une teneur élevée en composés organiques peut conduire à une perception négative de l'eau par les consommateurs, même si elle ne représente pas directement un danger pour la santé. Cette perception peut néanmoins altérer leur confiance envers la qualité de cette ressource.

Dans ce contexte, la réduction des matières organiques observée entre l'eau brute (8,91 mg/L) et l'eau traitée (4,12 mg/L) reflète une efficacité partielle du processus de traitement. Cependant, le dépassement persistant des seuils réglementaires, associé aux résultats moins élevés observés dans l'étude précédente, mettent évidence la nécessité d'améliorer les étapes de

Chapitre IV : Résultats et Discussions

traitement. Des optimisations supplémentaires sont indispensables pour renforcer l'élimination de la charge organique et ainsi assurer une meilleure conformité aux normes en vigueur tout en garantissant une qualité organoleptique optimale de l'eau distribuée.

e. Le fer (Fe)

Les résultats obtenus pour les teneurs en fer sont présentés dans le tableau 12 et représentés graphiquement dans la figure 29.

Tableau N°12: Synthèse comparative des concentrations en fer dans l'eau du barrage de Hammam Boughrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Fer	Eau brute				Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	0,28 mg/L				0,03 mg/L			
Décrets exécutifs n°11-219 du 12 juin 2011	1 mg/L				/			
Décrets exécutifs n°14-97 du 4 mars 2014	/				0,3 mg/L			
l'Organisation mondiale de la santé (OMS)	/				0,3 mg/L			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020	
	/	/	/		0,03	0,05	0,21	
	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021
	/	/	/	/	0,12	0,05	0,16	0, 02

Chapitre IV : Résultats et Discussions

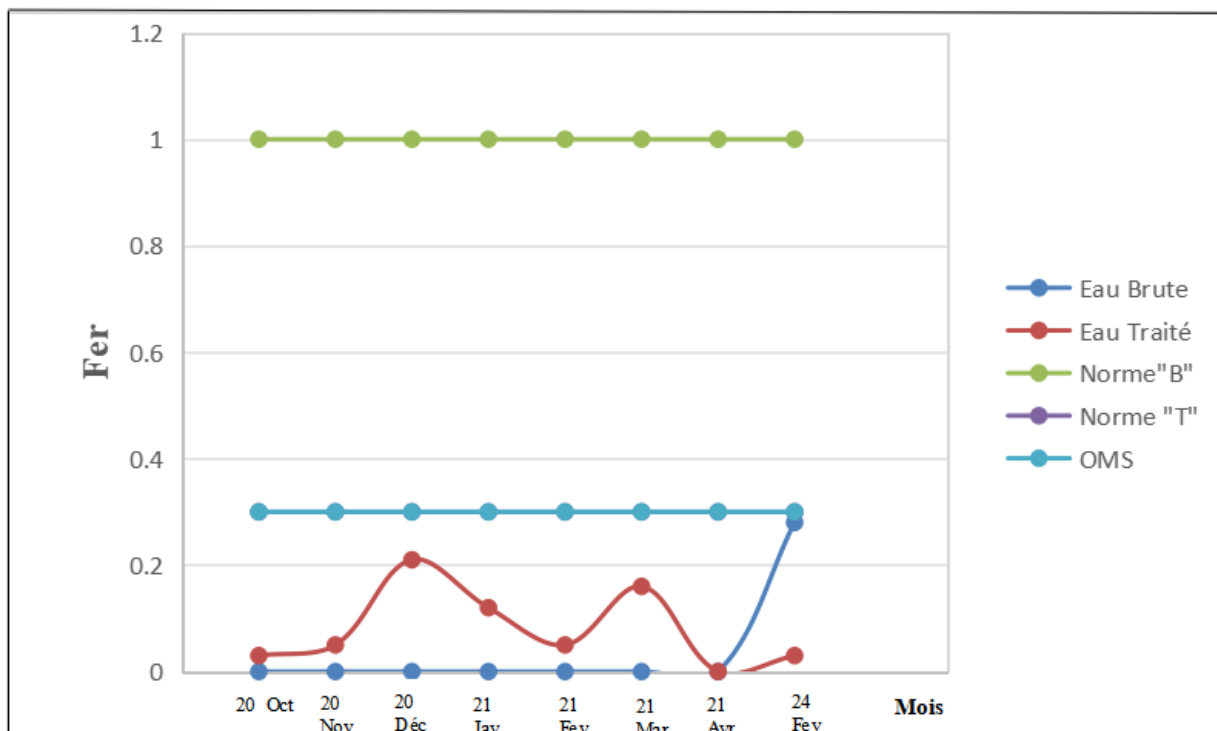


Figure N°29: Variations de la valeur Fer de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.

La concentration en fer mesurée dans l'eau brute est de 0,28 mg/L, tandis que celle de l'eau traitée atteint seulement 0,03 mg/L, ce qui témoigne d'une réduction significative après traitement.

Comparée à l'étude de référence, la teneur en fer total dans l'eau traitée montre une certaine variabilité, avec un pic maximal enregistré à 0,21 mg/L, une valeur minimale de 0,02 mg/L. Les résultats obtenus dans la présente étude (0,03 mg/L) sont ainsi inférieurs à la valeur maximale rapportée dans cette étude comparative.

Conformément au **Décret exécutif n°14-97 du 4 mars 2014**, tel qu'indiqué par le document officiel consulté, la concentration maximale admissible de fer (Fe) dans l'eau destinée à la consommation humaine est fixée à 0,3 mg/L. Les valeurs relevées dans cette étude respectent cette limite, tant pour l'eau brute que pour l'eau traitée, ce qui atteste de la conformité de l'eau analysée aux normes en vigueur.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

En outre, selon les recommandations de l'**Organisation mondiale de la Santé (OMS)**, le fer n'a pas de valeur guide basée sur des critères sanitaires, bien qu'il joue un rôle majeur dans l'appréciation sensorielle de l'eau. À des concentrations excédant environ 0,3 mg/L, il peut induire des problèmes organoleptiques tels qu'une coloration rougeâtre, un goût désagréable ou encore la formation de dépôts dans les canalisations.

La réduction du taux de fer constatée après traitement met en évidence l'efficacité des procédés d'oxydation, de coagulation et de filtration pour éliminer le fer dissous.

En résumé, les résultats obtenus révèlent une amélioration notable de la qualité de l'eau après son traitement, tant en matière de conformité aux réglementations qu'en termes d'acceptabilité organoleptique.

f. Les nitrates (NO_3^-)

Les résultats obtenus pour les concentrations en nitrates sont présentés dans le tableau 13 et représentés graphiquement dans la figure 30.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau 13 : Synthèse comparative des concentrations en nitrates dans l'eau du barrage de Hammam Bouhrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Nitrate	Eau brute				Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	11 mg/L				29,5 mg/L			
Résultat du prélèvement du 12-04-2026	13,9 mg/L				4,9 mg/L			
Décrets exécutifs n°11-219 du 12 juin 2011	50 mg/L				/			
Décrets exécutifs n°14-97 du 4 mars 2014	/				50 mg/L			
l'Organisation mondiale de la santé (OMS)	/				50 mg/L			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020	
	/	/	/		10,43	10,3	19,3	
	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021
	/	/	/	/	5,65	21,2	9,4	12,55

Chapitre IV : Résultats et Discussions

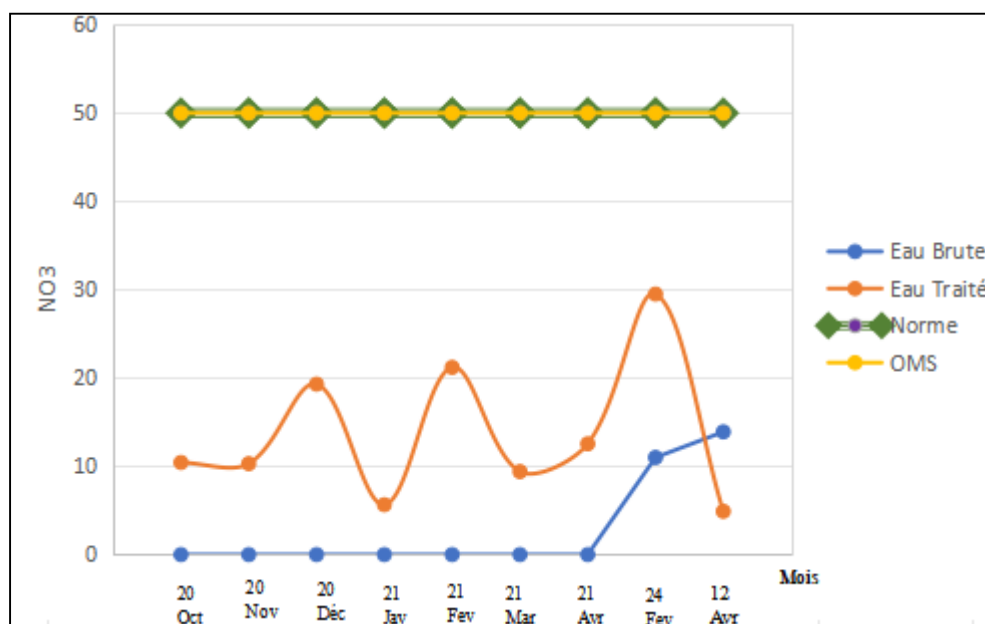


Figure 30: Variation de la valeur des nitrates de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Boughrara.

Les concentrations de nitrates (NO_3^-) relevées lors des deux campagnes de prélèvement révèlent des variations notables. Le 24 février, l'analyse montre une teneur de 11 mg/L dans l'eau brute et de 29,5 mg/L dans l'eau traitée. En revanche, le 12 avril, les concentrations dans l'eau brute atteignent 13,9 mg/L, tandis qu'elles diminuent significativement dans l'eau traitée avec une mesure de seulement 4,9 mg/L.

Si l'on compare ces données à l'étude de référence illustrée dans la figure, les concentrations en nitrates de l'eau traitée présentent des fluctuations mensuelles oscillant généralement entre 5,65 mg/L et 21,2 mg/L.

Selon les textes réglementaires nationaux le **décret exécutif n°11-219 du 12 juin 2011** concernant l'eau brute et le **décret exécutif n°14-96 du 4 mars 2014** pour l'eau traitée la limite de nitrates autorisée est également fixée à 50 mg/L. Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent donc que les échantillons analysés respectent ces normes, aussi bien pour l'eau brute que pour l'eau traitée.

En complément, il est important de rappeler que d'après les recommandations internationales **de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS)**, les nitrates sont un indicateur

Chapitre IV : Résultats et Discussions

essentiel pour évaluer la qualité de l'eau potable. Afin de préserver la santé publique, une concentration maximale de 50 mg/L est conseillée. Les données relevées dans cette étude sont conformes à cette directive.

Néanmoins, une analyse approfondie des résultats révèle une variabilité significative dans le comportement des nitrates après traitement. Lors de la première campagne du 24 février, on observe une surprenante augmentation des nitrates dans l'eau traitée (29,5 mg/L contre 11 mg/L dans l'eau brute). Cette anomalie pourrait indiquer un dysfonctionnement momentané des procédés de traitement ou des variations dans les conditions opérationnelles. À l'inverse, la campagne du 12 avril montre une amélioration notable avec une réduction conséquente, les nitrates passant de 13,9 mg/L à seulement 4,9 mg/L. Ces résultats traduisent ainsi une performance plus efficace du système de traitement.

Au terme de cette analyse, les concentrations en nitrates relevées respectent les standards imposés par les normes algériennes et les recommandations internationales de l'OMS. Toutefois, la variabilité observée entre les campagnes témoigne d'une performance instable du système de traitement. Cela met en lumière la nécessité d'un suivi régulier et minutieux des installations afin d'assurer une qualité constante et fiable de l'eau produit.

g. L'ammonium (NH_4^+)

Les résultats obtenus pour les concentrations en ion ammonium sont présentés dans le tableau 14 et représentés graphiquement dans la figure 31.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau 14: Synthèse comparative des concentrations en ion ammonium dans l'eau du barrage de Hammam Bouhrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Ammonium	Eau brute				Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	0,45 mg/L				0 mg/L			
Résultat du prélèvement du 12-04-2026	0,57 mg/L				0,03 mg/L			
Décrets exécutifs n°11-219 du 12 juin 2011	4 mg/L				/			
Décrets exécutifs n°14-97 du 4 mars 2014	/				0,5 mg/L			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020	
	1,87	1,38	2,12		0,05	0,03	0,03	
	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021
	3,19	0,93	0,39	0,29	0,04	0,06	0,03	0,01

Chapitre IV : Résultats et Discussions

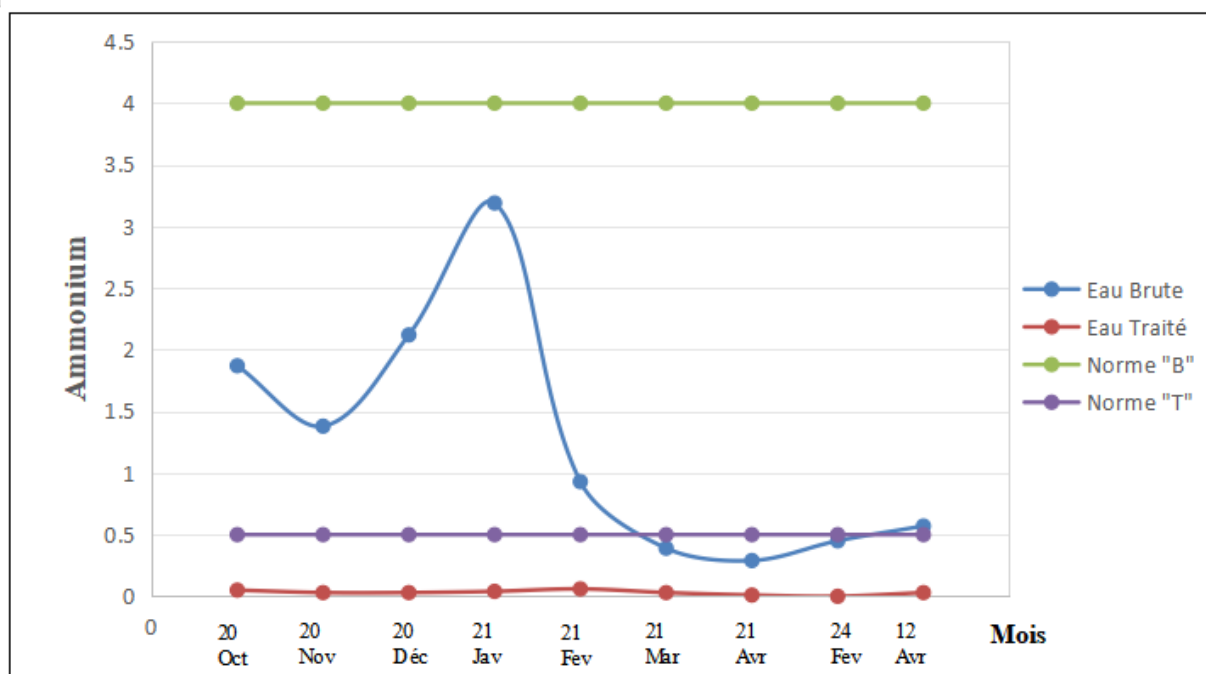


Figure 31 : Variation de la valeur de la teneur en ions ammonium de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Bouhrara.

Les résultats obtenus révèlent que les concentrations d'ammonium dans l'eau brute oscillent entre 0,45 mg/L (24 février) et 0,57 mg/L (12 avril), tandis que celles de l'eau traitée varient de 0 mg/L à 0,03 mg/L. Lorsque l'on compare ces données à l'étude de référence, on constate que les concentrations d'ammonium relevées dans l'eau traitée pour la présente étude (entre 0,00 et 0,03 mg/L) sont non seulement inférieures à la moyenne rapportée (0,04 mg/L), mais également bien situées dans l'intervalle observé (0,01 à 0,06 mg/L). Cela témoigne d'une certaine concordance entre les deux études. Concernant l'eau brute, les valeurs obtenues restent également inférieures.

En ce qui concerne les normes réglementaires, le **Décret exécutif n°11-219 du 12 juin 2011** (publié dans le Journal Officiel de la République Algérienne n°34 du 19 juin 2011) établit que la concentration maximale admissible en ammonium dans l'eau brute est de 4 mg/L. Quant au **Décret exécutif n°14-96 du 4 mars 2014** (Journal Officiel n°13 du 9 mars 2014), il fixe cette limite à 0,5 mg/L pour l'eau traitée. Les relevés effectués dans le cadre de cette étude indiquent des concentrations restant largement en dessous de ces seuils réglementaires, confirmant ainsi la conformité de l'eau analysée aux normes en vigueur.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

En outre, les résultats mettent en lumière une réduction significative des concentrations d'ammonium entre l'eau brute et l'eau traitée. Ce constat traduit clairement l'efficacité du processus de traitement appliqué.

h. Les phosphates (PO_4^{3-})

Les résultats obtenus pour les concentrations en ion ammonium sont présentés dans le tableau 15 et représentés graphiquement dans la figure 32.

Tableau 15: Synthèse comparative des concentrations en phosphates dans l'eau du barrage de Hammam Bouhrara et référence aux données de Kourdi (2021) et aux Normes.

Phosphate	Eau brute			Eau traitée			
Résultat du prélèvement du 24-02-2026	0,378 mg/L			0,018 mg/L			
Résultat du prélèvement du 12-04-2026	0,0187 mg/L			0,015 mg/L			
Kourdi (2021)	20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020		20oct /2020	20nov /2020	20dec /2020
	1,1	0,99	1,14		0,1	0,11	0,13
	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021	21avr /2021	21jav /2021	21fev /2021	21mar /2021
	1,22	1,26	1,14	1,14	0,11	0,11	0,12

Chapitre IV : Résultats et Discussions

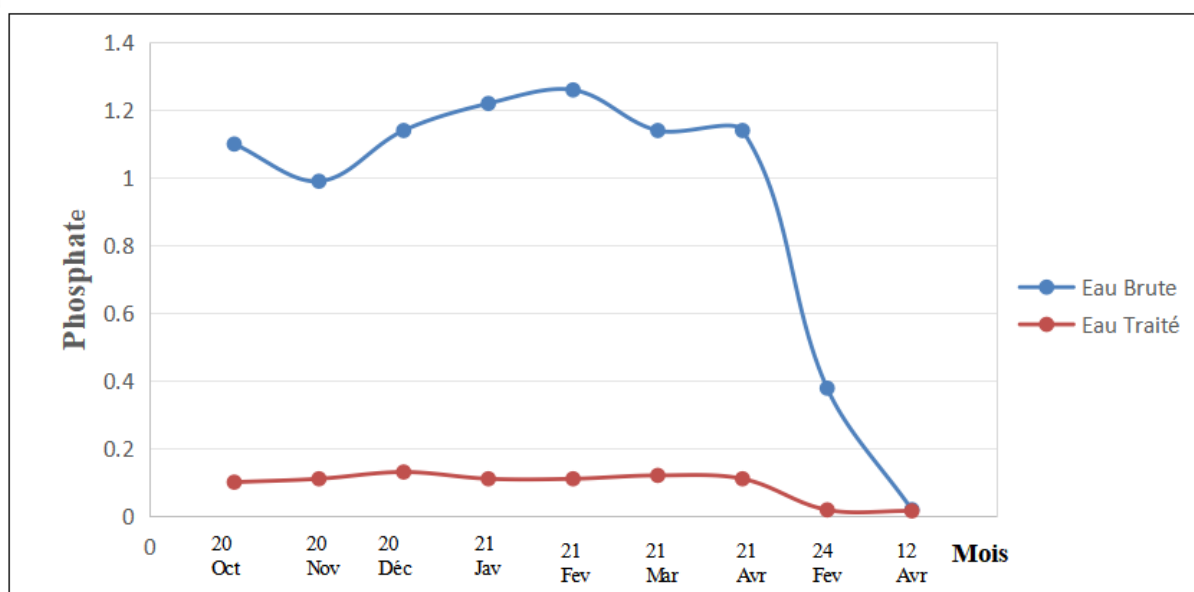


Figure 32: Variations de la valeur Phosphate de l'eau brute et traitée du barrage Hammam Bouhrara.

Les concentrations en phosphates (PO_4^{3-}) mesurées dans cette étude révèlent une diminution significative après traitement lors des deux campagnes de prélèvement. Le 24 février, la concentration passe de 0,378 mg/L dans l'eau brute à 0,018 mg/L dans l'eau traitée. De même, le 12 avril, elle diminue de 0,0187 mg/L dans l'eau brute à 0,015 mg/L dans l'eau traitée.

En comparant ces résultats aux données de l'étude de référence, il apparaît que la concentration en phosphates de l'eau brute observée ici (0,378 mg/L) est nettement inférieure à celle rapportée dans la référence (1,26 mg/L). Concernant l'eau traitée, les valeurs obtenues (entre 0,015 et 0,018 mg/L) restent bien en dessous de la plage indiquée dans l'étude de référence (0,10 à 0,13 mg/L), ce qui montre une réduction plus notable dans cette étude.

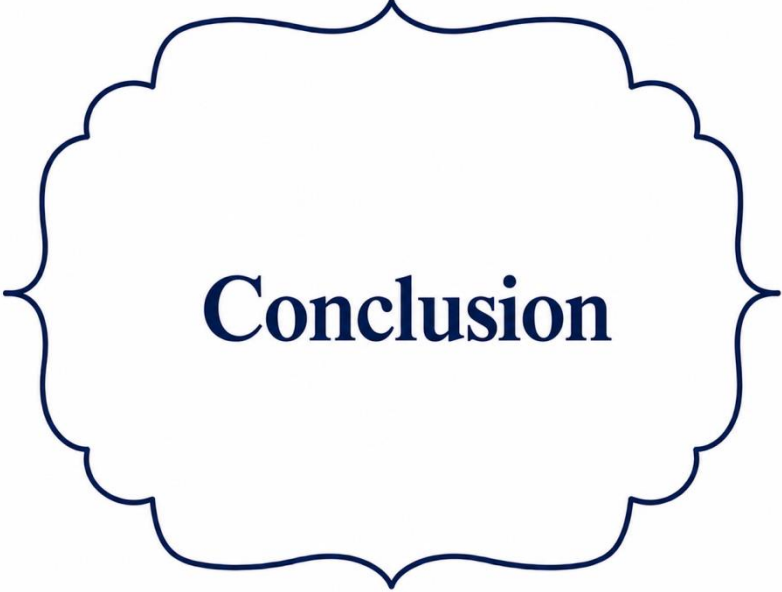
Le Journal Officiel de la République Algérienne (**Décret exécutif n°11-219 du 12 juin 2011**) inclut les phosphates parmi les paramètres surveillés pour les eaux brutes destinées à la consommation humaine. Cependant, aucune limite réglementaire stricte n'est imposée pour leur concentration dans l'eau potable.

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Par ailleurs, selon l'Environmental Protection Agency (**EPA, 1986**), les phosphates sont reconnus comme des nutriments essentiels au développement des organismes aquatiques. À des niveaux élevés, cependant, ils peuvent engendrer l'eutrophisation, un phénomène marqué par une prolifération excessive d'algues et de végétaux aquatiques. Cet excès peut induire des problèmes tels que des changements d'odeur et de goût, une augmentation de la turbidité ainsi que des perturbations des procédés de traitement. L'EPA précise également qu'il n'existe pas de norme nationale unique pour la régulation des phosphates dans les eaux naturelles, leur gestion étant adaptée aux conditions spécifiques des environnements aquatiques concernés.

Dans le cadre de cette étude, les teneurs en phosphates relevées se révèlent faibles tant dans l'eau brute que dans l'eau traitée, avec une diminution marquée après traitement. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité des procédés de coagulation et de filtration employés.

En conclusion, les phosphates affichent des concentrations réduites dans l'eau brute et des niveaux encore plus bas dans l'eau traitée grâce au processus de purification. Cette réduction témoigne d'une amélioration notable de la qualité physicochimique de l'eau et confirme le bon fonctionnement du système de traitement. Toutefois, les phosphates constituent principalement un indicateur environnemental lié au risque d'eutrophisation et non un paramètre sanitaire ayant une incidence directe sur la santé humaine.



Conclusion

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a porté sur l'évaluation de la qualité physicochimique des eaux du barrage de Hammam Boughrara, une ressource hydrique majeure dans l'ouest de l'Algérie. L'objectif principal visait à analyser l'état des eaux brutes et à mesurer l'efficacité des procédés appliqués à la station de potabilisation.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence une qualité physicochimique globalement satisfaisante des eaux analysées. Les paramètres de base tels que la température et le pH présentent des valeurs conformes aux normes nationales et internationales, traduisant une stabilité favorable aux différents usages de l'eau.

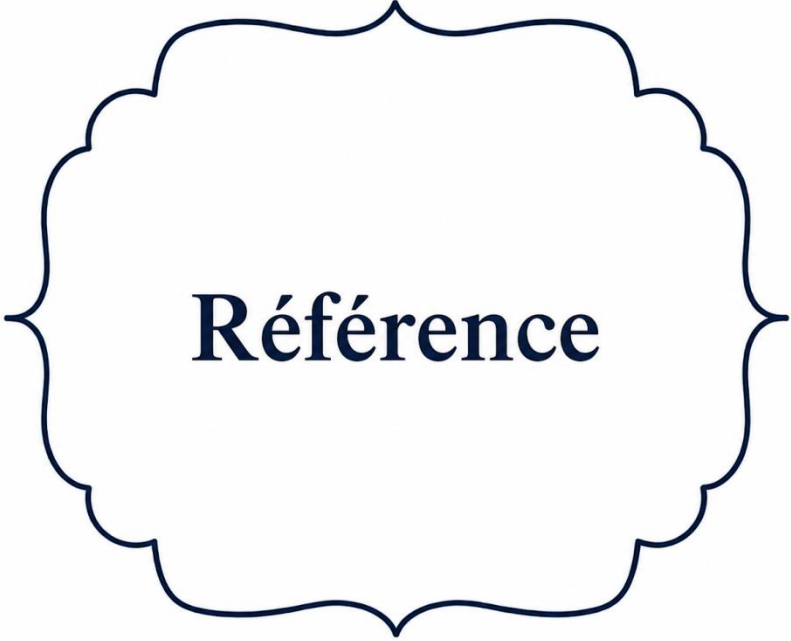
Il a également été démontré que les étapes de traitement permettent une réduction significative de plusieurs indicateurs de pollution. Les teneurs en nitrites, ammonium, phosphates et fer diminuent nettement après traitement, attestant de l'efficacité du processus de potabilisation. Par ailleurs, les concentrations en nitrates restent en dessous des seuils réglementaires malgré certaines variations enregistrées au cours des campagnes d'échantillonnage.

Toutefois, certains aspects nécessitent une attention particulière. Les fluctuations observées sur certains paramètres, notamment les nitrates, mettent en lumière l'influence des conditions environnementales et opérationnelles sur les performances du système de traitement. De plus, les niveaux détectés de matières organiques dans l'eau traitée restent légèrement supérieurs aux recommandations, appelant ainsi à des ajustements visant à perfectionner la qualité finale de l'eau distribuée.

Au terme de ce travail, il apparaît que le barrage de Hammam Boughrara constitue une ressource hydrique de bonne qualité et que la station de traitement remplit efficacement son rôle de potabilisation. Toutefois, la préservation durable de cette ressource nécessite le maintien d'un programme rigoureux de surveillance physicochimique, le renforcement du contrôle des sources potentielles de pollution au niveau du bassin versant et l'amélioration continue des procédés de traitement.

Conclusion générale

Les perspectives de ce travail pourraient être orientées vers l'élargissement des analyses aux paramètres microbiologiques, aux métaux lourds ainsi qu'à l'étude saisonnière de la qualité des eaux afin d'obtenir une vision plus complète du fonctionnement écologique et sanitaire du barrage.



Référence

Référence

- Abu Shmeis, R. M. (2018). Water chemistry and microbiology. In *Comprehensive Analytical Chemistry* (Vol. 81, pp. 1–56). Elsevier
- Adjim, H., & Djedid, A. (2018). Drought and water mobilization in semi-arid zone: The example of Hammam Boughrara dam. *Journal of Water and Land Development*.
 - Babuji, P., Thirumalaisamy, S., Duraisamy, K., & Periyasamy, G. (2023). Human health risks due to exposure to water pollution: A review. *Water*, 15(14), 2532. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/14/2532>
 - Bahloul, A. C. (2013). *Étude de la variabilité climatique à travers les séries pluviométriques : Exemple du bassin versant du barrage Hammam Boughrara*. Mémoire de master en hydraulique, option eau, sol et aménagement, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.
 - Bakalowicz, M. (1999). Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée, Corse.
 - Benadda, L. (2022). Modélisation du comportement de la pollution hydrique à travers le bassin versant de l'Oued Mouillah et dans la cuvette du Barrage de Hammam Boughrara. Université de Tlemcen. .
 - Benchaïba, L. (2023). *Exploration des méthodes de prévision des apports liquides dans les barrages de l'Algérie*. Thèse de doctorat en sciences, spécialité hydraulique, Université Badji Mokhtar d'Annaba.
 - Bengouga, K. (2010). Contribution à l'étude du rôle de la végétation dans l'épuration des eaux usées dans les régions arides (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra).
 - Benhamrouche, A. (2020, March). Pedagogical print: Environment [Image]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Leau-circule-sans-cesse-transportant-et-repandant-autour-de-la-planete-les-polluants_fig7_339713416
 - Benkaddour, B. (2018). Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Chélif (Algérie). Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
 - Bensaada, R., & Lesgaa, M. (2024). Water contamination of the dam of Hammam Boughrara in the North-West of Algeria, as sustainable development falters. *Cadernos de Geografia*, 49, 19–31.

Référence

- Benslimane, M. (2022). *Rapport de stage : Les ressources d'eau de la région de Tlemcen* [Présentation]. Slideshare. <https://fr.slideshare.net/slideshow/rapport-de-stage-de-terrainpdf/261477826>
- Bentrar, A. (2023). *Étude des performances de fonctionnement d'une station de traitement des eaux de surface destinée à l'AEP : Cas de la station de Boughrara* (Mémoire de Master en Hydraulique Urbaine). Faculté de Technologie, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- Bitton, G. (2005). *Wastewater microbiology* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Boehrer, B., & Schultze, M. (2008). Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46(2), RG2005.
- BOUALEM, R. (2009). Contribution à l'étude de la qualité des eaux des barrages. *Article de recherche*, 20–33.
- Bouzid Lagha, S., & Djelita, B. (2012). Study of the eutrophication phenomenon in the Hammam Boughrara Reservoir (Wilaya of Tlemcen, Algeria). *Hydrological Sciences Journal*, 57(1), 186–201.
- Bouzid-Laghaa, S., & Djelita, B. (2011). Study of eutrophication in the Hammam Boughrara Reservoir. *Hydrological Sciences Journal*.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, user's manual*. CCME.
- Chapman, D. (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed.). UNESCO, WHO & UNEP.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- CIE. (2013). *Gestion de l'eau et cycle hydrologique*. Commission Internationale de l'Eau.
- CMI – Commission Mixte Internationale. (2004). *Les lacs et la gestion de l'eau*. <https://www.ijc.org/fr/les-grands-lacs>
- Cochin, C., & Moureaux, C. (2022, 2 mai). Deux mois et demi après le drame, les recherches des victimes du barrage de Yaté se poursuivent. La 1ère – Franceinfo Nouvelle-Calédonie. Consulté le 20 mars 2026. <https://la1ere.franceinfo.fr/nouvellecaledonie/province-sud/yate/deux-mois-et-demi-apres-le-drame-les-recherches-des-victimes-du-barrage-de-yate-se-poursuivent-1279056.html>

Référence

- Commissariat général au développement durable. (2026, 15 janvier). La pollution de l'eau par les pesticides. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/sante/la-pollution-de-l-eau-douce-ressources/article/la-pollution-de-l-eau-par-les-pesticides>
- DAJOZ, R. (2006). *Précis d'écologie* (6e éd.). Dunod, Paris.
- Day, J. W., Crump, B. C., Kemp, W. M., & Yáñez-Arancibia, A. (2012). *Estuarine ecology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Desjardins, R. (1997). *Le traitement des eaux* (2e éd.). Montréal. <https://www.scribd.com/document/468490751/Traitement-Des-Eaux-Raymond-Desjardins-pdf>
- Durand, J. M., et al. (1999). *Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*. Cemagref Éditions.
- European Union. (2020). *Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast)*. *Official Journal of the European Union*, L 435, 1–62. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32020L2184>
- Georgi. (2011, November 6). *Système d'approvisionnement en eau potable*. Science Pasteur Wiki. <http://sciencepasteur.pbworks.com/w/page/47741469/Syst%C3%A8me%20d%27approvisionnement%20en%20eau%20potable>
- Guiraud, P. (2016, novembre). Les barrages. Infociments. <https://www.infociments.fr/ouvrages-au-service-des-energies-renouvelables/les-barrages>
- Hem, J. D. (1992). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.
- Hichem. (2014, novembre 4). *Hammam Boughrara, le barrage* [Photographie]. Vitamedz. Publié par patrimoinealgerie <https://www.vitamedz.com/fr/Tlemcen/hammam-boughrara-le-barrage-194498-Photos-13-14539-1.html>
- Hichem. (2014, novembre 4). *Oued Mouillah* [Photographie]. Vitamedz. Publié par patrimoinealgerie <https://www.vitamedz.com/fr/Algerie/frontiere-algerie-maroc-oued-mouileh-avec-208775-Photos-0-0-1.html>
- Humbert, J.,—& Najjar, G. (1992). *Hydrologie de surface*. Paris: Éditions Eyrolles.

Référence

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- **ISO / NA 1657** — Dosage des nitrites — Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire.
- **ISO / NA 2064** — Qualité de l'eau — Détermination de l'oxydabilité au permanganate (KMnO_4).
- **ISO 5667** — Qualité de l'eau — Échantillonnage. Organisation internationale de normalisation.
- **ISO 6332** — Qualité de l'eau — Dosage du fer — Méthode spectrométrique à la 1,10-phénanthroline. Organisation internationale de normalisation.
- **ISO 6878** — Dosage des phosphates (PO_4^{3-}) — Méthode spectrométrique. Organisation internationale de normalisation.
- Journal Officiel de la République Algérienne. (2011). **Décret exécutif n°11-219 du 12 juin 2011 fixant les objectifs de qualité des eaux superficielles et souterraines destinées à l'alimentation en eau des populations**. *Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire*, n°34.
- Journal Officiel de la République Algérienne. (2014). **Décret exécutif n°14-97 du 4 mars 2014 portant réglementation relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine**. *Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire*, n°13.
- Kettab, A (1992). Docteur d'état en hydraulique, maître de conférence à l'E.N.P, Traitement des eaux (les eaux potables).
- Kourdi, H. (2021). Étude de la qualité des eaux de la station de traitement du barrage Hammam Boughrara (Mémoire de Master, Université de Maghnia, Algérie).
- Labidi, Y., & Lakrid, H. (2017). Étude dynamique et stabilité d'un barrage de Koudiat Medouar (Batna) (Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar – Annaba).
- Li, H., Han, B., & Wang, Y. (2022). Effects of long-term climate change on thermal stratification in lakes and reservoirs. *Water*, 14(20), 3279.
- Loperfido, J. V. (2014). Surface water quality in streams and rivers: Scaling and climate change. In *Comprehensive Water Quality and Purification* (Vol. 4, pp. 87–105).
- Madouri, S. A., & Yagoub, Z. (2020). Étude des coagulants naturels pour le traitement des eaux de surface : Cas des eaux du barrage de Boughrara (Mémoire de Master en

Référence

- Hydraulique Urbaine). Institut des Sciences et de la Technologie, Centre Universitaire de Maghnia, Algérie.
- Maheu, A. (2015). Développement d'outils de caractérisation et de modélisation du régime thermique des rivières naturelles et régulées (Thèse de doctorat, INRS).
 - MANUEL STATION (2006). SPECIFICATION TECHNIQUE. Station de traitement d'eau de la ville de Maghnia –TRANCHE 1- LINDE-KCA-DRESDEN GMBH. TECHNIQUE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'EAU. AVRIL 2005
 - Matilainen, A., & Sillanpää, M. (2010). Removal of natural organic matter in drinking water treatment processes. *Environmental International*, 36(5), 859–875.
 - Meybeck, M. (1998). *Manuel de l'eau douce: qualité et gestion*. Paris: PUF.
 - Meybeck, M., Chapman, D. V., & Helmer, R. (1990). *Global freshwater quality: A first assessment*. WHO & UNEP.
 - Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (2016, 7 décembre; mise à jour 2025). Ouvrages hydrauliques, barrages et digues. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/ouvrages-hydrauliques-barrages-digues>
 - NISBET, M., & VERNEAUX, J. (1970). Composantes chimiques des eaux courantes : Discussion et proposition de classes d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*, 6(2), 161–190.
 - Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32, 333–365.
 - Pierre-Alain, R. (2003). *Limnologie générale*. <https://books.google.com/books?id=Yw6qAAAACAAJ>
 - Renard, F. (2007). *Cours d'hydrogéologie*. Université de Biskra.
 - Richardson, S. D., & Ternes, T. A. (2014). Water analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, 86(6), 2813–2848.
 - ROBIER, C. (1996). Température et solubilité de l'oxygène. *Hydrobiologie Pratique*, 3.
 - Rocheservière. (2022, April 7). *Le cycle domestique de l'eau à Rocheservière*. <https://www.rocheserviere.fr/actualite/le-cycle-domestique-de-leau-a-rocheserviere/>
 - RODIER, J. (2005). *L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* (8e éd.). Dunod, Paris.

Référence

- Sawadogo, B. G. F. (Enseignant). (2025, 27 août). Module: Dimensionnement et installation des systèmes d'irrigation [Document en ligne]. Doctorant: UJKZ/Agro-Ecophysiologie. Consulté le 20 mars 2026. <https://fr.scribd.com/document/907016432/Cours-Dimensionnement-Et-Installation-Des-Systemes>
- SCHUDDEBOOM, J. (1993). *Nitrates et nitrites dans les denrées alimentaires*. Conseil de l'Europe, Strasbourg.
- SDEA. (2017). Rapport sur la qualité des eaux souterraines.
- TARDAT-HENRY, M. (1992). *Chimie des eaux* (2e éd., pp. 213–215). Éditions du Griffon d'Argile.
- Tonye, E. (2015). Cycle de la pollution atmosphérique [Figure]. ResearchGate.
- U.S. Geological Survey. (2018–2019). Water Science School articles.
- United States Environmental Protection Agency. (1976). *Quality criteria for water* (PB-263 943). U.S. Government Printing Office. https://www3.epa.gov/npdes/nutrienttraining/interpretingnutrientcriteria/story_content/external_files/Quality-Criteria-for-Water1986_TP-Discussion.pdf
- Wilson, C. (2019). Water clarity: Turbidity, suspended solids, and water color. University of Florida IFAS Extension.
- Winton, R. S., Calamita, E., & Wehrli, B. (2019). Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences*, 16, 1657–1671.
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). WHO.
- **World Health Organization. (2022).** *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. Geneva: WHO. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/69c17edd-ee26-425b-9d34-33799377e886/content>
- YAZLI, S. (2020). Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage Kaddara. Faculté des Sciences, Département de Biologie, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès.