



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج
Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et Technologie
قسم هندسة المحيط
Département de Génie de l'environnement



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences & Technologie

Filière : Génie de l'environnement

Spécialité : Gestion des changements environnementaux en Méditerranée

Intitulé :

Qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de
consommation de Bordj Bou Arreridj
(Bordj Bou Arreridj et Bordj Zemoura)

Présenté par :

BENFREDJ Taqwa & BENGUEZZOU Ouarda

Soutenu le _/06/2026, Devant le Jury :

	Nom & Prénom.	Grade	Affiliation/institution
Président :	Mme. KEBIR Hadda	MCA	Université de B.B.A.
Encadrant :	Mme. BAAZIZ Naima	MCB	Université de B.B.A.
Co-Encadrante:	Mme. BENKARA Mohammed Nadjima	MCA	Université de B.B.A.
Examineur:	Mme. MIHOUBI Karima	MCB	Université de B.B.A.

Année Universitaire 2025/2026

Dédicace

Au nom de Dieu, le Clément, le Miséricordieux

Louange à Dieu, par la grâce duquel les bonnes actions s'accomplissent, et qui nous a accordé le succès et la sagesse nécessaires pour mener à bien cette œuvre.

Je dédie ce modeste effort à ceux qui ont semé en moi les graines de la connaissance et de l'espoir :

À mes chers parents,

Quand je pense au sens du don sans limites, je pense à vous. Ma chère mère, mon cœur déborde de gratitude pour ta chaleur et ta tendresse. Mon cher père, ton héritage de patience et de sagesse est le guide que je suis au quotidien.

À mes frères et sœurs, vous êtes la force sur laquelle je m'appuie et les amis que le destin a choisis pour partager ma vie. À chacun d'entre vous : merci d'être une source intarissable de soutien et d'amour.

À mes chers amis, vous qui avez été un pilier dans les bons comme dans les mauvais moments, transformant les instants de fatigue en moments de repos, et les succès en une joie toujours plus grande. Vous êtes la lumière de mon chemin.

À tous ceux qui m'ont enseigné ne serait-ce qu'une lettre, m'ont guidé vers le bien ou ont semé une parole d'encouragement dans mon cœur, j'offre ma plus profonde gratitude et mes prières les plus sincères.

Enfin, à mon âme, qui n'a jamais perdu espoir, et à mon cœur, qui a appris à battre avec optimisme malgré toutes les épreuves. Ce travail n'est qu'une étape sur un long chemin. Je prie Dieu pour qu'il soit agréé uniquement pour Sa gloire.

BENFREDJ Taqwa

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتحقق الغايات ، الذي منّ علينا بنعمة العقل والعلم، والصلاة والسلام على معلم البشرية الهادي، سيدنا محمد وعلى آله وصحبه، الذي قال: مَنْ سَلَكَ طَرِيقًا يَلْتَمِسُ فِيهِ عِلْمًا، سَهَّلَ اللَّهُ لَهُ طَرِيقًا إِلَى الْجَنَّةِ

اليوم، وأنا أحملُ بين يديّ ثمرة سنواتٍ من الجهد، أدركُ يقيناً أنها ليست حصيلة سعيٍ فردي، بل هي محصلة عطاءٍ متدفق: ونفائسُ قلوبٍ سخية. وأتقدم بالشكر الجزيل وأبوح بالامتنان العميق

إلى منارتي الأولى وسندي الأقوى

إلى من كان لي جناحاً أحلق ، وحصناً ألوذُ به من كل ريح عاصفة، أبي... كلُّ كلمات الشكر لن توفيك حقك، فكل خطوةٍ من خطواتي كانت على دربٍ رصفتُهُ بتعبك وحبك، حفظك الله لي ذخراً وسنداً

إلى قلبٍ يتسع للكون كله

إلى التي صاغت وجودي من دم قلبها، وغذّت روحي بنبض صلواتها، أُمي الحنونة، يا حبيبتي يا من كانت ابتسامتها وقودي، ودعاؤها سرّاً ناجحي، بارك الله فيك وجعلني من البررة بكِ

إلى أمنياتي التي تحققت على أرض الواقع

إلى إخوتي وأخواتي، رفقاء الدرب وحماة السر، مشاركة واحدة منكم كانت كفيلة بأن تبدد همّاً، وصمت واحد كان كافياً. ليشعرني بالأمان، فلکم من قلبي أطيب الدعوات

إلى بناء العقول والضمائر

إلى أساتذتي الأفاضل، رواد العلم الحقيقيين، شكراً لكل كلمة علمتني التواضع، وكل نظرة أعطتني الثقة، وكل حرف كان مفتاحاً لباب من أبواب المعرفة، فأنتم مصابيح هذا الطريق

إلى من جعلوا رحلة السفر جميلة

إلى الأصدقاء والزملاء الأوفياء، شكراً لجمال حضوركم، ولصدق نصائحكم، ولكل لحظة تشجيع أشرقت كالشمس في أيام التعب، دمت لي فرحاً وذكرى طيبة

وأخيراً... أرفع كفيّ بالدعاء لكل من مدّ لي يد العون ولو بكلمة، أو دفع عني همّاً ولو ببسمة، فجزاكم الله عني خير الجزاء . وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين، الذي بيده ملكوت كل شيء وإليه ترجع الأمور

وردة

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadrante, Dr BAAZIZ Naïma, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et ses encouragements constants tout au long de cette recherche.

Mes vifs remerciements s'adressent également à ma co-encadrante, Dr BENKARA Mohammed Nadjima, pour son aide précieuse, sa rigueur scientifique et le temps qu'elle m'a consacré.

J'adresse mes vifs remerciements à la Présidente du jury, Dr KEBIR Hadda, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de présider cette soutenance, ainsi qu'à l'examinatrice, Dr MIHOUBI Karima, pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement l'ingénieur, Mr REBIEI Khalil, pour son assistance technique, sa collaboration et son soutien durant la phase expérimentale.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à l'ensemble de mes enseignants pour le savoir qu'ils m'ont transmis, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Liste d'abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction 1

Chapitre I : Généralités Sur L'eau

<u>1.</u>	Définition de l'eau	4
<u>2.</u>	Propriétés de l'eau	4
2.1.	Propriétés physiques	4
2.2.	Propriétés chimiques	5
2.3.	Propriétés biologiques	5
<u>3.</u>	Les sources naturelles de l'eau	5
3.1.	Les eaux de pluie	5
3.2.	Les eaux de mers et océans	5
3.3.	Les eaux souterraines	5
3.4.	Les eaux de surface	6
<u>4.</u>	Pollution des eaux	7
4.1.	Type de pollution	7
4.1.1.	Pollution physique	7
4.1.2.	Pollution chimique.....	8
4.1.3.	Pollution biologique.....	8
4.2.	Origine de la pollution.....	8
4.2.1.	Les unités industrielles	8
4.2.2.	L'agriculture	8
4.2.3.	Pollution d'origine naturelle.....	8
4.2.4.	Les décharges publiques	8
<u>5.</u>	Les paramètres de qualité de l'eau des puits et des forages	9
5.1.	Le puits	9
5.1.1	.Types de puits	9
5.1.1.1.	Puits ordinaires	9

5.1.1.2. Puits de surface	9
5.1.1.3. Puits foncés ou puits tubulaires	9
5.1.1.4. Puits artésiens	9
5.2. Le forage	9
5.2.1. Types de forage	10
5.2.1.1. Les forages d'exploitation verticaux	10
5.2.1.2. Les forages de captage d'eau horizontaux.....	10
6. Description de la région d'étude	12
6.1. Situation géographique	12
6.2. Hydrologie	12
6.2.1. Bassin versant de la Soummam.....	12
6.2.2. Bassin versant du Chott El Hodna.....	13
6.2.3. Ressources et mobilisation des eaux	13
6.3. Climatologie	15
6.3.1. Précipitations	15
6.3.2. Températures	15
6.3.3. Synthèse climatique	16
6.4. Pédologie	16

Chapitre II : Matériel et Méthodes

Introduction	19
1. Objectif	20
2. Matériels et Méthode.....	20
2.1. Echantillons de l'eau	20
3. Matériels	20
4. Méthodes	21
4.1. Détermination des paramètres organoleptiques	21
4.2. Détermination de paramètres physico-chimiques	21
4.2.1. La température	21
4.2.2. pH (potentiel hydrogène)	22
4.2.3. COND (conductivité électrique)	22
4.2.4. Turbidité	23
4.2.5. Salinité	24
4.2.6. Matières en suspension	24
4.2.7. Résidu sec	24

4.2.8. Dosage de dureté totale	24
4.2.9. Dosage de chlorure	25
4.2.10. Dosage de matière organique	25
4.2.11. Sodium	25
4.2.12. Nitrates	25
4.2.13. Nitrites méthode au réactif de Zambelli	25
4.2.14. Sulfate	26
4.2.15. Dosage de phosphate	26
4.3. Détermination de paramètres bactériologiques	26
4.3.1. Les FTAM	26
4.3.2. Les coliformes totaux	26
4.3.3. Les coliformes fécaux	26

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Résultats et discussion	29
1.1. Température	29
1.2. pH.....	30
1.3. Conductivité	31
1.4. Turbidité.....	32
1.5. Salinité	33
1.6. Matière en suspension	34
1.7. Résidu sec	35
1.8. Dureté totale.....	37
1.9. Chlorure	38
1.10. Matières organique.....	39
1.11. Sodium	40
1.12. Nitrates	41
1.13. Nitrite.....	43
1.14. Sulfate	44
1.15. Phosphate	45
2. Paramètres bactériologiques	46
2.1. La flore totale aérobie mésophile (FTAM)	46
2.2. Les coliformes totaux (CT) et fécaux (CF)	47
Conclusion	50
Référence bibliographique.....	52

Annexe	58
---------------------	-----------

Liste d'abréviations

BCPL : Bouillon au Lauryl Sulfate et Tryptose avec Brillant Vert et Bile

BVS : Bassin versant de la Soummam.

CE : Conductivité électrique.

CF : Coliformes fécaux.

CT : Coliformes totaux.

éch : Echantillon.

FTAM : Flore mésophile aérobie totale.

H⁺ : Ions hydrogènes

MES : Matière en suspension

nm : Nanomètre.

NTU : Unité de Turbidité néphélométrique

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

PCA : Plate Count Agar

pH : Potentiel hydrogène

TH : Titre hydrotimétrique.

VRBG : Violet red Bile Glucose.

μS/cm : Microsiemens par centimètre.

°F : Degrés français.

°C : Degré Celsius.

Liste des figures

N°	Titre de la figure	La page
Figure 1	Galerie drainante	10
Figure 2	Schéma de principe de fonctionnement de foggaras	11
Figure 3	Le réseau hydrographique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	12
Figure 4	Situation géographique du bassin versant de la Soummam	13
Figure 5	Situation géographique du Chott El Hodna	14
Figure 6	Ressource en eau de la wilaya de Bordj Bou Arreridj	14
Figure 7	Diagramme Ombrothermique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj (2013-2023).	16
Figure 8	Thermomètre	22
Figure 9	PH-mètre	22
Figure 10	Conductimètre	23
Figure 11	Turbidimètre	23
Figure 12	Centrifugeuse	24
Figure 13	Les valeurs de température des échantillons d'eau analysée	29
Figure 14	Les valeurs du pH des échantillons d'eau analysée	30
Figure 15	Les valeurs de la conductivité des échantillons d'eau analysée	31
Figure 16	Les valeurs de la turbidité des échantillons d'eau analysée	32
Figure17	Les valeurs de salinité des échantillons d'eau analysée	33
Figure 18	Les valeurs de la MES des échantillons d'eau analysée	34
Figure 19	Valeur des teneurs en résidu sec des échantillons d'eau analysée	35
Figure 20	Les teneurs de la dureté totale des échantillons d'eau analysée	37
Figure 21	Valeurs des teneurs en Chlorure des échantillons d'eau analysée	38
Figure 22	Les valeurs de la MO des échantillons d'eau analysée	39
Figure 23	Valeurs des teneurs en Sodium des échantillons d'eau analysée	40
Figure 24	Valeurs des teneurs en Nitrate des échantillons d'eau analysée	41
Figure 25	Valeurs des teneurs en Nitrite des	43

	échantillons d'eau analysée	
N°	Titre de la figure	La page
Figure 26	Valeurs des teneurs en sulfate des échantillons d'eau analysée	44
Figure 27	Valeurs des teneurs en Phosphate des échantillons d'eau analysée	45
Figure 28	Résultats d'analyses de FTAM des eaux	46
Figure 29	Résultats d'analyses de CT et CF des eaux	47
Figure 30	Boite VRBG négative	74
Figure 31	Boite PCA négative	74

Liste des tableaux

N° de tableaux	Titre des tableaux	La page
I	Les eaux de surface et les eaux souterraines.	6
II	Moyennes mensuelles des précipitations (mm)	15
III	Températures enregistrées à Bordj Bou Arreridj (°C)	15
IV	Répartition des points de prélèvement dans la zone d'étude.	20

Résumé

Cette étude porte sur l'évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines à travers un réseau composé de cinq points de prélèvement distincts, répartis sur cinq sites géographiques différents. Trois échantillons urbains ont été collectés dans la commune de Bordj Bou Arréridj (Échantillon 1, Échantillon 2, Échantillon 3), tandis que deux points de prélèvement sur le terrain (GM et TL) ont été prélevés à partir de puits situés dans la commune de Bordj Zemoura, caractérisés par des eaux quelque peu saumâtres.

L'analyse a porté sur quinze paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité électrique, turbidité, salinité, résidu sec, dureté totale, matières en suspension, chlorures, matière organique, sodium, nitrates, nitrites, sulfates et phosphates) ainsi que sur trois paramètres bactériologiques (FTAM, coliformes totaux et coliformes fécaux).

Les résultats révèlent une variabilité de la qualité de l'eau selon le site d'échantillonnage. Sur le plan physico-chimique, la majorité des échantillons sont conformes aux normes algériennes (Décret exécutif n° 11-125) et aux directives de l'OMS, à l'exception des stations TL et GM qui présentent des dépassements de la limite thermique admissible (25 °C), et du point GM qui présente en outre une minéralisation élevée (conductivité électrique dépassant 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). En revanche, la qualité bactériologique s'est avérée excellente, avec une absence totale de germes indicateurs de pollution sur l'ensemble des cinq sites, confirmant la potabilité microbiologique de ces eaux.

Mots-clés : Eaux souterraines, puits, qualité physico-chimique, qualité bactériologique, Bordj Bou Arréridj.

Abstract

This study evaluates the physicochemical and bacteriological quality of groundwater through a monitoring network consisting of five distinct sampling points distributed across five different geographical sites. Three urban samples were collected from the municipality of Bordj Bou Arréridj (Sample 1, Sample 2, Sample 3), while two field sampling points (GM and TL) were collected from wells in the municipality of Bordj Zemoura, characterized by somewhat brackish water.

The analysis covered fifteen physicochemical parameters (temperature, pH, electrical conductivity, turbidity, salinity, total dissolved solids, total hardness, total suspended solids, chlorides, organic matter, sodium, nitrates, nitrites, sulfates, and phosphates) and three bacteriological parameters (TAMF, total coliforms, and fecal coliforms).

The results reveal variability in water quality depending on the sampling site. On the physicochemical level, most samples comply with Algerian standards (Executive Decree No. 11-125) and WHO guidelines, except for stations TL and GM which exceed the admissible thermal limit (25°C), reaching 28°C, and for station GM which additionally shows high mineralization (electrical conductivity exceeding 2800 µS/cm) beyond permissible limits. On the other hand, the bacteriological quality proved to be excellent, showing a total absence of pollution indicator germs across all five sites, thus confirming the microbiological safety of these waters.

Keywords : Groundwater, wells, physicochemical quality, bacteriological quality, Bordj Bou Arréridj.

الملخص

تتناول هذه الدراسة تقييم الجودة الفيزيائية، الكيميائية، والبكتريولوجية للمياه الجوفية من خلال شبكة مكونة من خمس نقاط سحب منفصلة، موزعة على خمسة مواقع جغرافية مختلفة. حيث تم جمع ثلاث عينات حضرية من بلدية برج بوعريريج (العينة 1، العينة 2، العينة 3)، ونقطتي سحب ميدانيتين (GM و TL) مأخوذتين من آبار في بلدية برج زمورة تتميز بمياهها المالحة نوعاً ما.

وشمل التحليل خمسة عشر معياراً فيزيائياً وكيميائياً وهي: درجة الحرارة، الأس الهيدروجيني، الناقلية الكهربائية، العكارة، الملوحة، البقايا الجافة، العسر الكلي، المواد العالقة، الكلوريدات، المواد العضوية، الصوديوم، النترات، النتريت، الكبريتات، والفوسفات، بالإضافة إلى ثلاثة معايير بكتريولوجية وهي: الفلورا الميكروبية الهوائية المتوسطة الحرارة الكلية، القولونيات الغائطية، والقولونيات الكلية.

تكشف النتائج عن تباين في جودة المياه حسب موقع أخذ العينات. فمن الناحية الفيزيائية والكيميائية، أظهرت معظم العينات مطابقة للمقاييس الجزائرية (المرسوم التنفيذي رقم 11-125) (وتوصيات منظمة الصحة العالمية، باستثناء الموقع Gm الذي سجل ناقلية كهربائية عالية تتعدى الحدود المسموح بها. ومن ناحية أخرى، تبين أن الجودة البكتريولوجية كانت ممتازة ومثالية، حيث سجلت غياباً تاماً لجميع أنواع البكتيريا والمؤشرات الحيوية للتلوث في جميع المواقع الخمسة، مما يؤكد سلامة هذه المياه للاستهلاك البشري من الناحية الميكروبيولوجية.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، الآبار، الجودة الفيزيوكيميائية، الجودة البكتريولوجية، برج بوعريريج.

Introduction

Introduction

L'eau est un élément fondamental et irremplaçable de la vie. Au-delà de son rôle de nutriment vital, elle intervient dans de nombreuses fonctions physiologiques essentielles telles que la digestion, l'absorption, la thermorégulation et l'élimination des déchets métaboliques. Sans cette ressource précieuse, aucune forme de vie sur Terre ne pourrait exister, ce qui en fait un bien naturel qu'il convient de préserver et de protéger pour les générations futures (Henri, 2012).

Toutefois, l'eau peut également être vecteur de maladies lorsqu'elle est contaminée par des rejets industriels, des eaux usées, des déchets ménagers ou agricoles, et des excréta. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que 80 % des maladies affectant la population mondiale sont directement liées à la qualité de l'eau consommée, et que les eaux polluées sont responsables de 50 % des cas de mortalité infantile dans les pays en développement (Desjardins, 1997). Ces chiffres illustrent l'ampleur du problème et la nécessité d'une surveillance rigoureuse et permanente de la qualité des ressources hydriques.

Les eaux souterraines représentent environ 97 % du total des eaux douces continentales liquides (Bosca, 2002) et constituent, à ce titre, une ressource stratégique pour de nombreuses populations. Dans la région de Bordj Bou Arréridj, les puits et les forages sont largement utilisés par les habitants pour leurs besoins quotidiens — boisson, cuisine, nettoyage — en raison de leur accessibilité et de leur disponibilité. Or, ces eaux souterraines ne sont pas à l'abri de contaminations d'origine géologique ou anthropique, notamment par infiltration des eaux usées, utilisation excessive d'engrais chimiques en agriculture, et absence de traitement ou de protection adéquate des ouvrages de captage.

Des travaux de recherche menés dans diverses régions du monde ont mis en évidence que la pollution des eaux souterraines est souvent liée à la présence de fosses septiques, au manque de réseau d'assainissement, et au non-respect des règles d'hygiène publique (Guessoum et al., 2014 ; Fakih et al., 2014 ; Degbey et al., 2010). Dans ce contexte, l'évaluation régulière de la qualité de ces eaux s'impose comme une nécessité absolue pour garantir la sécurité sanitaire des populations.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif principal est d'évaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits et de forages de la région de Bordj Bou Arreridj, et de les confronter aux normes nationales algériennes et aux recommandations de l'OMS, afin de juger de leur aptitude à la consommation humaine.

Pour ce faire, notre travail est structuré en trois chapitres principaux :

- Le chapitre I présente des généralités sur l'eau : définition, propriétés, ressources hydriques naturelles et types de pollution.
- Le chapitre II décrit le matériel et les méthodes utilisés pour les différentes analyses.
- Le chapitre III présente et discute l'ensemble des résultats obtenus achevé par une conclusion et quelques recommandations.

CHAPITRE I :
Généralités Sur L'eau

1. Définition de l'eau :

L'eau constitue une ressource indispensable à la vie et se présente sous trois états principaux : liquide, solide et gazeux. Elle est reconnue comme une substance transparente, incolore, inodore et sans saveur. Sa formule chimique H_2O , correspond à une molécule composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. L'eau est une solution aqueuse diluée et un excellent solvant. Elle se solidifie à une température de 0 °C et s'évapore à 100 °C (Gerard, 1999).

2. Propriétés de l'eau :

2.1. Propriétés physiques :

L'eau ne peut pas être considérée comme un liquide ordinaire, car ses propriétés physiques uniques jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat et le bon fonctionnement des systèmes biologiques. Parmi les plus importantes de ces caractéristiques (Cabane, B., & Vuilleumier, R., 2005) :

- ✓ **Solvant** : L'eau est un solvant omniprésent à la surface de la planète. Elle a la capacité d'absorber certains minéraux et composés organiques avec lesquels elle entre en contact, bien qu'elle ne parvienne pas à les dissoudre tous.
- ✓ **Une cohésion solide** : La puissance de l'eau réside dans les liaisons hydrogène robustes qui unissent ses molécules. En outre, son chauffage demande une importante quantité d'énergie, ce qui joue un rôle essentiel dans la régulation de la température terrestre.
- ✓ **Densité** : À 4 °C, l'eau atteint son point de densité maximale. En deçà de cette température, et lors de sa transition vers l'état solide, elle se dilate en raison de la structuration induite par les liaisons hydrogène. Ce phénomène confère à la glace une densité moindre par rapport à celle de l'eau à l'état liquide.
- ✓ **La transparence** : La transparence de l'eau entraîne une absorption des rayons infrarouges dès les premiers mètres de profondeur. Cela explique pourquoi le réchauffement se limite principalement à la partie supérieure de la colonne d'eau.

2.2. Propriétés chimiques :

L'eau joue un rôle essentiel en tant que milieu de transport pour les substances chimiques, grâce à sa capacité à se dissocier en ions hydrogène et hydroxyle, un phénomène évalué par le pH. Elle a également la particularité de dissoudre des composés nocifs, comme les acides (World Health Organization, 2017).

2.3. Propriétés biologiques :

L'eau joue un rôle crucial dans la création d'un environnement propice au développement des êtres vivants. Elle est essentielle au déroulement des cycles biologiques et des échanges vitaux. Représentant l'élément majoritaire en volume dans les organismes vivants, elle constitue une part prépondérante du protoplasme présent dans toutes les cellules. De plus, l'eau occupe une place primordiale dans notre alimentation, représentant entre 70 et 95 % de la composition de nombreux aliments tels que la viande, les fruits et les légumes. En somme, l'eau est un élément indispensable à la vie (DAHRAOUI et al ., 2022).

3. Les sources naturelles de l'eau :

On distingue quatre sources naturelles d'eau :

3.1. Les eaux de pluie :

L'eau de pluie, naturellement riche en oxygène et en azote, tout en étant exempte de sels de magnésium et de calcium, peut toutefois se contaminer dans les zones industrielles en raison de la présence de polluants dans l'atmosphère (Desjardins, 1997).

3.2. Les eaux de mers et océans :

La salinité de l'eau de mer correspond à la mesure de la concentration en sels dissous qu'elle renferme. Dans la majorité des mers, cette valeur oscille généralement entre 33 000 et 37 000 mg/l. Toutefois, des écarts significatifs peuvent être observés entre différentes mers et océans, en fonction des conditions géographiques et climatiques propres à chaque région. Les eaux proches des embouchures des grands fleuves tendent à présenter une salinité réduite (Desjardins, 1997).

3.3. Les eaux souterraines :

Les eaux souterraines sont reconnues comme les plus stables et les plus pures parmi les différentes catégories d'eaux. Leur grande limpidité, associée à une faible turbidité et une coloration réduite, est le résultat de la filtration naturelle opérée par le sol. De plus, leur température reste constante, car elles ne subissent ni l'exposition aux rayons du soleil ni les fluctuations climatiques. La charge bactérienne y est également limitée, en raison de leur séjour prolongé dans le sol combiné à une quasi-absence de matières organiques, ce qui freine

la prolifération des bactéries. Cependant, ces eaux présentent souvent des concentrations élevées en magnésium et en fer, ces éléments se dissolvant aisément du fait de l'absence d'oxygène (Desjardins, 1997).

3.4. Les eaux de surface :

Les eaux de surface désignent celles qui se trouvent à la surface terrestre. Elles peuvent résulter des eaux souterraines, du ruissellement ou encore de différents cours d'eau, comme les barrages, les rivières et les lacs. Ces eaux se classent généralement en trois grandes catégories :

- **Eaux de rivières (partie amont) :** Cette eau de montagne se distingue par sa fraîcheur, issue de la fonte des neiges, et par l'absence de bactéries, due à l'inhabitation des environs. Cependant, elle présente une turbidité élevée, car les particules de terre en suspension, entraînées par le débit rapide de l'eau dévalant les montagnes
- **Eaux de rivières (partie aval) :** Les eaux qui parcourent les zones résidentielles, agricoles et industrielles présentent une coloration due à la pollution bactérienne et organique issue des eaux usées et des déchets. Elles sont reconnues comme étant parmi les plus complexes à traiter.
- **Eaux de lac :** Les eaux du lac fonctionnent comme un bassin de décantation naturel, offrant une grande stabilité sur une longue durée. Elles se distinguent par leur faible turbidité ainsi qu'un niveau réduit de contamination bactérienne. Toutefois, elles subissent des inversions saisonnières, lors desquelles les eaux profondes se mélangent à celles de surface, entraînant alors une augmentation de la turbidité.

Tableau I : Les eaux de surface et les eaux souterraines.

Caractéristiques	Eau de surface	Eau souterraine
Température	Variable suivant saisons	Relativement constant
Turbidité, MES	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle
Couleur	Liée surtout aux matières en suspensions sauf dans les eaux très douces et acides humiques)	Liée surtout aux matières en Solution (acides humiques...)
(Goût et odeur)	Fréquents	Rare
Minéralisation globale (où : TDS, salinité)	Variable en fonction des terrains, Des précipitations, des rejets...etc.	Sensiblement constante en général nettement plus élevée que dans les eaux

		de surface de la même région
Fer et Manganèse dissous	Généralement absents	Généralement présents
Nitrates	Peu abondants en général	Teneur parfois élevée
Micropolluants minéraux et Organiques	Selon rejets industriels (dont les activités minières), agricoles ou des habitations; pollution permanente ou périodique (dont accidentelle)	Présents ou fonction des épandages agricoles ou rejets industriels en surface une pollution accidentelle peut subsister plus longtemps
Ca, Mg, Hco ₃	Variable selon région	Teneur souvent élevées si roche calcaire ou calcomagnésienne
Éléments vivants	Bactéries, virus, plancton	Ferro bactéries et sulfato- réductrices fréquentes

Source : Degremont, (1989).

4. Pollution des eaux :

La pollution de l'eau ne se réduit pas uniquement à l'introduction de substances externes, mais inclut toute altération de ses caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques, la rendant inadaptée à la consommation

(Dejoux, C. 1988).

4.1. Type de pollution :

4.1.1. Pollution physique :

- **Matières en suspension et turbidité** : C'est l'un des types de pollution physique les plus répandus. Ces particules solides, insolubles dans l'eau, perturbent le processus de photosynthèse des plantes aquatiques et servent également de support au transport des polluants chimiques (Dejoux, C. 1988).
- **La radioactivité** : C'est une forme de pollution physique résultant des activités nucléaires humaines, dont les radiations peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes (Lacourly, G.1971).

- **Température :** La température joue un rôle clé dans la pollution : une hausse de celle-ci intensifie les réactions chimiques, ce qui diminue la quantité d'oxygène disponible et complique le processus naturel d'auto-épuration de l'eau ; elle contribue également à la prolifération des organismes vivants (**UNESCO, 2021**).

4.1.2. Pollution chimique

L'être humain est souvent vu comme le principal acteur de cette pollution, surtout à cause des pratiques agricoles comme l'application de pesticides, de détergents et d'engrais. Ces actions contribuent à une hausse des niveaux de phosphate et d'azote, menant ainsi à une prolifération excessive d'algues et une diminution de l'oxygène, compliquant fortement leur élimination (**Bliefert & Perraud, 2012**).

4.1.3. Pollution biologique

Parmi les principaux polluants biologiques, on trouve les bactéries, les virus et les parasites qui contaminent le milieu aquatique, le rendant impropre à la consommation et à l'utilisation ; ils provoquent également des maladies et, par conséquent, un déséquilibre écologique (**Bitton, 2011**).

4.2. Origine de la pollution

4.2.1. Les unités industrielles

Certaines usines rejettent des produits chimiques dans nos rivières et nos nappes phréatiques, comme celles de l'industrie papetière et textile, où les composés organiques rejetés consomment l'oxygène présent dans l'eau (**Bitton, 2011**).

4.2.2. L'agriculture

La détérioration de la qualité de l'eau est due à l'intensification de l'élevage, dont les déjections, riches en azote, s'infiltrant dans les eaux, ainsi qu'à l'utilisation excessive d'engrais, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en nitrates (**Eaufrance, 2014**).

4.2.3. Pollution d'origine naturelle

Ce n'est pas toujours l'homme qui est à l'origine de la pollution, mais il existe des facteurs naturels, comme la fonte des neiges, qui entraînent le lessivage des sols et le transport de matières organiques vers les nappes phréatiques, ou encore l'interaction entre l'eau et la roche (**Hiscock & Bense, 2014**).

4.2.4. Les décharges publiques

Les décharges publiques constituent l'une des principales menaces, car elles produisent, après la décomposition des déchets, un liquide organique appelé lixiviat, qui peut être transporté par la pluie ou absorbé par le sol, et se retrouver ainsi dans les eaux (**Asano, 1985**).

5. Les paramètres de qualité de l'eau des puits et des forages :

5.1. Le puits

Un puits est un ouvrage hydraulique souterrain permettant l'extraction des eaux souterraines, généralement de profondeur inférieure à 100 m et de diamètre supérieur à 1,20 m (Banks and Robins, 2002; Zektser and Everett, 2004).

5.1.1 .Types de puits

5.1.1.1. Puits ordinaires

Les puits ordinaires sont essentiellement creusés dans les zones rurales, que ce soit à usage individuel ou semi-collectif. Leur réalisation est généralement manuelle, dans les secteurs où la nappe phréatique se trouve à moins de vingt mètres de profondeur. Leur profondeur oscille entre 1 et 15 mètres, avec un diamètre compris entre 1 et 2,5 mètres environ (MacDonald et al , 2009).

5.1.1.2 .Puits de surface

Il s'agit d'un ouvrage de captage dont le diamètre intérieur dépasse généralement 60 cm, avec une profondeur supérieure à 9 mètres mesurée depuis la surface du sol. Alimenté directement par la nappe phréatique, ce type de puits exploite la partie superficielle de l'aquifère libre, ce qui le rend plus exposé aux risques de contamination (Fadlelmawla and Al-Otaibi, 2005).

5.1.1.3. Puits forcés ou puits tubulaires

Un puits tubulaire se distingue par son faible diamètre — généralement de l'ordre de 152 mm — et sa grande profondeur. Sa construction est assurée par des entreprises spécialisées (puisatiers), qui utilisent des foreuses mécaniques pour sa réalisation (MacDonald et al ., 2009).

5.1.1.4. Puits artésiens

Le puits artésien est obtenu par perforation d'une couche imperméable afin d'atteindre une nappe d'eau sous pression, dite nappe artésienne, généralement localisée à plus de trente mètres de profondeur. Ce type de puits est réputé fiable et stable tout au long de l'année. Il est préférable aux puits de surface car il est naturellement moins exposé aux contaminations bactériennes (Zektser and Everett, 2004).

5.2. Le forage

Un forage est un ouvrage vertical de grande profondeur, pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres, mais de diamètre relativement faible. Il est réalisé mécaniquement à l'aide d'une foreuse à moteur, que le terrain soit consolidé ou non. Les forages représentent le

mode de captage le plus courant pour l'alimentation en eau potable. Ils offrent l'avantage de cibler précisément des horizons aquifères bien définis, notamment les nappes captives, tout en assurant une protection élevée contre les pollutions de surface (**MacDonald et al ., 2009; Houben et al., 2022**).

5.2.1. Types de forage

5.2.1.1. Les forages d'exploitation verticaux

Les forages verticaux constituent le type le plus répandu et le plus adapté à l'exploitation des aquifères poreux à grande extension horizontale. La grande majorité des aquifères fissurés font également appel à ce type d'ouvrage pour leur exploitation (**Houben et al., 2022**).

5.2.1.2. Les forages de captage d'eau horizontaux

Les galeries drainantes

Les galeries drainantes sont des tunnels de faibles dimensions creusés dans la roche afin de traverser et de drainer une nappe souterraine. Ces ouvrages, généralement subhorizontaux, présentent des sections de l'ordre de 1,80 à 2 mètres de hauteur sur 1 à 2 mètres de largeur. Les eaux souterraines y sont captées puis acheminées par la galerie principale, à laquelle des drains horizontaux ou subhorizontaux complémentaires peuvent parfois se raccorder. La longueur de ces galeries est variable : de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres, pouvant même atteindre plusieurs kilomètres (**Houben et al., 2022**).

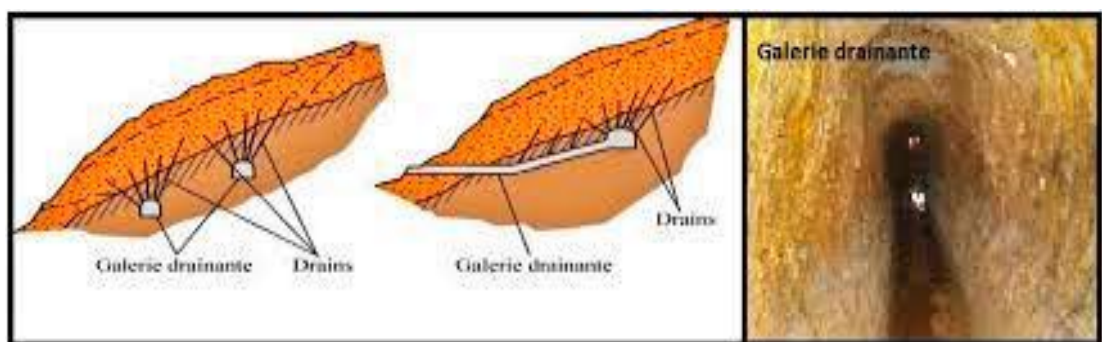


Figure 1 : Galerie drainante (Bouselsal, 2017).

5.2.1.3. Le forage à drains rayonnants

Ce type d'ouvrage est constitué d'un forage central équipé de drains tubulaires horizontaux disposés de manière radiale dans plusieurs directions. Il est généralement conçu pour produire des débits élevés, de l'ordre de 1 000 à 3 000 m³/h, dans des nappes alluviales importantes. Ses atouts résident dans des rendements hydrauliques considérables, une

longévité élevée et la capacité à capter des horizons peu épais sur un large front de nappe. Cette technique convient particulièrement aux terrains peu perméables (**Houben et al ., 2022**).

La Foggara

La foggara est un mode de captage horizontal traditionnel propre aux régions arides. Légèrement inclinée, elle permet de drainer les eaux de l'aquifère amont vers les zones plus sèches situées en aval, notamment les palmeraies. Ce procédé repose sur un système de galeries en pente douce pouvant atteindre vingt kilomètres de longueur, agrémentées de puits d'aération espacés de 5 à 22 mètres (**Zektser and Everett, 2004**).

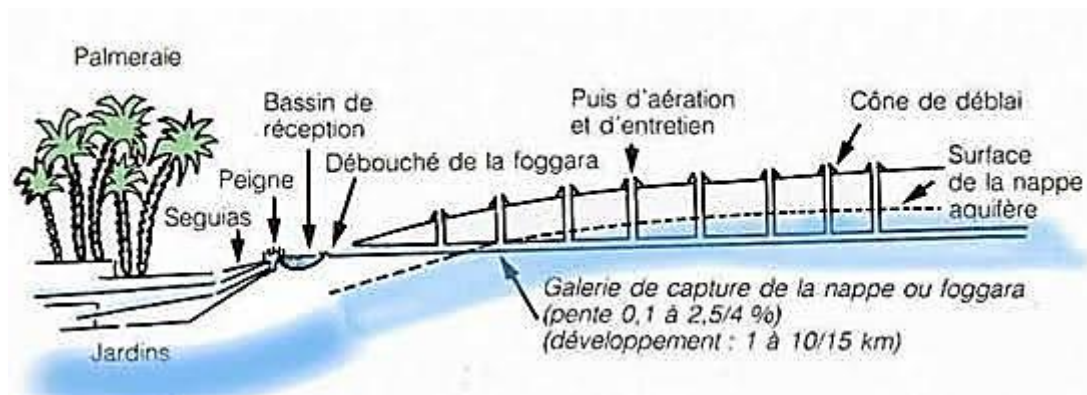


Figure 2 : Schéma de principe de fonctionnement des foggaras (PATRY Nicole, 2002)

6. Description de la région d'étude

6.1. Situation géographique

La wilaya de Bordj Bou Arreridj est implantée sur les hauts plateaux algériens, au croisement de la chaîne montagneuse des Bibans. Sur le plan géographique, elle est délimitée par les parallèles 35° et 37° de latitude Nord, et les méridiens 4° et 5° de longitude Est par rapport au méridien de Greenwich. Le chef-lieu de wilaya se situe précisément à 36° de latitude Nord et 4°30' de longitude Est (**Belhadj and Hamouch, 2020**).

Cette wilaya occupe une position stratégique à mi-chemin entre Alger et Constantine, couvrant une superficie de 3 920,42 km². Elle est distante de 220 km à l'est de la capitale (**Belhadj and Hamouch, 2020**). Elle est composée de 34 communes regroupées au sein de 10 daïras, soit une moyenne de 3 communes par daïra (**Salamani and Benaini, 2023**).

Ses limites administratives sont les suivantes :

- Au Nord : la wilaya de Béjaïa
- À l'Est : la wilaya de Sétif
- À l'Ouest : la wilaya de Bouira
- Au Sud : la wilaya de M'sila

6.2. Hydrologie

Le réseau hydrographique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj est caractérisé par deux orientations d'écoulement opposées, séparées par une ligne de partage des eaux qui correspond à la limite entre les grands bassins versants de la Soummam et du Chott El Hodna (**Zerouali et al., 2022**).

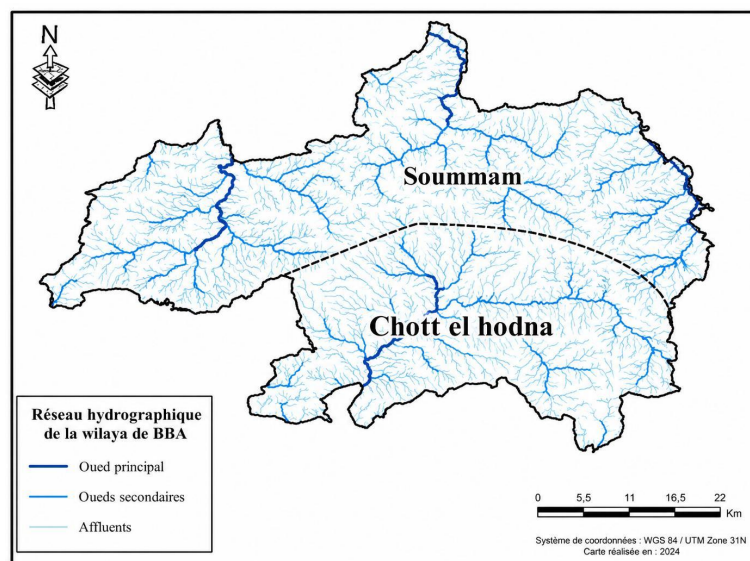


Figure 3 : Le réseau hydrographique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj (Chenah,R et Torki,A 2023)

6.2.1. Bassin versant de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam couvre une superficie de 9 125 km² et est subdivisé en 10 sous-bassins versants. Il est localisé dans le Nord-Est de l'Algérie. Ses limites naturelles sont constituées : au Nord par les chaînes du Djurdjura et ses contreforts s'étendant jusqu'à la mer Méditerranée, au Sud par les contreforts du mont Hodna, à l'Est par les Babors et le plateau de Sétif, et à l'Ouest par le plateau de Bouira (Hamenni et al., 2015).

Le réseau hydrographique de ce bassin comprend 09 oueds principaux totalisant 726 km de longueur, dont l'Oued Soummam sur 226 km. Le système de drainage est organisé autour de l'Oued Sahel et ses affluents à l'Ouest, et de l'Oued Boussellem et ses affluents à l'Est. Ces deux cours d'eau confluent près d'Akbou pour former l'Oued Soummam, qui se déverse ensuite dans la Méditerranée (Hamenni et al., 2015).

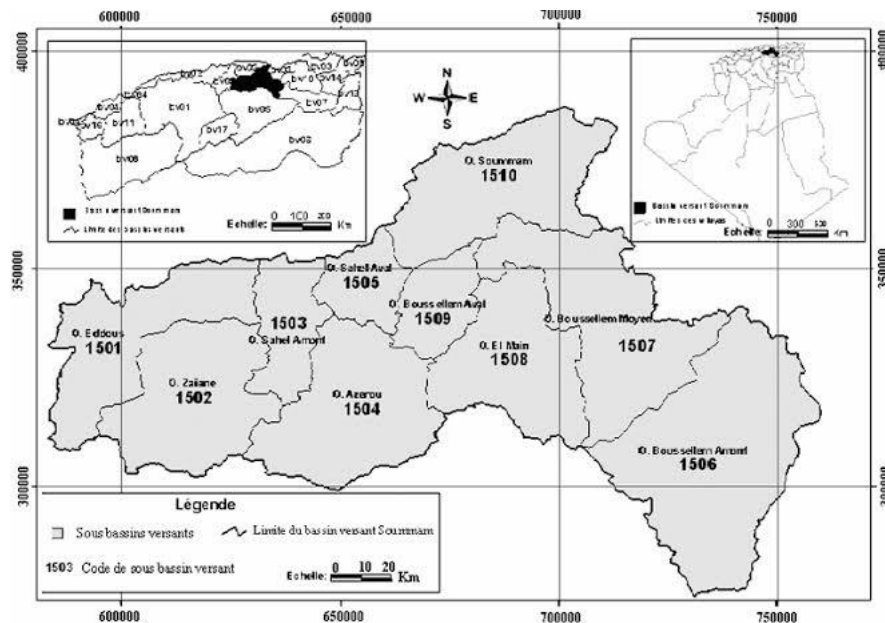


Figure 4 : Situation géographique du bassin versant de la Soummam (Hamenni et al., 2015).

6.2.2. Bassin versant du Chott El Hodna

Le Chott El Hodna (35°21,076' N, 04°32,513' E) s'étend sur plus de 362 000 hectares et se situe sur les hauts plateaux centraux de l'Algérie. Il présente un climat semi-aride, avec une température moyenne annuelle de 25°C et une pluviométrie inférieure à 400 mm par an. Cette zone humide occupe le centre du bassin fermé du

Hodna, qui couvre 26 000 km², s'étirant sur 70 km de longueur pour 19 km de largeur, à environ 40 km de la ville de M'sila (**Gasmi et al., 2018**).

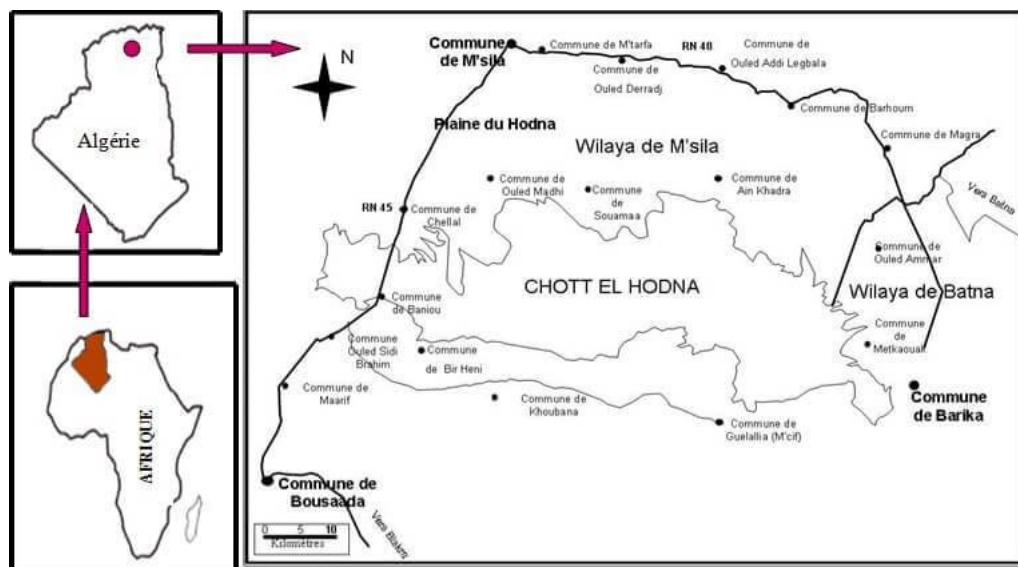


Figure 5 : Situation géographique du Chott El Hodna

(Source : Bensaci et al., 2008)

6.2.3. Ressources et mobilisation des eaux

La wilaya de Bordj Bou Arreridj dispose de ressources en eau diversifiées.

L'ensemble des informations relatives à ces ressources est synthétisé dans la figure 6. Les eaux mobilisées proviennent à la fois des nappes souterraines et des infrastructures hydrauliques de surface implantées dans la région (**Salamani and Benaini, 2023**).

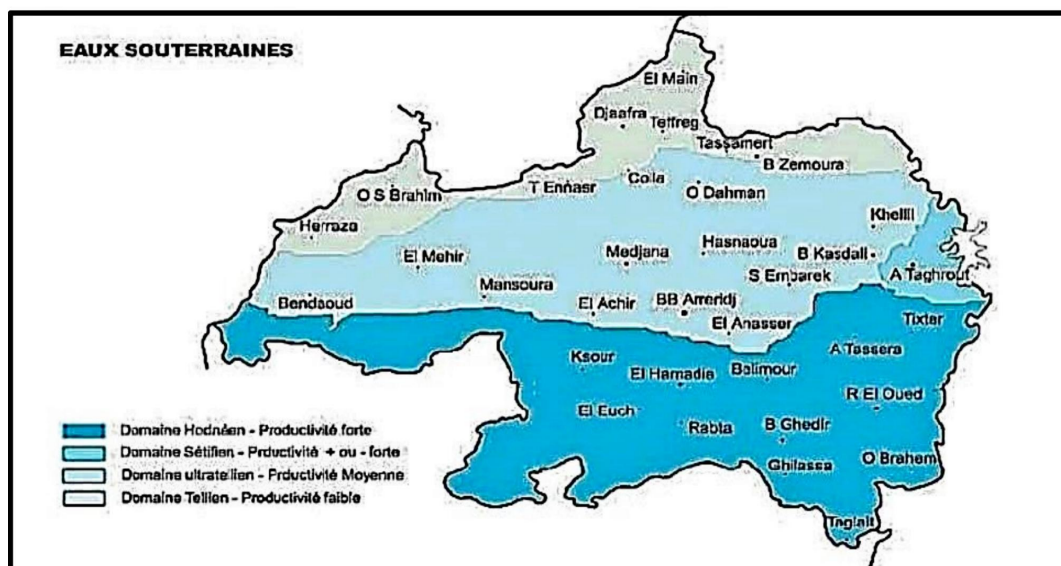


Figure 6: Ressources en eau de la wilaya de Bordj Bou Arreridj (Andi, 2014).

6.3. Climatologie

La région de Bordj Bou Arreridj est soumise à un climat continental semi-aride, marqué par des hivers froids et rigoureux d'une part, et des étés chauds et secs d'autre part (Zerouali et al., 2022).

6.3.1. Précipitations

La répartition des précipitations à l'échelle mensuelle dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj révèle une variabilité saisonnière marquée. Les données pluviométriques moyennes enregistrées sur la période 2013–2023 sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II : Moyennes mensuelles des précipitations (mm) — 2013-2023

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm)	26,7	21,6	33,9	33,4	34,9	17,1	6,8	12,1	13,1	16,9	35,4	27,7

6.3.2. Températures

Les données thermométriques relatives aux températures minimales, maximales et moyennes de la wilaya de Bordj Bou Arreridj ont été compilées sur une période de dix ans (2013–2023):

Tableau III : Températures enregistrées à Bordj Bou Arreridj (°C) — 2013-2023

Paramètre	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
M (°C)	12,2	14,1	16,6	22	26,4	32,8	32,8	37,6	35,9	30,9	25,1	13,5
m (°C)	2,4	3,2	5,4	8,2	11,7	16,6	20,5	19,3	16,4	12,4	6,9	4,1
(M+m)/2	7,3	8,7	11,0	15,1	19,1	24,7	29,1	27,6	23,7	18,7	11,8	8,8

M : moyenne des températures maximales mensuelles. **m** : moyenne des températures minimales mensuelles. **(M+m)/2** : température moyenne mensuelle.

6.3.3. Synthèse climatique

L'analyse du diagramme ombrothermique (Figure 7), élaboré à partir des données de précipitations et de températures sur la période 2013–2023, met en évidence l'existence d'une saison sèche prononcée ainsi qu'une saison humide relativement courte dans la région de influence directement les ressources en eau disponibles et leur variabilité saisonnière. Bordj Bou Arreridj. Cette alternance climatique caractéristique du régime semi-aride

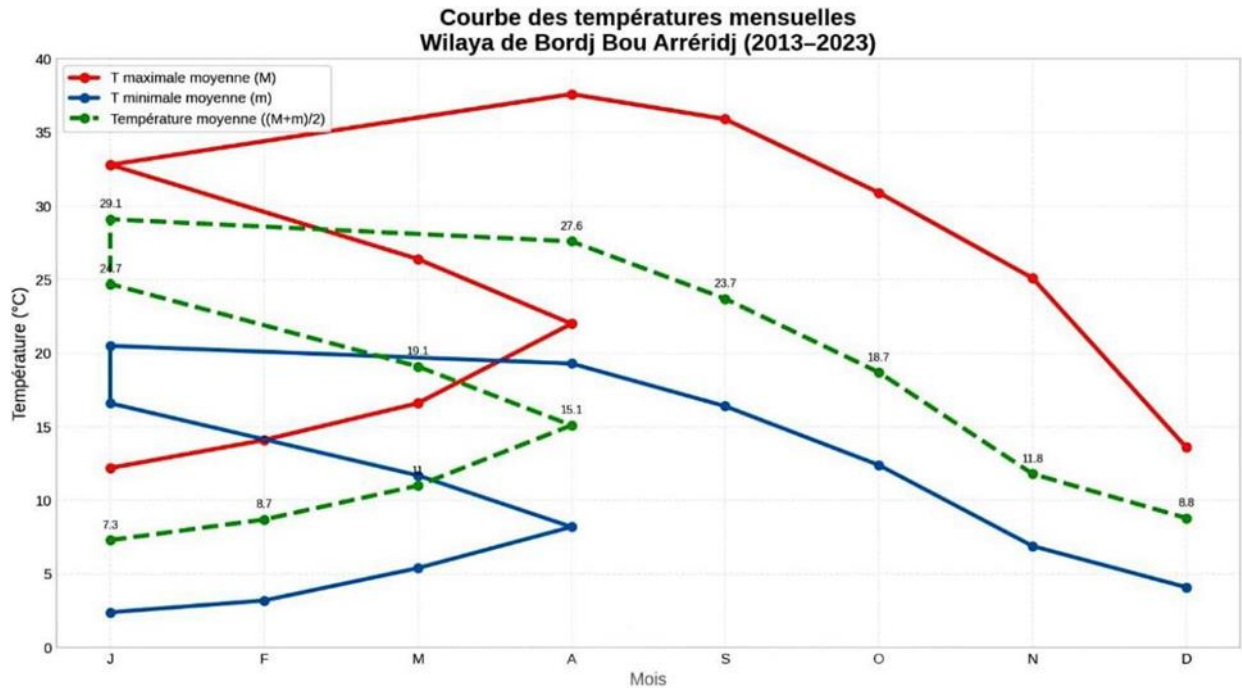


Figure 7 : Diagramme Ombrothermique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj (2013–2023).

6.4. Pédologie

Le territoire de la wilaya de Bordj Bou Arreridj peut être divisé en trois zones pédologiques distinctes (Djaballah and Ould-Amer, 2006; Megouaset and Daou, 2021) :

Zone Nord

Cette zone est principalement composée de : sols peu évolués et sols calcimagnésiques.

Zone intermédiaire

Elle se caractérise par trois types de sols : les sols calcimagnésiques, les sols à croûte calcaire et les sols peu évolués.

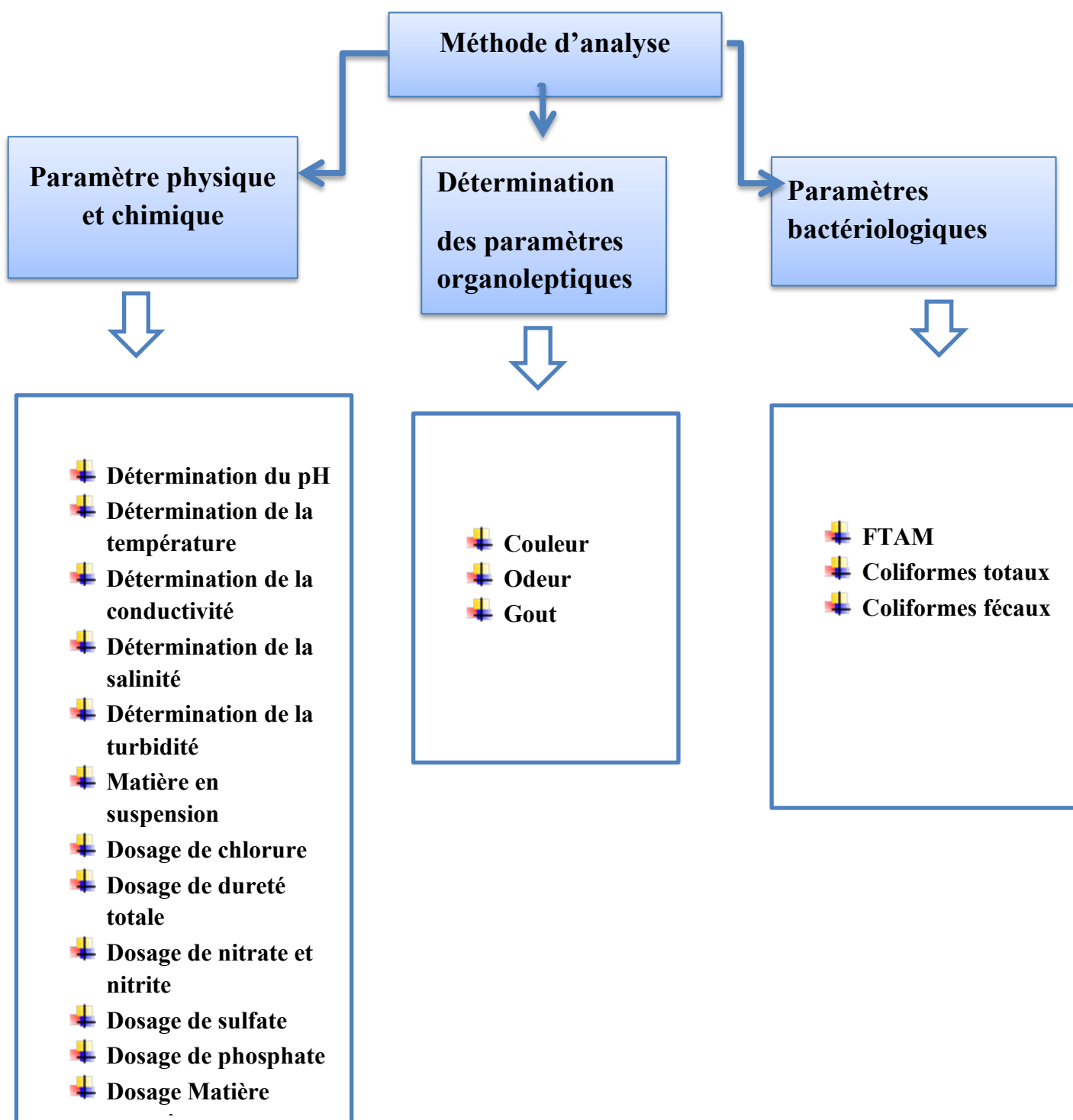
Zone Sud

Deux types de sols y prédominent : les sols peu évolués et les sols calcimagnésiques. Cette diversité pédologique conditionne en grande partie la nature des interactions entre les eaux de pluie et le sol, et par conséquent la composition chimique des eaux souterraines qui alimentent les puits et les forages de la région.

Chapitre II :
Matériels et Méthodes

Introduction

Dans cette section, des analyses physico-chimiques (pH, conductivité électrique, turbidité, etc.) ainsi que des analyses bactériologiques ont été menées au laboratoire sur plusieurs échantillons d'eaux de consommation.



1. Objectif :

L'objectif de ce travail est la détermination des paramètres physiques, l'analyse des caractéristiques chimiques et l'évaluation des aspects bactériologiques de l'eau.

2. Matériels et Méthode

2.1. Echantillons de l'eau :

La stratégie d'échantillonnage a été formulée en s'appuyant sur cinq points de prélèvement distincts, où chaque point correspond à un site spécifique. Trois de ces points (éch1, éch2, éch3) sont répartis à travers différents secteurs géographiques de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Quant aux deux points restants (éch TL et éch GM), ils se situent dans deux zones distinctes au niveau de la daïra de Bordj Zemoura, caractérisées par un milieu hydrologique de type oued temporaire (oued sec). Cette répartition spatiale permet de couvrir cinq environnements hydrologiques variés, dont la localisation précise est définie dans le Tableau N° IV.

Tableau IV : Répartition des points de prélèvement dans la zone d'étude.

Numéro d'échantillon	Lieu de prélèvement des échantillons
éch 1	Bordj Bou Arreridj
éch 2	Bordj Bou Arreridj
éch 3	Bordj Bou Arreridj
éch TL	Bordj Zemoura
éch GM	Bordj Zemoura

3. Matériels :

Appareillage

-  pH mètre H ;
-  Conductimètre ;
-  Turbidimètre ;
-  Spectrophotomètre ;
-  Agitateur magnétique ;

- + Autoclave ;
- + Bain marie ;
- + Dessiccateur ;
- + Etuve ;
- + Incubateur ;

Verrerie et autres matériels

- + Tubes à essais stériles ;
- + Pipettes Pasteur ;
- + Burettes ;
- + Thermomètre ;
- + Béchers ;
- + Pissettes ;
- + Agitateurs ;
- + Bec-Bunsen ;
- + Boîtes de pétri en plastique ;
- + Pinces ;
- + Spatules ;
- + Erlenmeyer ;
- + Fioles (coniques, jaugées) ;
- + Flacons de 250 ml, 500 ml ;
- + Pipettes graduées 1 ml, 2 ml, 5 ml et 10 ml stérile

4. Méthodes :

4.1. Détermination des paramètres organoleptiques :

- Couleur.
- Gout.
- Odeur.

Principe : L'évaluation de ces critères s'appuie sur une analyse sensorielle qui mobilise l'odorat, l'observation visuelle et les sensations gustatives.

4.2. Détermination de paramètres physico-chimiques :

4.2.1. La température :

La température a été mesurée in situ, directement au point de prélèvement, à l'aide d'un thermomètre à mercure afin de garantir la représentativité des paramètres physico-chimiques (**figure 8**).



Figure 8 : thermomètre (Cliché personnel)

4.2.2. pH (potentiel hydrogène) :

Mesure de la concentration en ions hydrogène (**Buck et al ., 2002**). Pour mesurer le pH, commencez par bien rincer la sonde avec de l'eau distillée. Ensuite, plongez-la dans l'échantillon à analyser jusqu'à ce que l'appareil indique une stabilisation (**figure 9**). La valeur relevée est généralement de 7, correspondant à un pH neutre (**Rodier et al ., 2009**) .



Figure 9 :pH-mètre (Cliché personnel)

4.2.3. COND (conductivité électrique) :

Ce principe repose sur la faculté de l'eau à transmettre le courant électrique, une propriété directement liée à la présence d'ions dans celle-ci. On utilise un conductimètre, illustré dans la **Figure 10** pour effectuer cette mesure : la sonde est d'abord rincée avec de l'eau distillée, puis plongée dans l'échantillon à analyser. Une fois la valeur stabilisée, elle est relevée avec son unité correspondante, exprimée soit en $\mu\text{S}/\text{cm}$ soit en ms/cm (**Rusydi, 2018**).



Figure 10 : Conductimètre (Cliché personnel)

4.2.4. Turbidité :

La turbidité résulte de la diffusion de la lumière par des particules en suspension, telles que la boue. Elle est déterminée à l'aide d'un turbidimètre présente dans la **Figure11**. Pour cela, on utilise des cuvettes en verre propres, préalablement rincées à l'eau distillée. Ces dernières sont ensuite remplies avec l'échantillon d'eau, puis insérées dans l'appareil. Une fois que le résultat s'est stabilisé, on le consigne. L'unité de mesure utilisée est le néphélomètre (NTU) (Nigam et al ., 2013).



Figure 11 : Turbidimètre (Cliché personnel)

4.2.5. Salinité :

Elle est évaluée à l'aide d'un conductimètre, suivant le même principe et la même méthode que pour les sels dissous. Ces derniers ne possèdent pas d'unité, leur concentration dans les échantillons était inférieure à 0,5 (FAO, 1985).

4.2.6. Matières en suspension :

La détermination des matières en suspension repose sur le principe de la séparation solide-liquide par centrifugation. Les échantillons sont soumis à une force centrifuge élevée (Figure 12), favorisant la sédimentation des particules solides au fond des tubes. Après décantation et séchage des résidus à l'étuve (100 °C), la masse des matières en suspension est obtenue par pesée gravimétrique (Rodier et al., 2009). Le protocole opératoire détaillé ainsi que les paramètres de centrifugation utilisés sont présentés dans l'Annexe [13].



Figure 12 : Centrifugeuse (Cliché personnel)

4.2.7. Résidu sec :

La détermination du résidu sec est effectuée par évaporation de l'échantillon au bain-marie à 105 °C, suivie d'une dessiccation en étuve jusqu'à l'obtention d'un poids constant (Skoog et al., 2017). Le détail de la procédure opératoire est consigné dans l'Annexe [12].

4.2.8. Dosage de dureté totale :

La dureté totale est déterminée par la méthode complexométrique au sel disodique de l'EDTA. Le principe repose sur le titrage des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) en présence d'un indicateur coloré, le Noir Ériochrome T (NET), jusqu'au virage de la coloration

rouge foncé au bleu-vert (Rice et al., 2023). Le mode opératoire détaillé est fourni dans l'Annexe [13].

4.2.9. Dosage de chlorure :

Le dosage des ions chlorures (Cl^-) est réalisé par la méthode volumétrique de Mohr. Le principe repose sur le titrage des chlorures par une solution de nitrate d'argent (AgNO_3 , 0,1 N) en présence de chromate de potassium (K_2CrO_4 à 10%) comme indicateur de fin de réaction (virage vers une coloration rouge brique). Le protocole opératoire détaillé ainsi que les étapes d'élimination des interférences sont consignés dans l'Annexe [13] (Rice et al., 2023).

4.2.10. Dosage de matières organique :

La détermination de la matière organique (oxydabilité au permanganate de potassium en milieu acide) est effectuée à chaud. Le principe s'appuie sur l'oxydation des matières organiques par un excès de KMnO_4 , suivi d'une réduction par l'acide oxalique, puis d'un rétro-titrage de l'excès par le KMnO_4 jusqu'à l'obtention d'une coloration rose pâle stable (Rodier et al., 2009). Le mode opératoire complet est décrit dans l'Annexe [13].

4.2.11. Sodium :

En raison de l'indisponibilité de l'appareillage de mesure directe (tel que le photomètre de flamme), les teneurs en ions sodium (Na^+) ont été déterminées par une approche déductive. Cette méthode repose sur la corrélation hydrochimique étroite entre le sodium et les ions chlorures (Cl^-), en parfaite cohérence avec le contexte lithologique local caractérisé par l'absence de roches salines (Appelo & Postma, 2005). Le principe de cette démarche et ses fondements géologiques l'Annexe [14].

4.2.12. Nitrates :

Le dosage des ions nitrates (NO_3^-) est effectué par la méthode spectrophotométrique au salicylate de sodium en milieu acide (Snoeyink & Jenkins, 1980). Après évaporation à sec de l'échantillon en présence des réactifs et développement de la coloration jaune caractéristique, l'absorbance est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre. Le protocole opératoire détaillé est présenté dans l'Annexe [15].

4.2.13. Nitrites méthode au réactif de Zambelli :

Les nitrites (NO_2^-) sont déterminés par spectrophotométrie d'absorption moléculaire en utilisant la méthode au réactif de Zambelli. Le principe repose sur la formation d'un complexe

coloré jaunâtre après l'ajout séquentiel du réactif de Zambelli et de l'ammoniaque, suivie d'une mesure de l'absorbance réglée sur une longueur d'onde de 435 nm (Snoeyink & Jenkins, 1980). Les détails du mode opératoire sont consignés dans l'Annexe [16].

4.2.14. Sulfate :

La concentration en ions sulfates (SO_4^{2-}) est évaluée par la méthode turbidimétrique au chlorure de baryum (BaCl_2). Cette réaction entraîne la précipitation du sulfate de baryum (BaSO_4) sous forme de suspension stable (Satyapal & Shrivastava, 2018). La mesure de la turbidité qui en résulte est réalisée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 420 nm, selon les étapes détaillées dans l'Annexe [17].

4.2.15 Dosage de phosphate :

Le dosage des orthophosphates (PO_4^{3-}) est réalisé par la méthode colorimétrique au molybdate d'ammonium. Le principe est basé sur la réduction du complexe phosphomolybdaque par le chlorure stanneux, provoquant l'apparition d'une coloration bleue dont l'intensité est mesurée par spectrométrie à une longueur d'onde de 690 nm (Nagul et al., 2015). Le protocole complet est fourni dans l'Annexe [18].

4.3. Détermination de paramètres bactériologiques

4.3.1. Les paramètres de FTAM :

Le dénombrement de la flore aérobie mésophile totale est réalisé par ensemencement sur milieu PCA après incubation à 37 °C pendant 48 heures (Figure 14). Cette analyse permet d'évaluer la charge bactérienne globale de l'eau, exprimée en UFC/mL (Rodier et al., 2009) [19].

4.3.2. Les coliformes totaux :

Le dénombrement des coliformes totaux a été réalisé par la méthode d'ensemencement en profondeur. Un volume de 1 mL de l'échantillon a été introduit dans une boîte de Pétri, puis recouvert de 15 mL de milieu VRBG en surfusion. Après une homogénéisation soignée par mouvements circulaires en forme de « 8 », les boîtes ont été incubées à 37 °C pendant 24 heures. La procédure complète est détaillée dans l'Annexe [20].

4.3.3 Les coliformes fécaux :

La recherche des coliformes fécaux est réalisée par ensemencement en profondeur dans le milieu sélectif VRBG. Après incubation à 44 °C pendant 48 heures, les colonies

caractéristiques sont dénombrées. Le protocole opératoire détaillé est disponible dans l'Annex21

Chapitre III :
Résultats et discussion

1. Résultats et discussion :

1.1. Température :

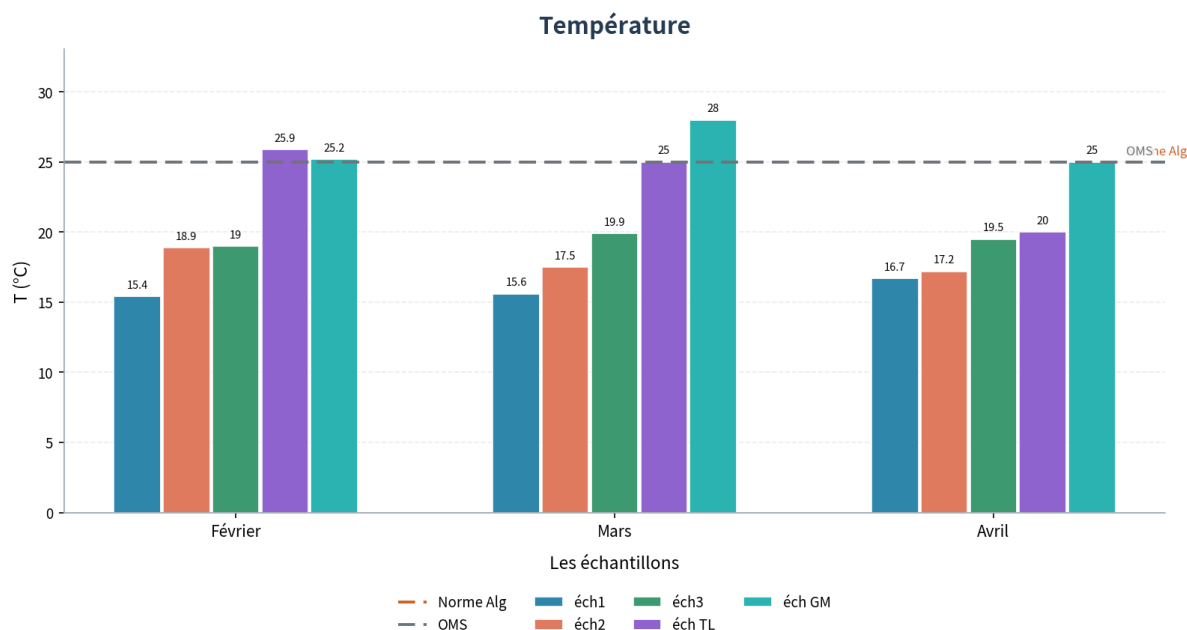


Figure 13: Résultats d'analyses de température de l'eau

La figure 13 illustre les résultats de l'analyse de la température de l'eau au niveau des différentes stations d'étude. La valeur thermique la plus élevée (28 °C) a été enregistrée dans l'échantillon du puits de la commune de Bordj Zemoura (éch TL) durant le mois de mars, tandis que la valeur la plus basse (15,4 °C) a été relevée dans l'échantillon du puits de la commune de Bordj Bou Arreridj (éch 1) au cours du mois de février.

À travers le suivi mensuel, il est à noter que les puits de la commune de Bordj Bou Arreridj (éch 1, éch 2, éch 3) ont maintenu une stabilité thermique relative, s'inscrivant dans les plages naturelles des eaux souterraines. Leurs valeurs ont oscillé entre 15,4 °C et 25,9 °C, ce qui est globalement conforme aux normes algériennes (JORA, 2011) qui fixent la température maximale de l'eau potable à 25 °C, avec une légère augmentation mineure et négligeable durant certaines périodes sous l'influence thermique du milieu environnant.

En revanche, concernant les puits de la région de Bordj Zemoura (TL et GM), une hausse sensible de la température a été enregistrée, dépassant le seuil de 25 °C durant certains mois (atteignant 28 °C en mars). Cette élévation thermique est principalement attribuée aux caractéristiques hydrogéologiques et à la profondeur des puits ; ces derniers exploitent une nappe superficielle située sous le lit d'un oued asséché. En l'absence d'un écoulement de surface permanent et en raison de l'exposition prolongée des roches et du lit de l'oued au rayonnement solaire direct, cette chaleur se transmet par conduction thermique à la nappe phréatique proche de la surface. Ce comportement thermique est tout à fait naturel et prévisible dans de tels environnements arides et pour des nappes peu profondes. (Margat,

2006). En comparaison avec d'autres régions présentant des caractéristiques similaires (oueds secs), ce comportement thermique est attendu et lié à la profondeur de la nappe et au degré d'exposition thermique. En ce qui concerne la conformité aux normes, les échantillons des puits ordinaires (éch1, éch2, éch3) sont conformes à la norme nationale algérienne (JORA, 2011) qui fixe la limite maximale à 25 °C, tandis que les stations TL et GM présentent des dépassements atteignant 28 °C, rendant leurs eaux non conformes sur le plan thermique, malgré leur bonne qualité chimique.

1.2. pH :

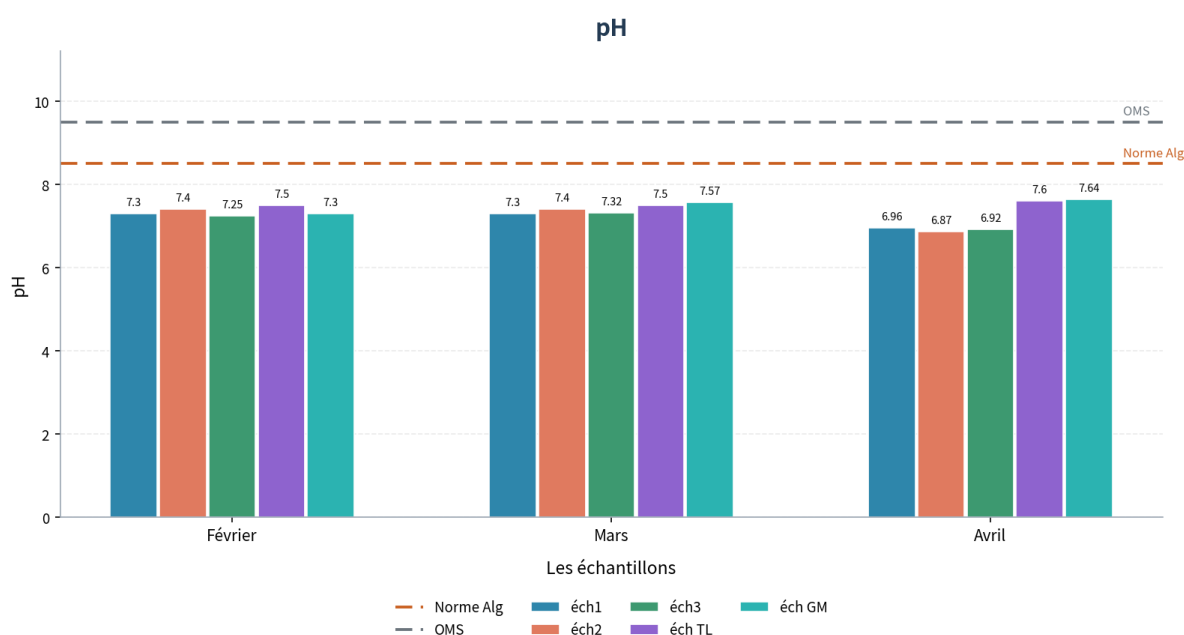


Figure 14 : Résultats d'analyses de pH de l'eau

La figure 14 présente les résultats des mesures du pH des cinq échantillons d'eau tout au long des mois d'étude. Globalement, l'ensemble des valeurs mesurées a varié entre 6,87 et 7,64. La valeur d'alcalinité la plus élevée (7,64) a été enregistrée dans les échantillons de Bordj Zemoura (éch TL et éch GM) au cours du mois d'avril, tandis que la valeur la plus basse (environ 6,80) a été signalée dans le puits de Bordj Bou Arreridj (éch 2) durant le mois de février.

L'analyse mensuelle révèle une fluctuation nette du comportement hydrochimique des eaux, liée aux spécificités environnementales de chaque site. Dans les puits de la commune de Bordj Bou Arreridj (éch 1, éch 2, éch 3), une baisse relative des valeurs de pH a été observée durant le mois d'avril. Cette diminution est due à l'effet direct de l'infiltration des eaux de pluie et de la fonte des neiges, caractérisées par leur nature légèrement acide, ce qui a provoqué un phénomène de dilution des bases et des ions dissous dans le cours d'eau ou la nappe.

À l'inverse, les puits de Bordj Zemoura (éch TL et éch GM) ont manifesté un comportement opposé, où les valeurs de pH ont augmenté pour atteindre 7,64 en avril, en dépit de la période de fonte des neiges. Cette hausse s'explique par l'interaction chimique continue entre l'eau souterraine et la matrice rocheuse environnante. En effet, l'infiltration de l'eau à travers les formations géologiques calcaires de l'oued entraîne la dissolution de la série carbonatée, enrichissant ainsi l'eau souterraine en minéraux basiques alcalins (tels que les bicarbonates, le calcium et le magnésium). Cet enrichissement minéral permanent agit comme un régulateur naturel (effet tampon), neutralisant l'acidité des eaux de pluie infiltrées et déplaçant le pH vers une légère alcalinité, ce qui justifie l'absence d'un effet de dilution simple tel qu'observé dans les autres puits.

En conclusion, toutes les valeurs de pH enregistrées dans l'ensemble des stations de mesure s'intègrent parfaitement dans la fourchette réglementaire admissible selon le décret exécutif algérien (**JORADP, 2011**) et les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (**OMS, 2022**). Cela confirme la bonne qualité de ces eaux, leur équilibre acido-basique ainsi que leur potabilité pour la consommation humaine.

1.3. Conductivité :

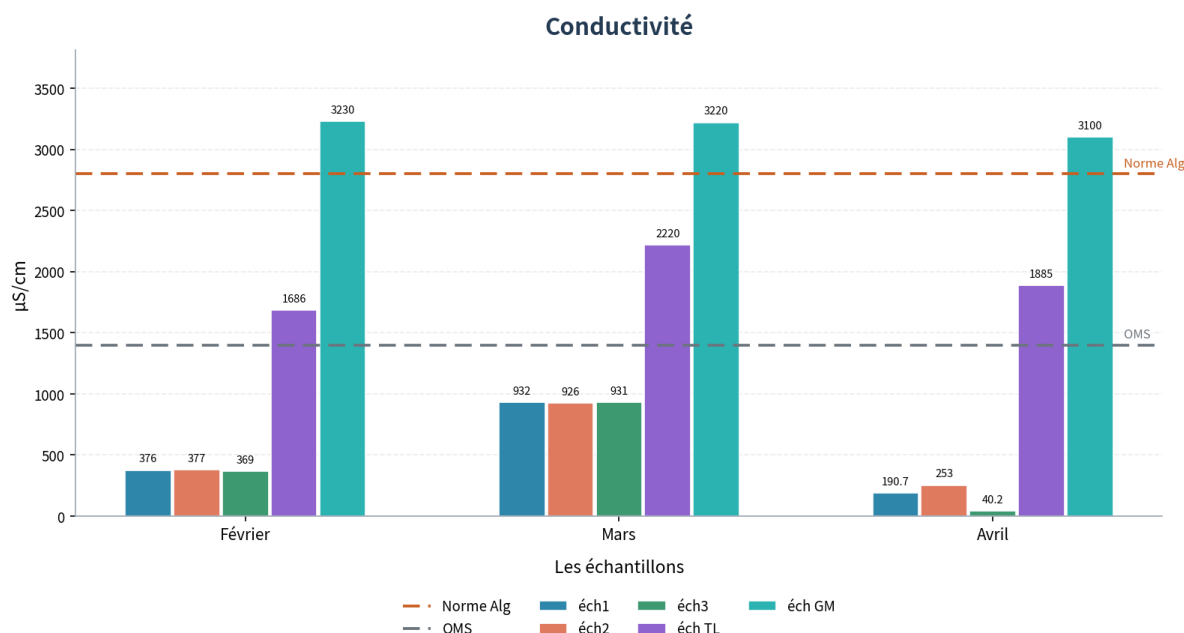


Figure 15 : Résultats d'analyses de conductivité de l'eau

La figure 15 présente les résultats de la conductivité électrique. La valeur la plus élevée

(Soit 3230 $\mu\text{S/cm}$) a été enregistrée pour l'échantillon éch GM en février mars et avril tandis que la valeur la plus faible durant les 3 mois est 40,2 $\mu\text{S/cm}$) enregistré pour l'échantillon éch3 en avril.

Sur le plan mensuel, les échantillons éch3, éch1 et éch2 présentent une augmentation progressive des valeurs entre février et mars (de 369, 376 et 377 $\mu\text{S/cm}$) à (931, 932 et 926 $\mu\text{S/cm}$) respectivement suivie d'une diminution marquée au mois d'avril (soit: 40,2–190,7 et 253 $\mu\text{S/cm}$). Cette diminution pourrait être liée à l'apport des eaux de précipitation et de fonte des neiges, entraînant une diminution de la concentration en sels dissous (Drever, 1988).

Les échantillons éch TL et éch GM montrent des valeurs de conductivité relativement élevées durant toute la période d'étude, variant entre 1686 et 3230 $\mu\text{S/cm}$. Ces valeurs traduisent une forte minéralisation des eaux, probablement liée à la dissolution des sels minéraux présents dans les roches et les sols traversés par l'eau (Hem, 1985 ; Rodier, 2009 ; Al-Hayek, 1989 ; Hussein, 2012).

En comparaison avec l'étude réalisée par Houda Zaïdi dans la région d'Oum El Bouaghi, où les valeurs de conductivité variaient entre 1354 et 3147 $\mu\text{S/cm}$, souvent supérieures à la norme admissible de 1500 $\mu\text{S/cm}$ (Al-Kindi, 2009 ; Belghiti et al., 2013), les résultats obtenus au niveau des échantillons éch TL et éch GM apparaissent similaires, avec des valeurs atteignant 3230 $\mu\text{S/cm}$. En revanche, les échantillons éch1, éch2 et éch3 présentent des valeurs plus faibles, notamment au mois d'avril.

Concernant la conformité aux normes nationales et internationales (JORA ; OMS, 2011), les échantillons éch1, éch2, éch3 et éch TL restent conformes aux limites recommandées. En revanche, l'échantillon éch GM dépasse la valeur maximale admissible (2800 $\mu\text{S/cm}$), avec des valeurs comprises entre 3100 et 3230 $\mu\text{S/cm}$. Ces résultats indiquent que les échantillons éch1, éch2 et éch3 présentent une qualité satisfaisante en termes de conductivité électrique, tandis que l'échantillon éch GM se caractérise par une minéralisation élevée.

1.4. Turbidité

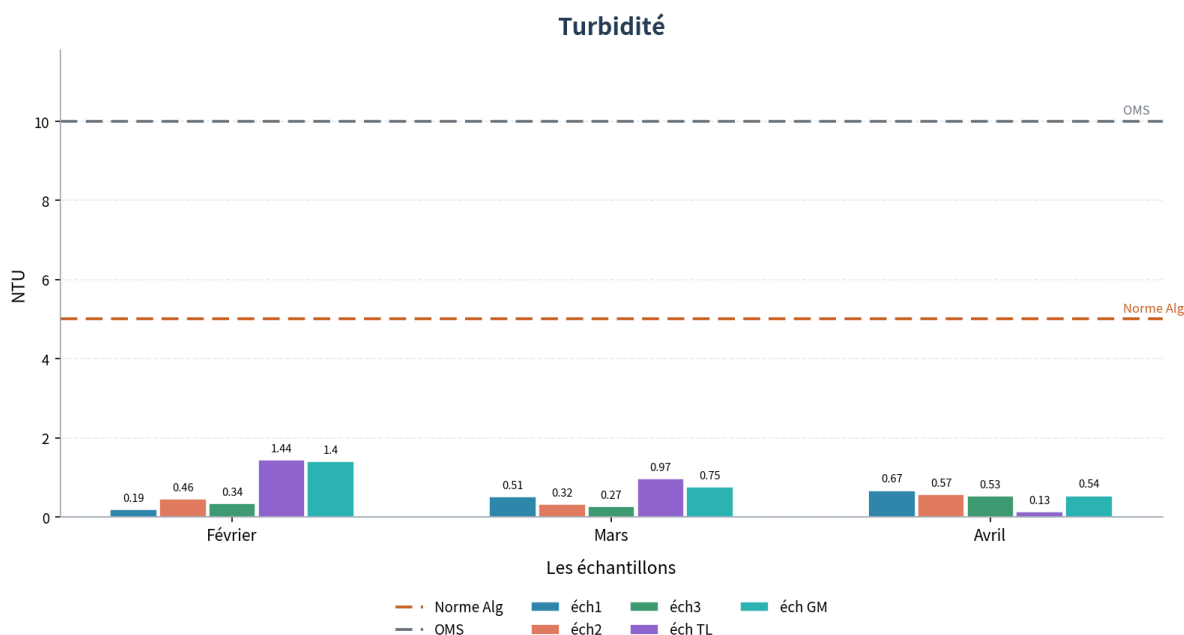


Figure 16 : Résultats d'analyses de Turbidité de l'eau

La figure 16 illustre les résultats d'analyse de la turbidité. La valeur la plus élevée (1,44 NTU) a été enregistrée au niveau des stations éch TL et éch GM au mois de février, tandis que la valeur la plus faible (0,13 NTU) a été observée dans l'échantillon éch TL au mois d'avril.

Sur le plan mensuel, les échantillons éch1, éch2 et éch3 présentent des valeurs relativement stables en février et mars (comprises entre 0,32 et 0,51 NTU), suivies d'une légère augmentation en avril (0,57–0,67 NTU). Cette augmentation pourrait être attribuée au ruissellement superficiel généré par les précipitations et la fonte des neiges, entraînant l'apport de particules fines et de matières en suspension vers les eaux de surface (**Castany, 1982**).

En revanche, les échantillons éch TL et éch GM enregistrent les valeurs les plus élevées en février et mars (1,44 NTU), suivies d'une diminution en avril jusqu'à 0,13 NTU. Cette diminution pourrait s'expliquer par la diminution de la charge en particules en suspension et leur dépôt progressif dans le lit du cours d'eau, favorisé par la stabilité relative du milieu aquatique (**Hiemenz & Rajagopalan, 1997**).

En comparaison avec l'étude réalisée par Houda Zaïdi dans la région d'Oum El Bouaghi, où les valeurs de turbidité variaient entre 0,199 et 3 NTU (**Al-Rimaoui, 2004 ; Al-Saadi, 2006**), les résultats obtenus (0,13–1,44 NTU) restent dans une gamme comparable, voire inférieure, ce qui indique une qualité globalement satisfaisante des eaux en termes de turbidité.

Concernant la conformité aux normes, tous les échantillons respectent les recommandations de l'OMS et les normes algériennes (limite maximale de 5 NTU pour l'eau potable), la valeur maximale enregistrée (1,44 NTU) restant largement inférieure au seuil admissible.

1.5. Salinité :

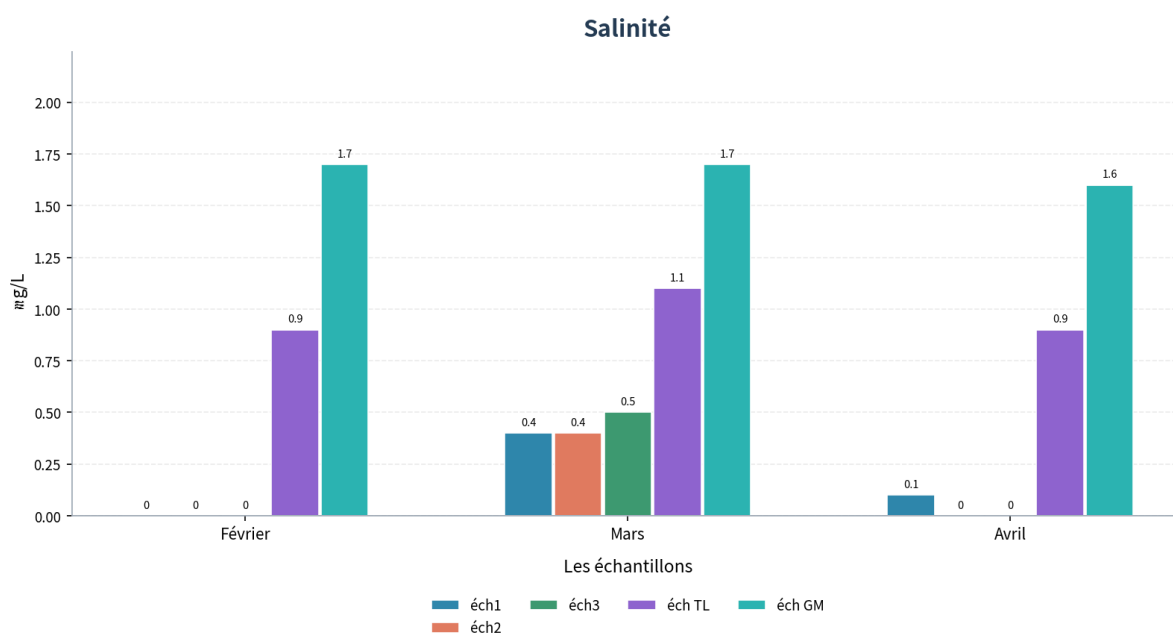


Figure 17 : Résultats d’analyses de salinité de l’eau

La figure 17 illustre les résultats d’analyse de la salinité. La valeur la plus élevée (1,7 mg/L) a été enregistrée au niveau des stations éch TL et éch GM, tandis que la valeur la plus faible (0 mg/L) a été observée dans les échantillons éch1, éch2 et éch3 au cours des mois de février et avril.

Sur le plan mensuel, les échantillons éch1, éch2 et éch3 présentent une salinité quasi nulle en février (0 mg/L), une légère augmentation en mars (0,4–0,5 mg/L), puis une diminution en avril avec des valeurs proches de 0 mg/L (0 à 0,1 mg/L pour éch1). Cette diminution pourrait être liée à l’apport d’eaux de précipitation et de fonte des neiges, entraînant une dilution des eaux souterraines et une baisse de la concentration en sels dissous (**Rodier et al., 2009**).

En revanche, les échantillons éch TL et éch GM présentent des valeurs relativement élevées et variables (comprises entre 0,9 et 1,7 mg/L) durant la période d’étude. Cette situation peut s’expliquer par la proximité de ces stations avec le cours d’eau, les rendant sensibles aux apports issus du lessivage des sols lors des épisodes pluvieux. En effet, les eaux de pluie dissolvent une partie des sels présents dans les sols et les formations géologiques environnantes, puis les transportent par ruissellement ou infiltration vers les zones proches du lit du cours d’eau, ce qui contribue à l’augmentation de la concentration en sels dissous (**Rodier et al., 2009**).

En ce qui concerne la conformité aux normes, les échantillons éch1, éch2 et éch3 respectent les recommandations nationales et internationales (**JORA, OMS**), qui fixent généralement un seuil indicatif inférieur à 1 mg/L pour les eaux douces. En revanche, les échantillons éch TL et éch GM dépassent parfois cette limite, notamment avec une valeur maximale de 1,7 mg/L, ce qui indique une salinité relativement élevée au niveau de ces stations.

1.6. Matière en suspension :

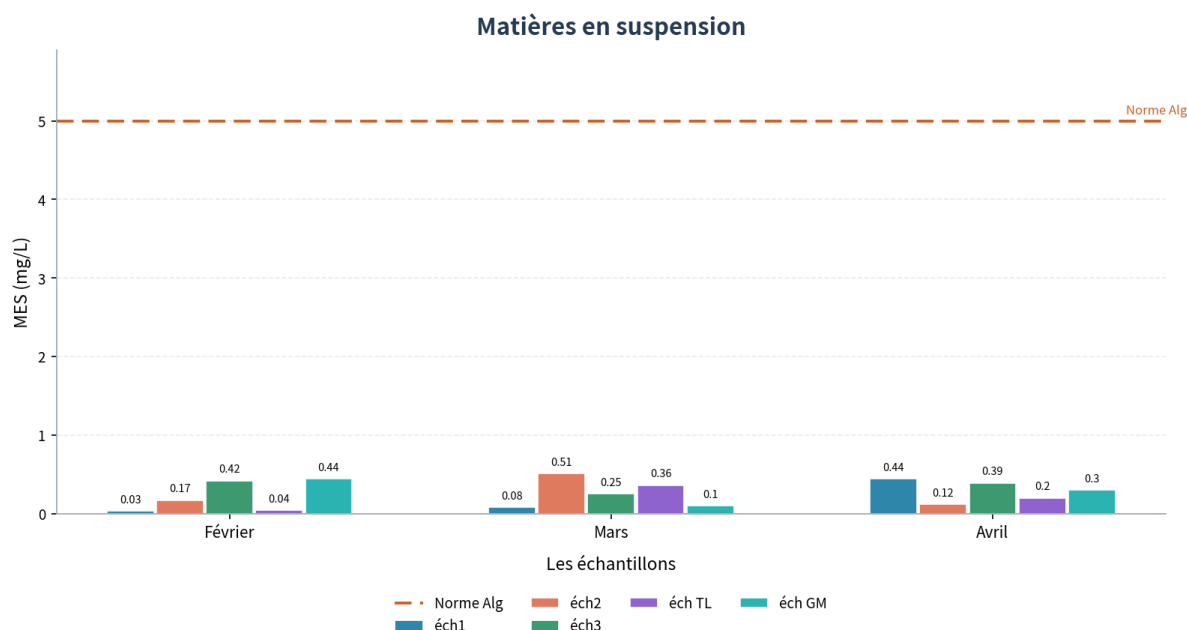


Figure 18 : Résultats d’analyses de MES de l’eau

La figure 18 illustre les résultats d’analyse des matières en suspension. La valeur la plus élevée (0,51 mg/L) a été enregistrée dans les échantillons éch1, éch2 et éch3 au mois de mars, tandis que la valeur la plus faible (0,03 mg/L) a été observée dans ces mêmes échantillons au mois de février.

Sur le plan mensuel, les échantillons éch1, éch2 et éch3 présentent un pic en mars (0,51 mg/L), suivi d’une légère diminution en avril. Cette augmentation pourrait être attribuée au début des activités agricoles (labour et semis) ainsi qu’à l’influence du ruissellement superficiel lié aux précipitations et à la fonte des neiges, favorisant la mobilisation des particules fines du sol et leur transfert vers les eaux souterraines peu profondes à travers les formations superficielles (Castany, 1982). La diminution observée en avril pourrait s’expliquer par la réduction du transport des particules en surface, liée à la diminution des apports solides et à la stabilisation progressive des conditions environnementales.

Au niveau des stations éch TL et éch GM, des valeurs notables de matières en suspension ont été enregistrées en février et mars (0,36–0,44 mg/L), suivies d’une diminution en avril (0,2 mg/L pour éch TL). Cette variabilité peut s’expliquer par la proximité de ces stations avec le cours d’eau, les rendant sensibles aux apports issus du ruissellement superficiel lors des épisodes pluvieux. En effet, les eaux de pluie entraînent les particules fines issues des sols et des formations environnantes vers les zones proches du lit du cours d’eau, ce qui contribue à l’augmentation des concentrations en matières en suspension. Par ailleurs, la diminution observée en avril pourrait être liée au processus naturel de sédimentation des particules en suspension dans le milieu aquatique (Castany, 1982).

En ce qui concerne la conformité aux normes, toutes les valeurs obtenues (0,03–0,51 mg/L) restent conformes aux recommandations des normes nationales algériennes (**JORA, 2011**) ainsi qu'aux directives de l'OMS pour l'eau potable, ce qui indique une bonne qualité des eaux en termes de matières en suspension.

1.7. Résidu sec :

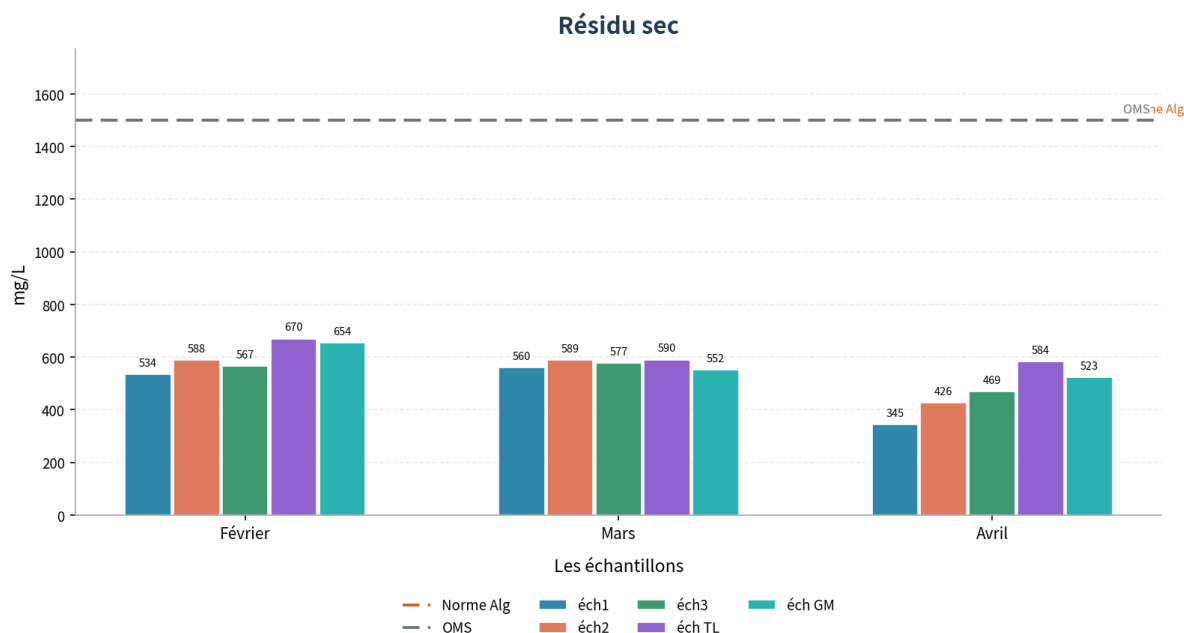


Figure 19 : Résultats d'analyses de résidu sec de l'eau

La figure 19 illustre les résultats d'analyse du résidu sec. La valeur la plus élevée (670 mg/L) a été enregistrée dans l'échantillon éch TL au mois de février, tandis que la valeur la plus faible (345 mg/L) a été observée dans l'échantillon éch1 au mois d'avril.

Sur le plan mensuel, les échantillons éch1, éch2 et éch3 présentent des valeurs relativement stables entre février et mars (comprises entre 534 et 589 mg/L), suivies d'une diminution en avril (345–469 mg/L). Cette diminution pourrait être liée à l'apport d'eaux de précipitation et de fonte des neiges, entraînant une baisse de la concentration en sels et minéraux dissous dans les eaux souterraines (**Rodier et al., 2009 ; Drever, 1988**).

En revanche, les échantillons éch TL et éch GM présentent des valeurs relativement élevées et stables durant toute la période d'étude, variant entre 523 et 670 mg/L. Les valeurs relativement élevées observées dans ces échantillons peuvent être liées à la proximité de ces stations avec le cours d'eau, favorisant l'apport de sels minéraux provenant des sols et des formations géologiques environnantes (**Hem, 1985 ; Rodier et al., 2009 ; Castany, 1982**).

En ce qui concerne la conformité aux normes, tous les échantillons restent conformes aux recommandations nationales et internationales (**JORA, OMS**), la valeur maximale enregistrée (670 mg/L) restant largement inférieure à la limite admissible (1500 mg/L selon ISO, 2018), ce qui indique une qualité globalement satisfaisante des eaux en termes de résidu sec.

1.8. Dureté total :

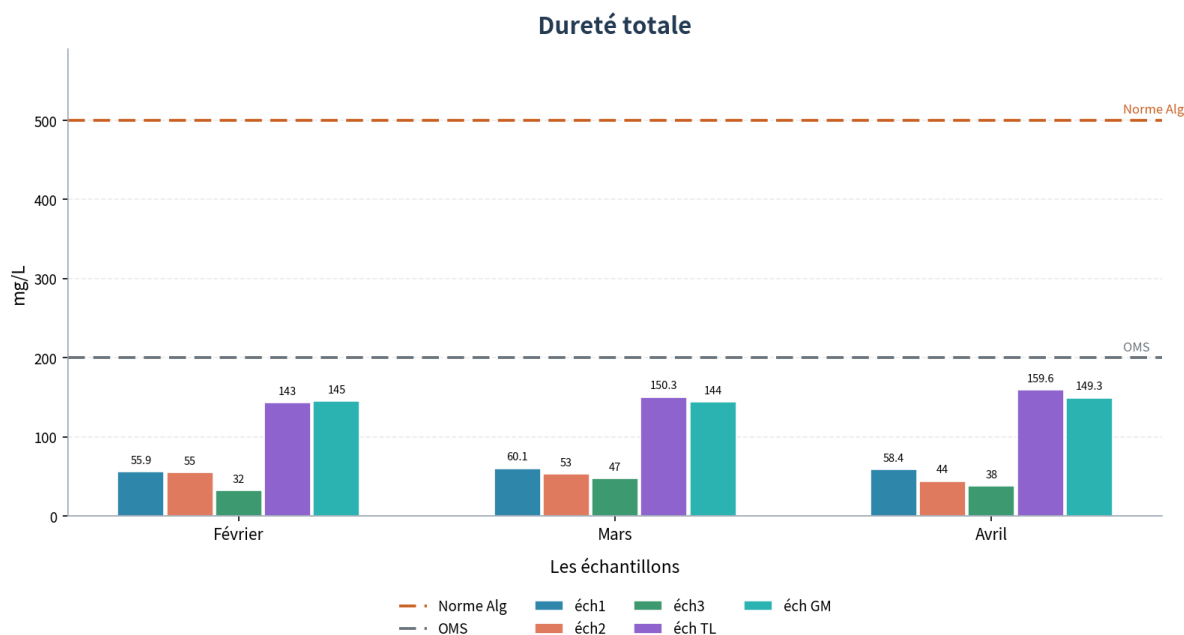


Figure 20 : Résultats d'analyses de dureté total des eaux

Les résultats de l'analyse de la dureté totale (figure 20) montrent une variation nette entre les différentes stations étudiées. La valeur maximale (159,6 mg/L) a été enregistrée au niveau de (éch TL) au mois d'avril, tandis que la valeur minimale (32 mg/L) a été mesurée dans le troisième puits (éch3) durant la même période.

La comparaison mensuelle révèle qu'en février, les valeurs des puits (éch1, éch2 et éch3) variaient entre 32 et 60,13 mg/L, tandis que les échantillons (éch TL et éch GM) présentaient des valeurs relativement proches. En mars, la situation est restée globalement similaire, avec une stabilité relative des puits et une légère augmentation au niveau des deux échantillons. En avril, une divergence marquée a été observée : les valeurs des puits ont diminué de manière significative jusqu'à atteindre 38 mg/L, probablement sous l'effet de la dilution par les eaux pluviales, tandis que les valeurs ont fortement augmenté pour atteindre respectivement 159,6 mg/L et 149,3 mg/L dans (éch TL et éch GM).

Cette augmentation peut être expliquée par les caractéristiques hydrogéologiques de la région, où les eaux circulantes favorisent la dissolution des minéraux présents dans les formations calcaires environnantes, notamment les composés riches en calcium et en magnésium. De plus, les phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols peuvent contribuer à l'enrichissement des eaux en sels minéraux, conformément aux mécanismes décrits par Rodier.

En comparaison avec l'étude réalisée par Zaidi Houda dans la région d'Oum El Bouaghi, où les valeurs de la dureté totale variaient entre 200 et 580 mg/L (après conversion des degrés français), les valeurs obtenues dans notre étude (38–159,6 mg/L) demeurent nettement inférieures. Cette différence pourrait être liée aux particularités lithologiques et hydrogéologiques propres à chaque région, malgré leur appartenance commune aux Hauts Plateaux algériens.

Enfin, malgré ces variations, l'ensemble des échantillons analysés reste conforme aux normes algériennes de potabilité (**JORADP, 2011**) ainsi qu'aux recommandations de l'OMS (2011), puisque toutes les valeurs enregistrées demeurent largement inférieures à la limite maximale admissible fixée à 500 mg/L.

1.9. Chlorure :

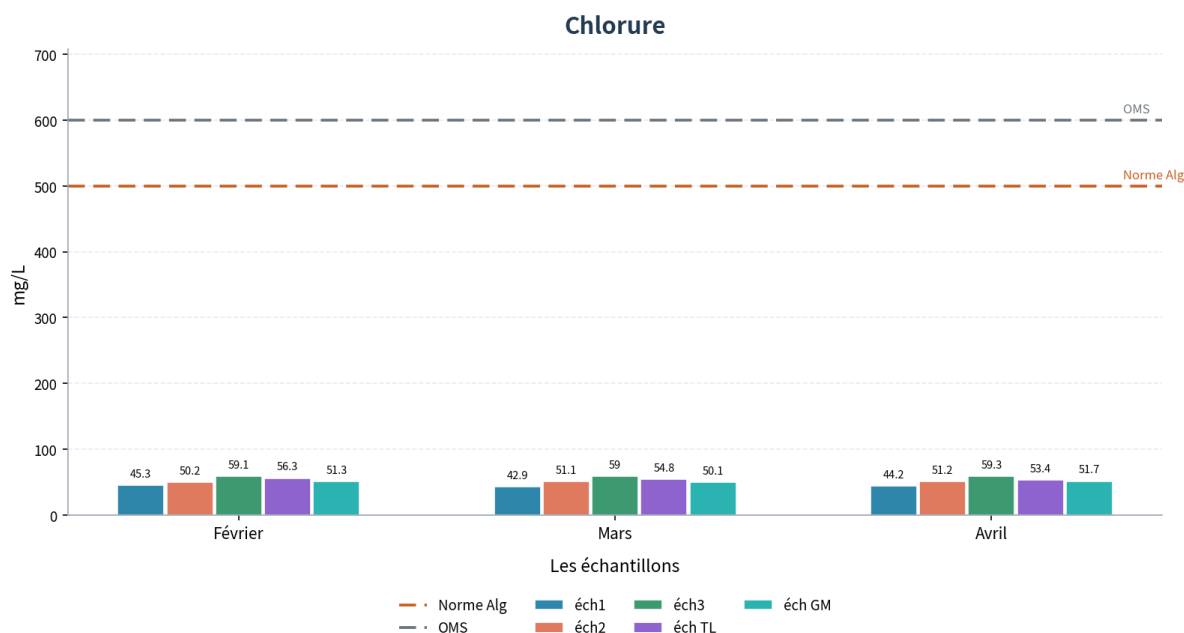


Figure 21 : Résultats d'analyses de chlorure de l'eau

La figure 21 présente les résultats des chlorures. La valeur la plus élevée (59,33 mg/L) a été enregistrée dans l'échantillon (éch TL) au mois d'avril, tandis que la valeur la plus faible (42,9 mg/L) a été observée dans l'échantillon (éch1) au mois de mars.

Sur le plan mensuel, les concentrations ont varié entre 45,3 et 59,14 mg/L en février, entre 42,9 et 59,03 mg/L en mars, et entre 44,2 et 59,33 mg/L en avril, ce qui traduit une relative stabilité des teneurs en chlorures durant toute la période d'étude.

Cette stabilité, ainsi que les faibles concentrations enregistrées, s'expliquent par la faible influence des formations riches en sels et par la nature géologique du bassin hydrogéologique, qui contrôle fortement la composition chimique des eaux, conformément aux travaux de Rodier et Kebir, H.

En comparaison avec l'étude de Houda Zaïdi réalisée dans la région d'Oum El Bouaghi, où des concentrations élevées de chlorures (250 à 350 mg/L) ont été enregistrées en raison de la présence de formations salines, les valeurs obtenues dans notre étude restent nettement inférieures et ne dépassent pas 60 mg/L.

Enfin, l'ensemble des résultats (42,9–59,33 mg/L) est conforme aux normes algériennes relatives à l'eau potable (**JORADP, 2011**) ainsi qu'aux recommandations de l'OMS, car toutes les concentrations mesurées restent largement inférieures à la limite maximale admissible fixée à 500 mg/L, ce qui confirme la bonne qualité des eaux étudiées.

1.10. Matières organique :

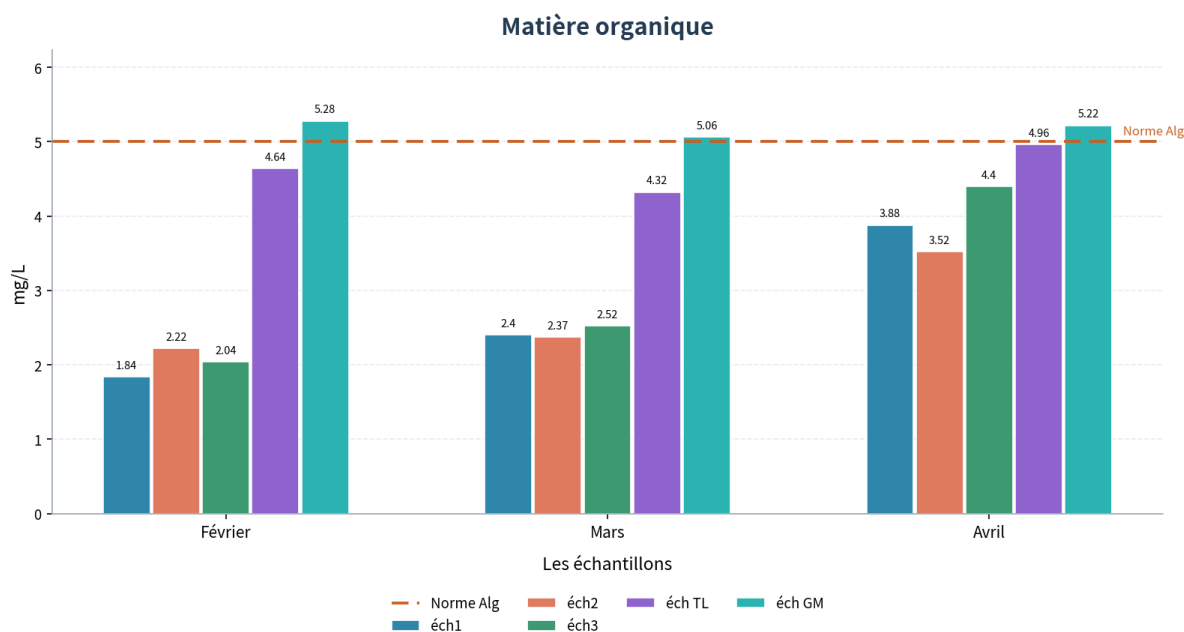


Figure 22 : Résultats d'analyses de matière organique de l'eau

La figure 22 illustre les résultats de l'analyse de la matière organique. La valeur la plus élevée (5,28 mg/L) a été enregistrée dans l'échantillon (éch 2) au mois de février, tandis que la valeur la plus faible (1,84 mg/L) a été mesurée dans l'échantillon (éch 1) durant la même période.

Sur le plan mensuel, les valeurs des échantillons (éch1, éch2, éch3) ont augmenté en avril (2,44 – 3,88 mg/L) par rapport aux mois de février et mars. Cette augmentation peut être expliquée par le ruissellement superficiel, qui entraîne le transport de résidus végétaux et de matières organiques du sol vers les eaux, notamment après les précipitations et la fonte des neiges (Wetzel, 2001 ; Hornberger & Wiberg, 2014).

En revanche, les échantillons (éch TL et éch GM) présentent des valeurs relativement élevées et stables au cours des trois mois (entre 5,06 et 5,22 mg/L). Cette situation pendant les périodes d'écoulement temporaire, où le flux continu des eaux favorise le transport de matières organiques depuis les zones amont et les zones adjacentes par les processus de ruissellement et d'érosion. De plus, l'interaction permanente entre l'eau et le sol le long du lit de l'oued contribue à l'apport de débris végétaux et de matières organiques diverses, ainsi qu'à la remise en suspension des matières organiques déposées au fond, ce qui maintient des niveaux relativement élevés de matière organique dans ces échantillons.

Enfin, bien que les valeurs des échantillons (éch1, éch2, éch3) restent inférieures à 5 mg/L et que celles des échantillons (éch TL et éch GM) soient légèrement plus élevées, l'ensemble des échantillons demeure conforme aux normes algériennes (JORA, 2011) et aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2017), toutes les valeurs restant largement inférieures à la limite maximale admissible (20 mg/L), ce qui indique une bonne qualité de l'eau et son aptitude à la consommation.

1.11. Sodium :

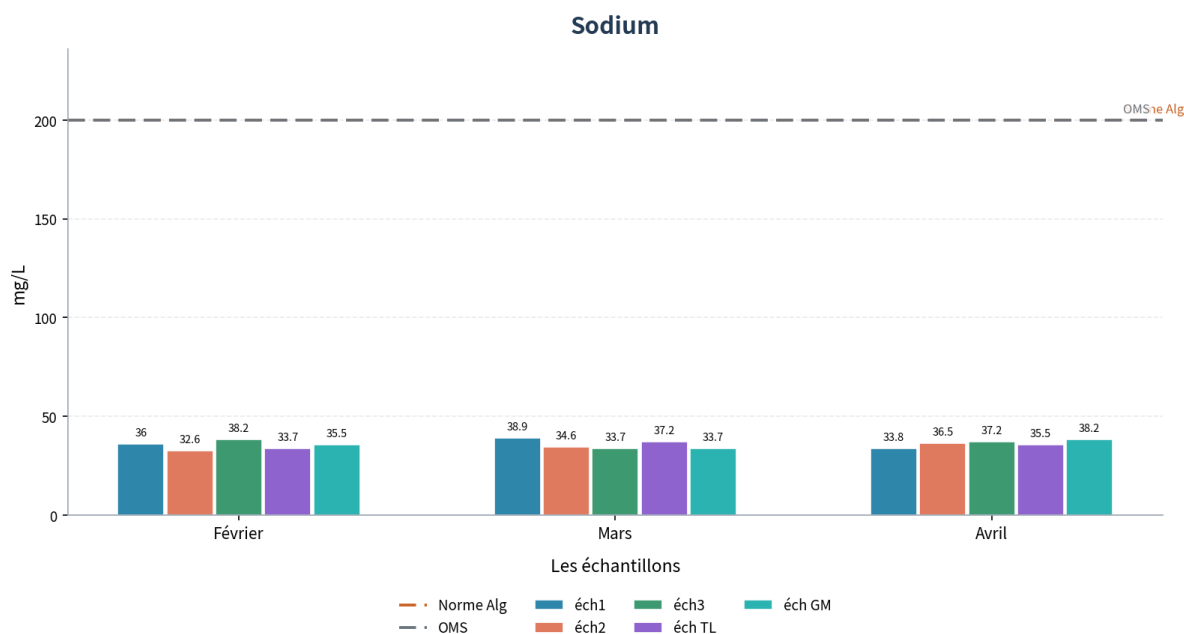


Figure 23 : Résultats d'analyses de sodium de l'eau

La figure 23 illustre les résultats de l'analyse du sodium. Les concentrations mesurées présentent une grande stabilité spatio-temporelle, avec une valeur maximale de 38,9 mg/L et une valeur minimale de 32,6 mg/L, enregistrées durant les mois de février, mars et avril.

De manière générale, les teneurs en sodium restent faibles et varient dans un intervalle étroit (32,6–38,9 mg/L) pour l'ensemble des stations et des périodes étudiées.

Selon Belkhiri (2011), le sodium dans les eaux naturelles peut provenir de l'altération des roches et du lessivage des formations géologiques contenant des éléments sodiques.

En comparaison avec l'étude réalisée par Bouderbala dans la région de Chlef, où les concentrations en sodium variaient entre 85 et 210 mg/L, les valeurs obtenues dans notre étude restent nettement plus faibles.

Enfin, l'ensemble des échantillons analysés est conforme aux normes nationales algériennes (JORADP, 2011) et aux recommandations de l'OMS, puisque les concentrations restent inférieures à la limite admissible de 200 mg/L.

1.12. Nitrates :

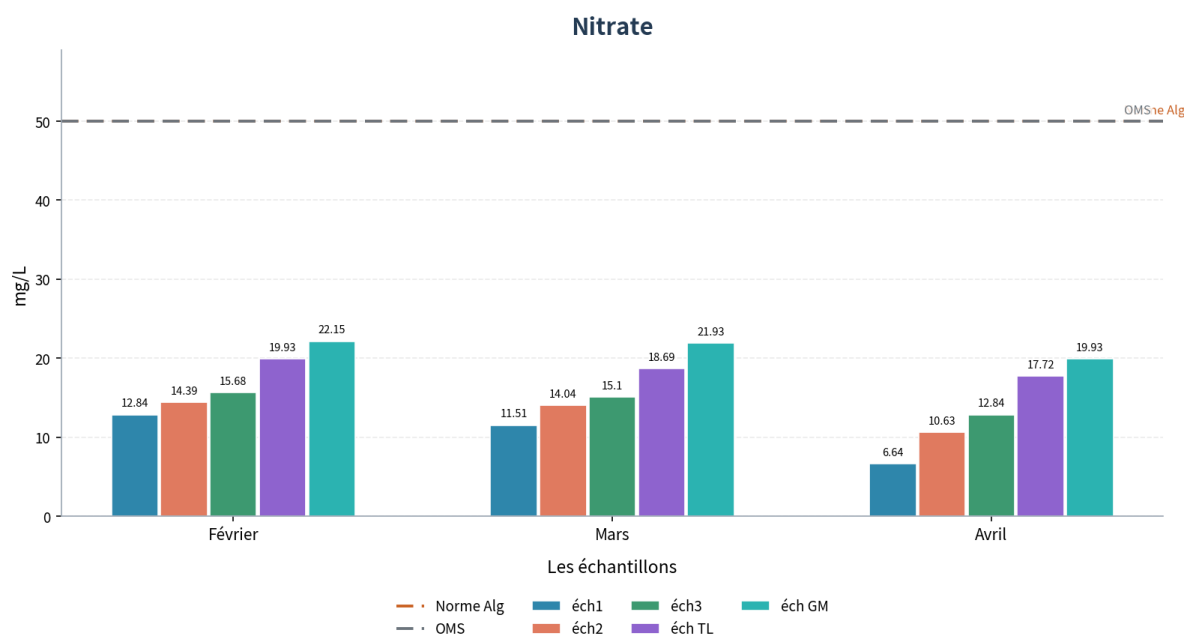


Figure 24 : Résultats d'analyses de nitrate de l'eau

La figure 24 illustre les résultats des nitrates. La concentration maximale (22,15 mg/L) a été enregistrée dans l'échantillon (éch GM) au mois de février, tandis que la concentration minimale (6,64 mg/L) a été observée dans l'échantillon (éch1) au mois d'avril.

Sur le plan mensuel, les concentrations mesurées dans les puits (éch1, éch2 et éch3) variaient entre 11,51 et 15,68 mg/L durant les mois de février et mars. En avril, une diminution a été observée, avec des valeurs comprises entre 6,64 et 12,84 mg/L, probablement liée à un effet de dilution dû aux précipitations et à la recharge des nappes.

En revanche, les stations (éch TL et éch GM) ont présenté des concentrations plus élevées (18,69–22,15 mg/L). Cette augmentation pourrait s'expliquer par le ruissellement superficiel, qui favorise le transport des composés azotés d'origine organique et agricole, notamment les déjections animales et les apports diffus issus des sols agricoles. Ces variations peuvent également être influencées par les caractéristiques hydrogéologiques locales (**Kebir, H., 2022**).

Comparativement à l'étude de Zaidi Houda réalisée dans la région d'Oum El Bouaghi, où des concentrations comprises entre 26,85 et 78,16 mg/L ont été rapportées en raison d'une activité agricole intensive, nos résultats demeurent relativement faibles et stables, ce qui suggère un impact anthropique limité dans la zone d'étude.

Enfin, l'ensemble des valeurs obtenues est conforme aux normes algériennes (**Journal Officiel de la République Algérienne, 2011**) ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (**OMS, 2011**), puisqu'elles restent inférieures à la limite maximale admissible de 50 mg/L.

1.13. Nitrite :

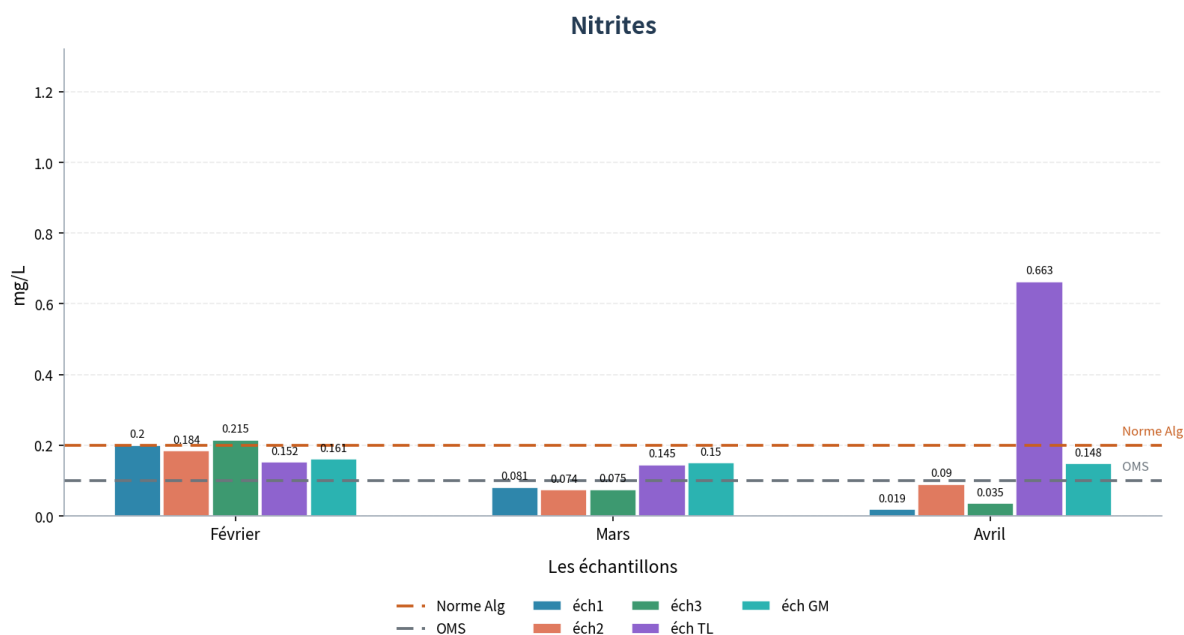


Figure 25 : Résultats d'analyses de nitrite de l'eau

La figure 25 illustre les résultats des nitrites (NO_2^-). La concentration maximale (0,663 mg/L) a été enregistrée dans l'échantillon (éch TL) au mois d'avril, tandis que la concentration minimale (0,019 mg/L) a été observée dans l'échantillon (éch1) durant la même période.

Sur le plan mensuel, les puits (éch1, éch2 et éch3) ont présenté des concentrations relativement stables, comprises entre 0,07 mg/L et 0,215 mg/L durant les mois de février et mars, suivies d'une légère diminution en avril. En revanche, l'échantillon (éch TL) a montré une augmentation importante en avril.

Cette augmentation peut s'expliquer par les conditions hydrodynamiques et environnementales locales, notamment la présence de matière organique et les apports liés au ruissellement, favorisant les processus de dégradation de l'azote. Les nitrites, intermédiaires du cycle de l'azote, peuvent s'accumuler lorsque les conditions d'oxygénation sont insuffisantes, perturbant ainsi l'équilibre entre nitrification et dénitrification (**Rodier, 2009**).

En comparaison avec l'étude de Houda Zaïdi réalisée dans la région d'Oum El Bouaghi, où les concentrations variaient entre 0,01 mg/L et 0,04 mg/L, les valeurs obtenues dans notre étude sont globalement plus élevées, en particulier dans l'échantillon (éch TL), qui présente un pic notable.

Enfin, la majorité des échantillons restent conformes aux normes algériennes de potabilité (**Journal officiel de la République algérienne, 2011**) ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2011). Toutefois, un dépassement notable de la valeur guide (0,2 mg/L) a été observé dans l'échantillon (éch TL) en avril, avec une valeur de

0,663 mg/L, soit plus de trois fois le seuil admissible. Ce dépassement peut être attribué à des conditions hydrodynamiques locales favorisant l'accumulation de matière organique et perturbant l'équilibre nitrification/dénitrification. Il convient de surveiller ce site régulièrement. Malgré ce dépassement ponctuel, les autres échantillons présentent globalement une qualité satisfaisante vis-à-vis des nitrites.

1.14. Sulfate :

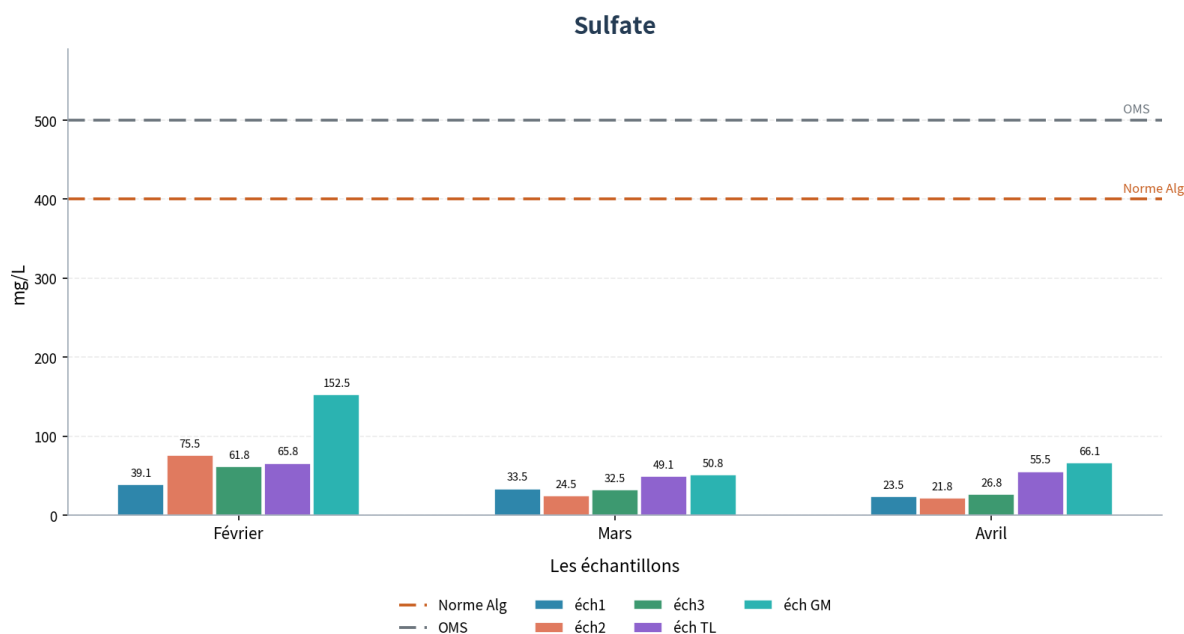


Figure 26 : Résultats d'analyses de sulfate de l'eau

La figure 26 illustre les résultats des sulfates, où la valeur la plus élevée (152,47 mg/L) a été enregistrée au mois de février au niveau de la station (éch GM), tandis que la valeur la plus faible (21,8 mg/L) a été observée au mois d'avril au niveau de la même station. Sur le plan mensuel, on observe en février un classement décroissant des valeurs comme suit : 152,47 (éch GM), 75,5 (éch 2), 65,8 (éch TL), 61,8 (éch 3), 39,15 (éch 1) mg/L.

En mars, toutes les valeurs ont diminué par rapport à février, avec une fourchette allant de 135 (éch TL) à 23,5 (éch GM) mg/L. En avril, une légère augmentation est observée au niveau des stations (éch GM et éch TL), tandis que la baisse se poursuit au niveau des puits (éch 1, éch 2, éch 3).

Ce comportement s'explique par le phénomène de lessivage naturel des formations superficielles environnantes, où les eaux de pluie et la fonte des neiges dissolvent les minéraux sulfatés présents dans le sol (Rodier, 2009 ; Bendaoud, 2015). En comparaison avec l'étude de Bendaoud (2015) à Batna, qui a rapporté des valeurs atteignant 1004 mg/L dans le forage de M'doukal, notre zone présente une minéralisation beaucoup plus faible, ce qui reflète l'absence de formations gypseuses étendues.

Enfin, l'ensemble des résultats est conforme aux normes nationales algériennes (JORA, 2011 : 400 mg/L) ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (500 mg/L), ce qui confirme la bonne qualité des eaux vis-à-vis des sulfates.

1.15. Phosphate :

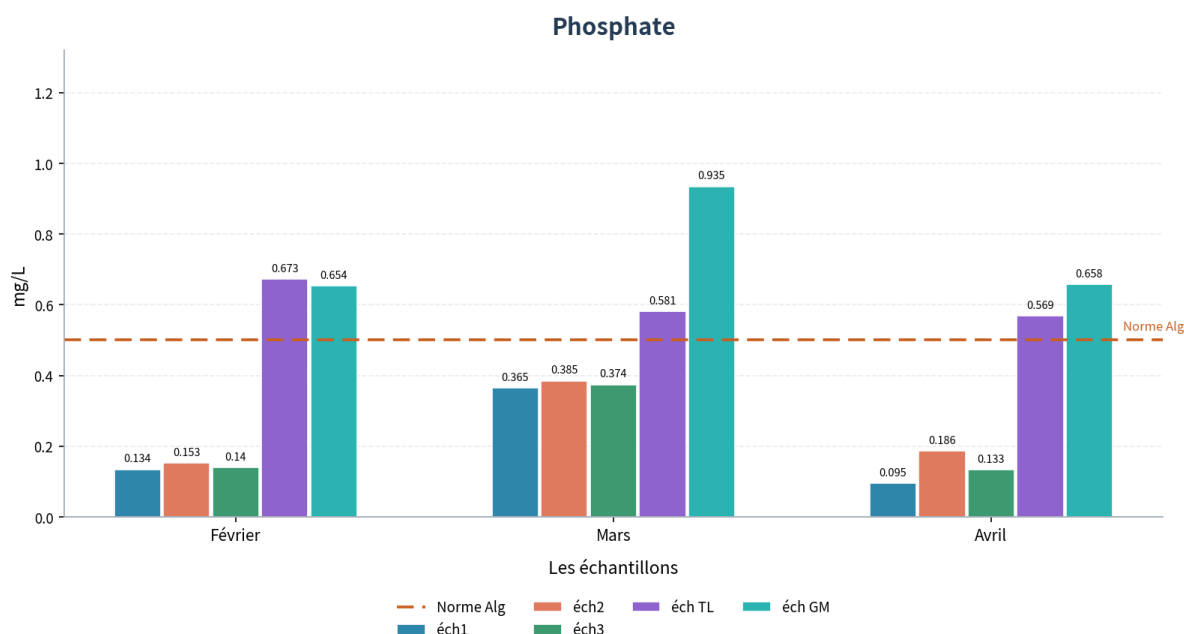


Figure 27: Résultats d'analyses de phosphate de l'eau

La figure 27 illustre les résultats de l'analyse des phosphates, où la concentration maximale (0,673 mg/L) a été enregistrée dans l'échantillon (éch 1) au mois d'avril, tandis que la concentration minimale (0,134 mg/L) a été observée dans le même échantillon au mois de février.

Sur le plan mensuel, les échantillons (éch 1, éch 2 et éch 3) ont présenté des concentrations relativement faibles durant les mois de février et mars, comprises entre 0,134 et 0,5 mg/L, suivies d'une augmentation en avril, où l'échantillon (éch 1) a atteint une valeur de 0,673 mg/L. En revanche, les échantillons (éch TL et éch GM) ont enregistré des concentrations plus élevées, dépassant parfois la valeur guide de 0,5 mg/L, notamment 0,5 mg/L en février et 0,593 mg/L en avril.

La diminution observée en avril dans certains échantillons peut être attribuée à l'effet de dilution provoqué par les précipitations et la fonte des neiges. En revanche, les concentrations plus élevées observées dans les échantillons (éch TL et éch GM) peuvent s'expliquer par l'accumulation de matières organiques telles que les débris végétaux et les déjections animales dans le lit du cours d'eau. La décomposition de ces matières organiques dans un milieu stagnant et faiblement oxygéné favorise la

libération du phosphore sous forme de phosphates dans les eaux superficielles et les eaux souterraines peu profondes.

Concernant les normes, les concentrations mesurées dans les échantillons restent globalement conformes aux normes algériennes (Journal officiel de la République algérienne) ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé, fixées à 0,5 mg/L. Des dépassements ponctuels ont été relevés dans plusieurs échantillons : dans l'échantillon (éch 1) en avril (0,673 mg/L), ainsi que dans les échantillons (éch TL et éch GM) avec des valeurs atteignant 0,593 mg/L. Ces dépassements demeurent limités et pourraient être liés à des apports naturels (décomposition de matière organique, lessivage des sols) ou à des influences saisonnières. Dans l'ensemble, la qualité des eaux étudiées reste acceptable vis-à-vis des phosphates, bien qu'une surveillance périodique de ces sites soit recommandée.

Paramètres bactériologiques

2.1. La flore totale aérobie mésophile (FTAM) :

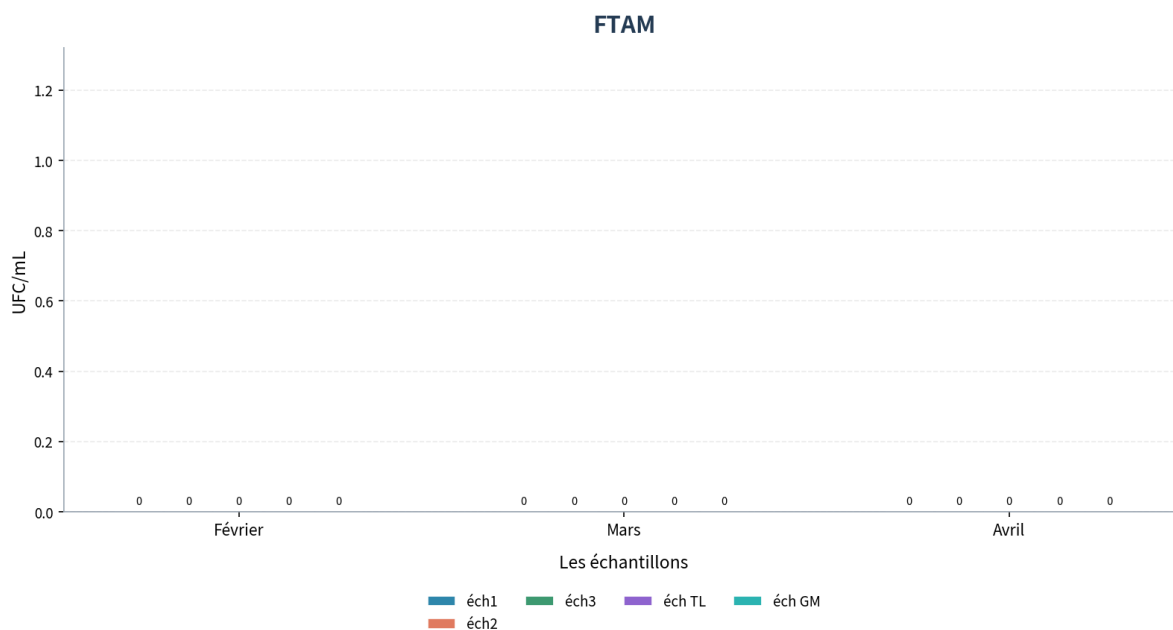


Figure 28: Résultats d'analyses de FTAM de l'eau

L'analyse de l'ensemble des échantillons étudiés a révélé une absence totale de la flore totale aérobie mésophile (FTAM), avec des valeurs nulles (0 UFC/mL) dans tous les points de prélèvement. Ces résultats traduisent une bonne qualité sanitaire des eaux étudiées et indiquent l'absence de contamination microbienne récente.

Cette absence peut s'expliquer par la profondeur des ouvrages de captage, ainsi que par la limitation de l'apport de matières organiques entraînées depuis la surface. En effet, les eaux souterraines profondes subissent un processus naturel de filtration lors de leur passage à travers les différentes couches géologiques, ce qui limite le transfert des micro-organismes vers les nappes souterraines (Zektser et Everett, 2004).

Des résultats similaires ont été rapportés dans plusieurs études, notamment celle de Yasin et al. (2015), qui a mis en évidence l'absence de FTAM dans des eaux de forages profonds, ainsi que celle de Kulinkina et al. (2016), qui a associé la faible charge microbienne aux caractéristiques des eaux souterraines profondes.

Enfin, l'ensemble des résultats obtenus est conforme aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé, la charge bactérienne restant largement inférieure à la valeur guide de 20 UFC/mL, ce qui confirme la bonne qualité microbiologique des eaux étudiées.

2.2. Les coliformes totaux (CT) et fécaux (CF) :

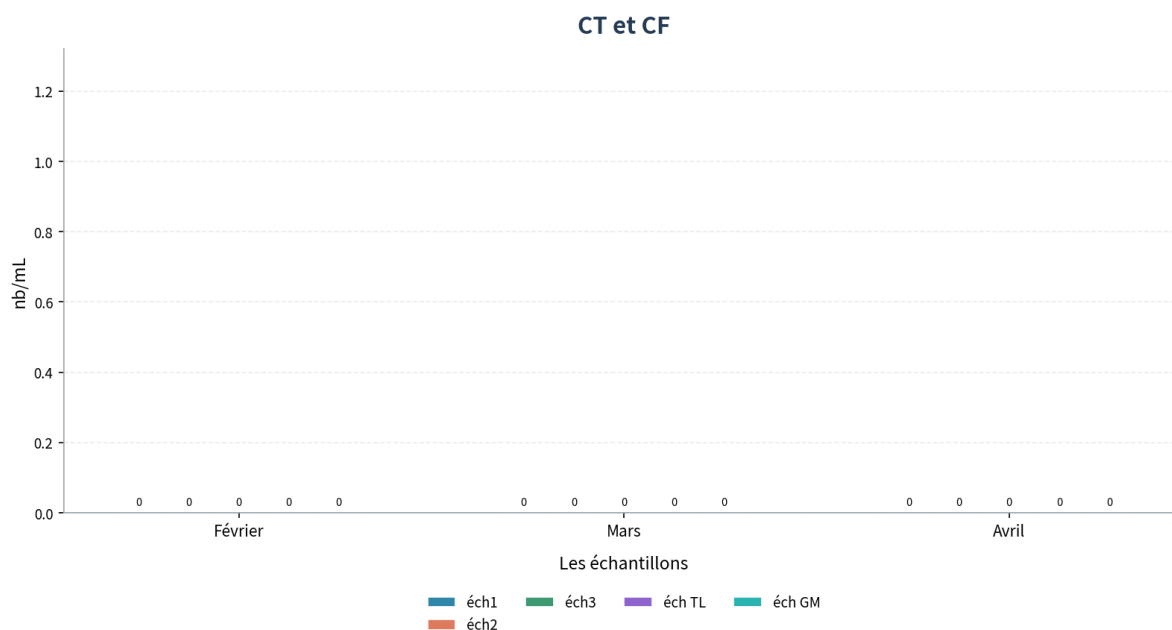


Figure 29: Résultats d'analyses de CT et CF de l'eau

La figure 29 illustre une absence totale de coliformes totaux et de coliformes fécaux dans l'ensemble des échantillons analysés, toutes les valeurs enregistrées étant nulles (0 NPP/100 mL). Ces résultats traduisent une bonne qualité microbiologique des eaux étudiées et indiquent l'absence de contamination d'origine fécale.

Cette absence peut s'expliquer par la protection naturelle des eaux souterraines, assurée par la filtration à travers les couches géologiques, limitant ainsi l'infiltration des micro-organismes provenant des eaux de surface. De plus, la profondeur des ouvrages de captage contribue également à réduire les risques de contamination microbienne.

Les résultats obtenus sont conformes aux normes algériennes (Journal officiel de la République algérienne) ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé, qui exigent l'absence totale de coliformes dans les eaux destinées à la consommation humaine. Selon Payment et Locas (2011), l'absence de ces germes indicateurs dans les eaux souterraines reflète une protection satisfaisante des aquifères vis-à-vis des sources de contamination de surface. Par ailleurs, Ashbolt et al. (2001) soulignent que les coliformes constituent des indicateurs de référence de la qualité microbiologique des eaux, et que leur absence confirme l'aptitude de l'eau à la consommation humaine. Enfin, en comparaison avec d'autres travaux, ces résultats concordent avec ceux d'Odonkor et Ampofo (2013), qui ont également observé une absence de coliformes dans des eaux de forages situés dans des zones faiblement exposées à la pollution anthropique, confirmant ainsi la bonne qualité microbiologique des eaux souterraines.

Conclusion

Conclusion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits et de forages de la région de Bordj Bou Arréridj, en analysant un ensemble de paramètres organoleptiques, physico-chimiques et microbiologiques, et en confrontant les résultats obtenus aux normes algériennes (Décret exécutif n° 11-125) et aux directives de l'OMS.

Sur le plan physico-chimique :

Les résultats des paramètres analysés témoignent d'une qualité globalement acceptable pour la quasi-totalité des échantillons, en conformité avec les valeurs limites réglementaires. Toutefois, le site GM a présenté une minéralisation élevée (conductivité électrique dépassant 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), révélant l'influence des formations géologiques locales et des phénomènes de dissolution des sels. Par ailleurs, les stations TL et GM ont présenté des dépassements de la limite thermique admissible (25 °C), avec des valeurs atteignant 28 °C, les rendant non conformes sur le plan thermique.

Sur le plan bactériologique :

Contrairement aux risques souvent observés dans les nappes superficielles, les analyses microbiologiques ont révélé une qualité excellente et irréprochable. L'absence totale de la flore mésophile aérobie totale (FTAM), des coliformes totaux et des coliformes fécaux (0 UFC/mL) dans l'ensemble des échantillons témoigne d'une bonne protection naturelle des aquifères contre les infiltrations anthropiques directes.

En conclusion, les eaux étudiées présentent une aptitude satisfaisante à la consommation humaine sur le plan microbiologique, bien qu'une attention particulière doive être accordée à la salinité de certaines stations (comme GM).

En guise de recommandations, nous préconisons :

- La mise en place d'un suivi régulier et systématique de la qualité des eaux souterraines sur les quatre saisons afin de surveiller toute évolution temporelle.
- Le renforcement de la protection physique des têtes de puits pour prévenir toute contamination accidentelle future.
- L'extension de cette étude à d'autres communes de la wilaya afin d'établir une cartographie hydrochimique globale.

*Références
bibliographique*

A

- Al-Hayek, N. (1989).** Hydrogéologie des aquifères du bassin de Damas (Syrie) [Thèse de doctorat]. Université de Montpellier.
- Al-Kindi, A. A. (2009).** Water resources in the arid environment. Muscat Academic Press.
- Al-Rimaoui, H. (2004).** Groundwater resources in Jordan. Ministry of Water and Irrigation.
- Al-Saadi, A. (2006).** Water quality assessment in arid regions. Academic Scientific Journal.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005).** Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed.). A.A. Balkema Publishers / CRC Press.
- Asano, T. (Ed.). (1985).** Artificial Recharge of Groundwater. Butterworth-Heinemann.
- Ashbolt, N. J., Grabow, W. O. K., & Snozzi, M. (2001).** Indicators of microbial water quality. In L. Fewtrell & J. Bartram (Eds.), Water quality: Guidelines, standards and health (pp. 289–316). IWA Publishing.

B

- Banks, D., & Robins, N. (2002).** An introduction to groundwater in crystalline bedrock. Geological Survey of Norway.
- Belghiti, M., et al. (2013).** Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines du bassin de Saïss.
- Belhadj, R., & Hamouch, Z. (2020).** Enquête sur la gestion et l'utilisation des ressources en eau : Cas de la wilaya de Bordj Bou-Arredj.
- Belkhiri, L. (2011).** Qualité des eaux de l'aquifère de la plaine de la Seybouse (Est algérien). Larhyss Journal.
- Bendaoud, M. (2015).** Gestion des ressources en eau en milieu aride.
- Bensaci, O., et al. (2008).** Étude de la qualité des eaux souterraines de la région de Sétif.
- Bitton, G. (2011).** Wastewater Microbiology (4e éd.). Wiley-Blackwell.
- Bliefert, C., & Perraud, R. (2012).** Chimie de l'environnement : Air, eau, sols, déchets (2e éd.). De Boeck.
- Bouderbala, A. (2015).** Hydrogéologie et gestion des eaux souterraines en Algérie. OPU.

Référence bibliographique

Bouselsal, B. (2017). Impact de la pollution anthropique sur les eaux souterraines dans le bassin de Constantine.

Buck, R. P., et al. (2002). Measurement of pH. Definition, standards, and procedures. Pure and Applied Chemistry.

C

Cabane, B., & Vuilleumier, R. (2005). La physique de l'eau liquide. Lettre de l'Académie des sciences et du CADAS, (15), 7 p.

Castany, G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod.

Chenah, R., & Torki, A. (2023). Analyse de la qualité physico-chimique des eaux de source dans la région de Bordj Bou Arreridj. Revue Algérienne des Sciences.

D

Dahraoui, A., et al. (2022). Évaluation de la pollution des eaux souterraines dans le bassin de la Soummam. Journal of Water and Environment.

Degrémont. (1989). Memento technique de l'eau (9e éd.). Degrémont.

Dejoux, C. (1988). La pollution des eaux continentales africaines. ORSTOM.

Desjardins, R. (1997). Le traitement des eaux (2e éd.). Edition de l'école polytechnique de Montréal.

Djaballah, O., & Ould-Amer, S. (2006). Caractérisation et cartographie des sols de la région de Bordj Bou Arreridj. Bulletin de l'Institut National d'Agronomie, 25, 47–59.

D'Odonkor, F., & Ampofo, J. A. (2013). Microbial quality of drinking water in rural areas. Journal of

E

Eaufrance. (2014). Pratiques agricoles et nitrates dans les milieux aquatiques. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema).

F

Fadlelmawla, A. A., & Al-Otaibi, M. (2005). Analysis of the groundwater resources and development in the context of sustainability: The case of Kuwait. *Water Resources Management*, 19(5), 467–488.

FAO. (2003). L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation. FAO.

G

Gasmi, B., Bouzid-Lagha, S., & Aouissi, A. (2018). Hydrochemical and bacteriological characterization of the waters of the Chott El Hodna watershed (Algeria). *Larhyss Journal*, 34, 45–62.

Gerard, G. (1999). L'eau: Milieu naturel et maîtrise (Vol. 1). Édition INRA.

H

Hamenni, N., Mederbal, K., et al. (2015). Evaluation of water resources of the Soummam watershed (northern Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), 8687–8698.

Hiemenz, P. C., & Rajagopalan, R. (1997). Principles of colloid and surface chemistry (3rd ed.). Marcel Dekker.

Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014). Hydrogeology: Principles and Practice (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Hornberger, G. M., & Wiberg, P. L. (2014). Elements of physical hydrology. Johns Hopkins University Press

Houben, G. J., et al. (2022). Review: Horizontal, directionally drilled and radial collector wells. *Hydrogeology Journal*, 30(2), 329–357.

Hussein, A. (2012). Gestion des eaux souterraines en zone aride. Éditions Académiques.

I

International Organization for Standardization. (2018). Water quality — Sampling — Part 3: Preservation and handling of water samples (ISO Standard No. 5667-3:2018).

J

Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). (2011). Décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine. Imprimerie Officielle.

Journal Officiel de la République Algérienne. (2014). N°13, 53ème année. Alger.

K

Kebir, H. (2022). Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe de la Mitidja. Revue des Sciences de l'Eau.

Kulinkina, A. V., et al. (2016). Physicochemical parameters affecting the perception of borehole water quality in Ghana. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13(802).

M

MacDonald, A. M., et al. (2009). What impact will climate change have on rural groundwater supplies in Africa? Hydrological Sciences Journal, 54(4), 690–703.

Margat, J. (2006). Les eaux souterraines dans le monde. UNESCO.

Megouaset, L., & Daou, F. (2021). Etude des propriétés des sols dans les agrosystèmes de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Revue des Bio-Ressources, 11(1), 18–29.

N

Nigam, V., Behl, N., & Kanchan, M. C. (2013). Physico-chemical parameters for testing of water - A review. IJPBA, 4(4), 523-527.

O

OMS (Organisation Mondiale de la Santé). (2022). Directives pour la qualité de l'eau de boisson.

P

Patry, N. (2002). La gestion de l'eau. Éditions de l'Est.

Payment, P., & Locas, A. (2011). Pathogens in water: Value and limits of correlation with microbial indicators. *Ground Water*, 49(1), pp. 4–11.

R

Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (Eds.). (2023). Standard methods for the examination of water and wastewater (24th ed.). APHA; AWWA; WEF.

Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau (9e éd.). Dunod.

Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 012019.

S

Salamani, A., & Benaini, M. (2023). Diagnosis of the rainfall–wheat yield relationship in the current and future climate change conditions in Eastern Algeria. *Biosystems Diversity*, 31(2), 112–121.

Satyapal, S., & Shrivastava, K. (2018). Optimization of turbidimetric method for the determination of sulfate in water samples. *Journal of Analytical Chemistry*, 73(4), 345–351.

Skoog, D. A., et al. (2017). Principles of instrumental analysis. Cengage.

Snoeyink, V. L., & Jenkins, D. (1980). Water chemistry. John Wiley & Sons.

U

UNESCO. (2021). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : La valeur de l'eau. Éditions UNESCO.

W

Wetzel, R. G. (2001). Limnology: Lake and river ecosystems (3rd ed.). Academic Press.

World Health Organization (WHO). (2022). Guidelines for drinking-water quality (4th ed. incorporating addenda). WHO.

Y

Yasin, M., Ketema, T., & Bacha, K. (2015). Physico-chemical and bacteriological quality of drinking water of different sources, Jimma zone, Southwest Ethiopia. BMC Research Notes, 8, 541.

Z

Zerouali, A., et al. (2022). Mapping drought characteristics in northern Algerian basins using the ERA5-Land dataset. Scientific Reports, 15, 10578.

Zektser, I. S., & Everett, L. G. (Eds.). (2004). Groundwater resources of the world and their use. UNESCO.

Annexe

Annexe :

Annexe 01 : Normes des paramètres physico-chimiques et bactériologiques

Les tableaux ci-après présentent les valeurs limites réglementaires relatives aux paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau destinée à la consommation humaine, telles qu'elles sont définies par la législation algérienne (**Journal officiel, 2014**) et par les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (**OMS**).

Tableau A.1.1 : Normes de potabilité physico-chimiques — Algérie (Journal officiel, 2014) et OMS (2008)

Paramètre	Normes algériennes	Normes OMS
Ph	6,5 – 8,5	9,2
Température (°C)	25	25
Conductivité (µS/cm)	2800	1400
Salinité (mg/L)	—	—
Turbidité (NTU)	5	10
Résidu sec (mg/L)	1500	1500
Dureté totale (mg/L)	500	200
Matières organiques (mg/L)	5	—
Alcalinité (mg/L)	50	—
Bicarbonate HCO_3^- (mg/L)	—	350
Carbonate CO_3^{2-} (mg/L)	—	350
Sulfate SO_4^{2-} (mg/L)	400	500
Chlorure Cl^- (mg/L)	500	600
Sodium Na^+ (mg/L)	200	200
Nitrite NO_2^- (mg/L)	0,2	0,1
Nitrate NO_3^- (mg/L)	50	50
Phosphate PO_4^{3-} (mg/L)	0,5	—

Tableau A.1.2 : Normes microbiologiques de potabilité (OMS, 2006) — d'après Larbi et Mekkaoui (2011)

Paramètre microbiologique	Unité	Valeur indicative
Flore mésophile aérobie totale (FTAM)	UFC/mL	20
Coliformes totaux	nb/100 mL	0
Coliformes fécaux	nb/100 mL	0

Annexe 02 : Matériel utilisé

L'ensemble du matériel et des équipements mobilisés au cours des analyses physico-chimiques et microbiologiques est listé ci-dessous :

Équipements et instruments :

- Autoclave, bain-marie, balance analytique, bec Bunsen, compteur de colonies.
- Étuve universelle réglable, micropipettes, pH-mètre, thermomètre, plaque chauffante.
- Agitateur vortex, réfrigérant, distillateur, agitateur magnétique, conductimètre, turbidimètre.
- Incubateur, spectrophotomètre UV-Visible.

Verrerie et consommables :

- Pissettes, portoirs, spatules, béchers, entonnoirs, éprouvettes graduées.
- Erlenmeyers, fioles jaugées, flacons, pipettes graduées, pipettes Pasteur, burettes.
- Tubes à essais, boîtes de Pétri.

Paramètres physico-chimiques

Annexe 03 : Détermination de la température

Mode opératoire :

- Verser un volume d'eau représentatif dans un bécher de 250 ml.
- Immerger le thermomètre dans l'échantillon.
- Patienter jusqu'à la stabilisation complète de la colonne de mercure.
- Relever la valeur indiquée, le bulbe du thermomètre restant immergé dans l'eau lors de la lecture.

Annexe 04 : Détermination du pH

Mode opératoire :

- Procéder à l'étalonnage du pH-mètre à l'aide de deux solutions tampons de référence.
- Immerger l'électrode dans l'échantillon d'eau à analyser, dont la température doit être maintenue à 20 °C.
- Lire la valeur de pH affichée à stabilisation.

Remarque : Entre chaque mesure, retirer l'électrode, la rincer soigneusement à l'eau distillée et l'essuyer délicatement avant toute nouvelle utilisation.

Annexe 05 : Détermination de la conductivité électrique

Mode opératoire :

- Rincer la cellule de mesure du conductimètre à plusieurs reprises avec de l'eau distillée afin d'éliminer toute contamination résiduelle.
- Immerger la cellule dans l'échantillon d'eau à examiner, en veillant à son immersion totale.
- Effectuer la mesure et enregistrer la valeur obtenue. Les résultats sont exprimés en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Rodier, 1997).

Annexe 06 : Détermination de la turbidité

Mode opératoire :

- Étalonner le turbidimètre en utilisant de l'eau distillée comme référence (introduite dans la première cuvette).
- Remplir une cuvette de mesure propre avec l'échantillon préalablement homogénéisé ; essuyer soigneusement la paroi extérieure de la cuvette.
- Vérifier l'absence de bulles d'air avant la lecture et effectuer la mesure rapidement.
- La valeur est exprimée directement en Unités de Turbidité Néphélométrique (UTN ou NTU) (Rodier et al., 2005).

Annexe 07 : Détermination de la salinité

Annexe

La salinité est déterminée selon le même protocole opératoire que celui décrit pour la conductivité électrique (voir Annexe 05), en utilisant le mode de lecture approprié de l'appareil.

Annexe 08 : Détermination des matières en suspension (MES)

Mode opératoire :

- Sécher le papier filtre à 105 °C jusqu'à masse constante, puis le peser (P_1).
- Filtrer 10 ml d'eau à analyser sur ce papier filtre.
- Remettre le filtre chargé dans l'étuve à 105 °C jusqu'à séchage total.
- Peser immédiatement après refroidissement en dessiccateur (P_2) (Rodier et al., 1996).

Expression des résultats :

La concentration en matières en suspension est calculée selon la relation :

$$C \text{ (MES)} = (P_2 - P_1) / V \times 1000$$

Avec : C (MES) : concentration des matières en suspension (mg/L) ; P_1 : masse du filtre avant filtration (g) ; P_2 : masse du filtre après filtration et séchage (g) ; V : volume d'échantillon filtré (ml).

Annexe 09 : Détermination du résidu sec

Mode opératoire :

- Prélever un volume représentatif de l'échantillon d'eau à tester et procéder, si nécessaire, à un prétraitement afin d'éliminer les matières volatiles.
- Peser avec précision un récipient propre et préalablement séché ; noter la masse initiale (m_0).
- Introduire l'échantillon dans ce récipient et placer l'ensemble dans une étuve à une température comprise entre 103 et 105 °C pendant une durée suffisante (généralement plusieurs heures) jusqu'à évaporation complète.
- Retirer le récipient de l'étuve, le laisser refroidir à température ambiante en atmosphère sèche, puis le peser à nouveau et noter la masse finale (m_1).

Expression des résultats :

La concentration en résidu sec est calculée par différence de masse et ramenée au volume d'échantillon :

$$\text{Résidu sec (mg/L)} = (m_1 - m_0) \times 1000 / V$$

Annexe

Avec : m_1 = masse du récipient + résidu sec (mg) ;

m_0 = masse du récipient vide (mg) ;

V = volume d'échantillon évaporé (mL).

Annexe 10 : Détermination de la dureté totale

Réactifs :

- Solution d'EDTA à N/50.
- Solution tampon à pH = 10.
- Indicateur coloré : Noir d'Urochrome T dissous dans l'alcool éthylique absolu à 0,4 % (conserver à l'abri de la lumière).

Mode opératoire :

- Introduire 100 ml d'eau à analyser dans une fiole conique.
- Chauffer l'essai à 60 °C.
- Ajouter 5 ml de solution tampon (pH 9,5–10) et quelques gouttes de Noir d'Ériochrome T ; la solution prend une teinte rouge vineuse.
- Titrer avec la solution d'EDTA jusqu'au virage de la couleur rouge vineuse au bleu-vert.
- Vérifier la stabilité du point final par addition d'une goutte supplémentaire d'EDTA.
- Noter le volume V d'EDTA consommé.

Préparation des solutions :

Solution de Noir d'Ériochrome T : dissoudre dans l'alcool éthylique absolu à 0,4 %.

Solution tampon :

Chlorure d'ammonium : 34 g ;

Ammoniaque (d = 0,925) : 285 mL ;

Tartrate double de potassium et sodium : 200 g ;

Eau distillée qsp : 1000 mL.

Solution d'EDTA :

Sel disodique de l'EDTA : 4 g ;

Chlorure de magnésium : 0,1 g ;

Eau distillée qsp : 1000 mL.

Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de 100 mL, la dureté totale est égale à V en degrés français (°F), ou à $2V/10$ en milliéquivalents.

Annexe 11 : Dosage des chlorures

Réactifs :

- Acide nitrique pur.
- Carbonate de calcium pur.
- Solution de chromate de potassium à 10 % : dissoudre 2,5 g de K_2CrO_4 dans 25mL d'eau distillée.
- Solution de nitrate d'argent à 0,1 N : dissoudre 4,21 g de $AgNO_3$ dans 250 mL d'eau distillée.

Mode opératoire (méthode de Mohr) :

- Introduire 100 mL d'eau filtrée dans un erlenmeyer de 250 mL.
- Ajouter 2 à 3 gouttes d'acide nitrique.
- Ajouter une pincée de carbonate de calcium.
- Ajouter 3 gouttes de solution de chromate de potassium à 10 % (indicateur).
- Titrer avec la solution de nitrate d'argent jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre persistante pendant 10 minutes.

Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de 100 mL (V = volume de $AgNO_3$ versé) :

$$[Cl^-] \text{ (mg/L)} = V \times 10 \times 3,55$$

$$[NaCl] \text{ (mg/L)} = V \times 10 \times 5,85$$

Annexe 12 : Dosage de la matière organique

Le dosage de la matière organique est réalisé par permanganatométrie en milieu acide (méthode de l'indice permanganate).

Mode opératoire :

- Prélever 100 mL d'eau à analyser dans un erlenmeyer.
- Ajouter 5 mL d'acide sulfurique dilué et porter à ébullition pendant 1 minute.

Annexe

- Ajouter 15 mL de solution de permanganate de potassium (KMnO_4) à 0,01 N, puis maintenir une ébullition régulière et douce pendant 10 minutes.
- Ajouter 15 mL de solution d'acide oxalique à 0,01 N (pour décolorer).
- Titrer à chaud avec la solution de KMnO_4 à 0,01 N jusqu'à obtention d'une coloration rose clair persistante (point d'équivalence).

Annexe 13 : Détermination du sodium

La concentration en ions sodium (Na^+) est calculée indirectement à partir des concentrations en chlorure de sodium (NaCl) et en chlorures (Cl^-), selon la relation :

$$\text{Na}^+ = \text{NaCl} - \text{Cl}^-$$

Les valeurs de NaCl et de Cl^- sont déterminées conformément au protocole décrit à l'Annexe 12.

Annexe 14 : Dosage des nitrates

Réactifs :

- Solution de salicylate de sodium à 0,5 % (fraîchement préparée toutes les 24 heures).
- Acide sulfurique concentré ($d = 1,84$).
- Solution d'hydroxyde de sodium et de tartrate double de sodium et de potassium : NaOH 400 g + tartrate 60 g + eau distillée qsp 1000 mL — conserver en flacon polyéthylène.
- Solution mère étalon d'azote nitrique à 0,1 g/L : KNO_3 anhydre 0,722 g + eau distillée qsp 1000 mL + 1 mL de chloroforme (conservateur).
- Solution fille étalon à 0,005 g/L : diluer 50 ml de la solution mère à 1000 ml.

Établissement de la courbe d'étalonnage :

Tableau A.14.1 : Préparation de la gamme étalon pour le dosage des nitrates

Capsule n°	T	1	2	3	4
Solution étalon 0,005 g/L (mL)	0	1	2	5	10
Eau distillée (mL)	10	9	8	5	0
$[\text{N-NO}_3^-]$ (mg/L)	0	0,5	1	2,5	5
Salicylate de sodium (mL)	1	1	1	1	1

Évaporer à sec au bain-marie ou à l'étuve (75–80 °C). Laisser refroidir, reprendre le résidu avec 20 mL d'acide sulfurique concentré (humecter complètement). Attendre 10 min, ajouter 15 ml d'eau bidistillée, puis 15 ml de la solution NaOH-tartrate. La couleur jaune se développe. Lire l'absorbance au spectrophotomètre à $\lambda = 415$ nm. Construire la courbe d'étalonnage après soustraction du témoin.

Mode opératoire :

- Introduire 10 ml d'échantillon dans une capsule de 60 ml (diluer si $[\text{N-NO}_3^-] > 10$ mg/L).
- Alcaliniser légèrement avec la solution NaOH.
- Ajouter 1 mL de salicylate de sodium, puis poursuivre le dosage selon le protocole de la courbe d'étalonnage.
- Préparer un témoin avec 10 mL d'eau bidistillée. Lire à $\lambda = 415$ nm.

Expression des résultats :

La courbe donne directement la teneur en azote nitrique (mg N-NO₃⁻/L). Pour obtenir la concentration en nitrates :

$$[\text{NO}_3^-] \text{ (mg/L)} = [\text{N-NO}_3^-] \text{ (mg/L)} \times 4,43$$

Annexe 15 : Dosage des nitrites

Réactifs :

- Ammoniaque pur ($d = 0,925$).
- Réactif de Zambelli : HCl pur ($d = 1,19$) 2,60 mL + acide sulfanilique 0,05 g + phénol cristallisé 0,075 g + chlorure d'ammonium 1,35 g + eau distillée exempte de NO₂⁻ 6,25 mL.
- Solution mère étalon NO₂⁻ à 0,23 g/L : NaNO₂ 0,345 g dans 1000 mL d'eau fraîchement distillée + 1 mL de chloroforme (conservateur).
- Solution fille étalon à 0,0023 g/L : diluer 1 ml de la solution mère à 100 ml.

Établissement de la courbe d'étalonnage :

Tableau A.15.1 : Préparation de la gamme étalon pour le dosage des nitrites

* Ajouter l'ammoniaque après 10 min d'attente suite à l'addition du réactif de Zambelli.

Annexe

Tube n°	T	1	2	3	4	Ech1	Ech2
Solution fille étalon (ml)	0	2	3	4	5	10	10
Eau distillée (ml)	10	8	7	6	5	0	0
Réactif de Zambelli (ml)	2	2	2	2	2	2	2
Ammoniaque pur (ml)*	2	2	2	2	2	2	2

Lecture :

Effectuer les lectures au spectrophotomètre à $\lambda = 435$ nm.

Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de 10 mL, la courbe donne directement la concentration en NO_2^- (mg/L). La teneur en azote nitreux est obtenue par :

$$[\text{N-NO}_2^-] \text{ (mg/L)} = [\text{NO}_2^-] \text{ (mg/L)} \times 0,305 \quad (\text{Rodier, 2009})$$

Annexe 16 : Dosage des sulfates

Réactifs :

- **Solution mère de sulfate à 1 g/L** : dissoudre 1,479 g de Na_2SO_4 dans 1000 ml d'eau distillée.
- **Solution stabilisante** : HCl 60 mL + éthanol 200 mL + NaCl 150 g + glycérol 100 mL + eau distillée qsp 1000 mL.
- **Solution de chlorure de baryum** : BaCl_2 150 g + HCl 5 mL + eau distillée qsp 1000 mL.

Remarque : Les échantillons troubles doivent être filtrés sur membrane de 0,45 μm avant analyse.

Gamme d'étalonnage :

Tableau A.18.1 : Préparation de la gamme étalon pour le dosage des sulfates

Annexe

Bécher n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Solution mère 1 g/L (mL)	0	1	2	3	4	5	6	7
Eau distillée (mL)	100	99	98	97	96	95	94	93
Solution stabilisante (mL)	5	5	5	5	5	5	5	5
Solution BaCl ₂ (mL)	2	2	2	2	2	2	2	2
[SO ₄ ²⁻] finale (mg/L)	0	10	20	30	40	50	60	70

Agiter chaque bécher pendant 1 minute. Enregistrer les absorbances au spectrophotomètre à $\lambda = 420$ nm.

Mode opératoire des échantillons :

- Prélever 20 mL d'eau à analyser et compléter à 100 mL avec de l'eau distillée.
- Ajouter 5 mL de solution stabilisante.
- Ajouter 2 mL de solution de chlorure de baryum.
- Agiter énergiquement pendant 1 minute.
- Lire l'absorbance au spectrophotomètre à $\lambda = 420$ nm.

Expression des résultats :

$$[\text{SO}_4^{2-}] \text{ (mg/L)} = A_{\text{lue}} \times \text{facteur de dilution}$$

Annexe 17 : Dosage des phosphates

Réactifs :

- Molybdate d'ammonium.
- Hydrogénophosphate de potassium (KH₂PO₄).
- Chlorure stanneux (SnCl₂).
- Glycérol.
- Acide sulfurique concentré (H₂SO₄).

Établissement de la courbe d'étalonnage :

Tableau A.17.1 : Préparation de la gamme étalon pour le dosage des phosphates

Fiole n°	T	1	2	3	4
Solution standard PO_4^{3-} 0,005 g/L (mL)	0	1	2	3	4
Eau distillée (mL)	50	49	48	47	46
Solution de SnCl_2 (gouttes)	10	10	10	10	10
Solution d'acide molybdate (mL)	4	4	4	4	4
$[\text{PO}_4^{3-}]$ équivalente (mg/L)	0	0,1	0,2	0,3	0,4

Mode opératoire :

- Introduire 40 mL d'eau à analyser dans une fiole jaugée de 50 mL.
- Ajouter 4 mL de solution d'acide molybdate, puis 10 gouttes de solution de chlorure stanneux.
- Compléter au trait de jauge avec de l'eau distillée et homogénéiser.
- Laisser reposer 5 minutes, puis effectuer la lecture au spectrophotomètre à $\lambda = 690 \text{ nm}$.

Préparation des solutions :

Solution mère de phosphate à 0,5 mg/L :

Peser 0,07615 g de KH_2PO_4 sec, dissoudre dans 10 mL d'eau distillée, transférer dans une fiole de 1000 mL, rincer avec 1 mL de CHCl_3 , compléter au trait de jauge.

Solution standard de phosphate à 0,05 mg/L :

Diluer 1 mL de la solution mère à 0,5 mg/L dans 100 mL d'eau distillée.

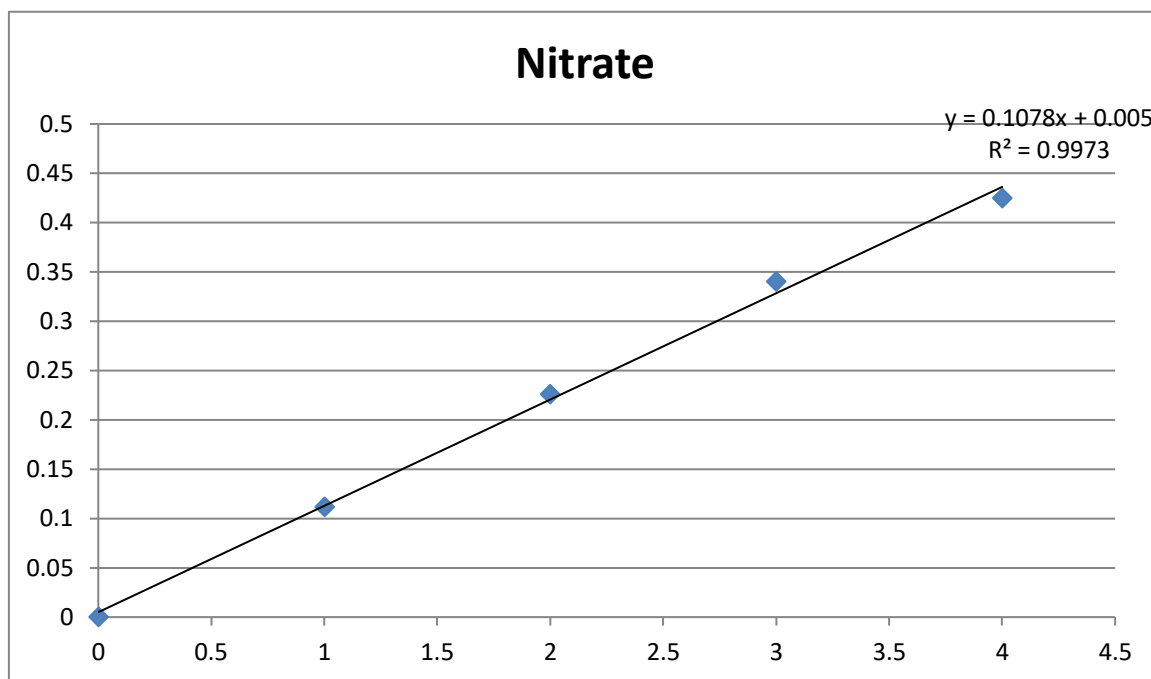
Solution de molybdate d'ammonium :

Verser prudemment 25 mL d' H_2SO_4 concentré dans 40 mL d'eau distillée. Laisser refroidir. Dissoudre 2,5 g de molybdate d'ammonium dans 7,5 mL d'eau distillée. Mélanger les deux solutions et ajuster à 100 mL avec de l'eau distillée.

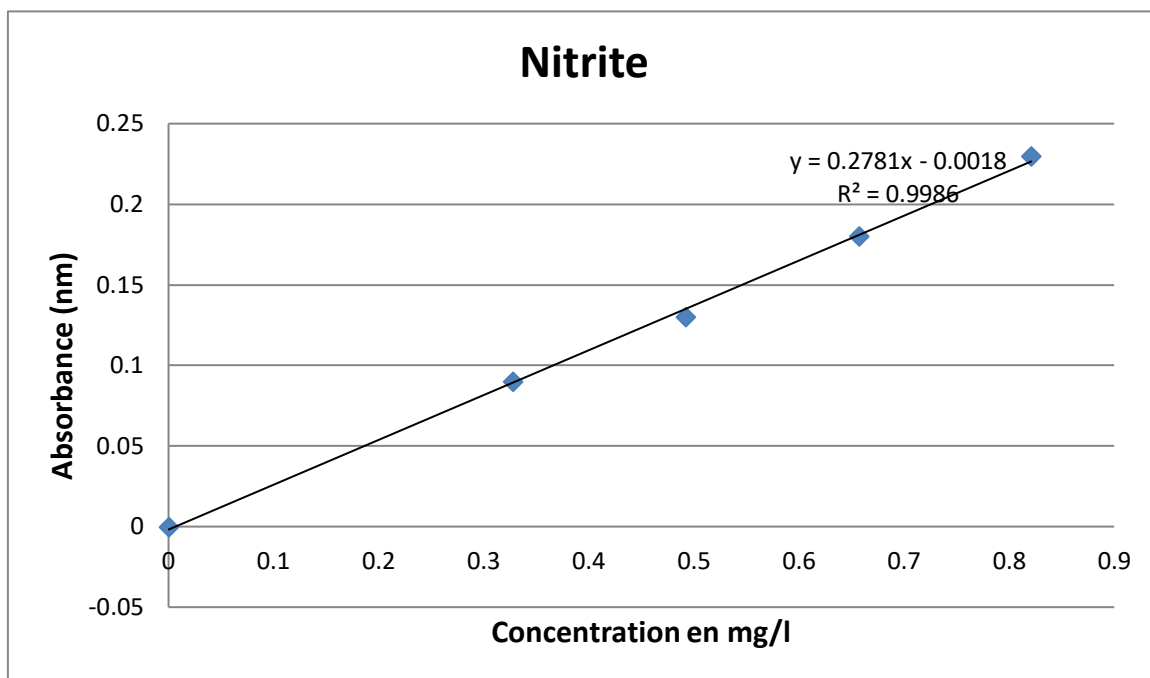
Solution de chlorure stanneux :

Peser 0,25 g de SnCl_2 , ajouter 10 mL de glycérol. Chauffer au bain-marie sous agitation jusqu'à dissolution complète.

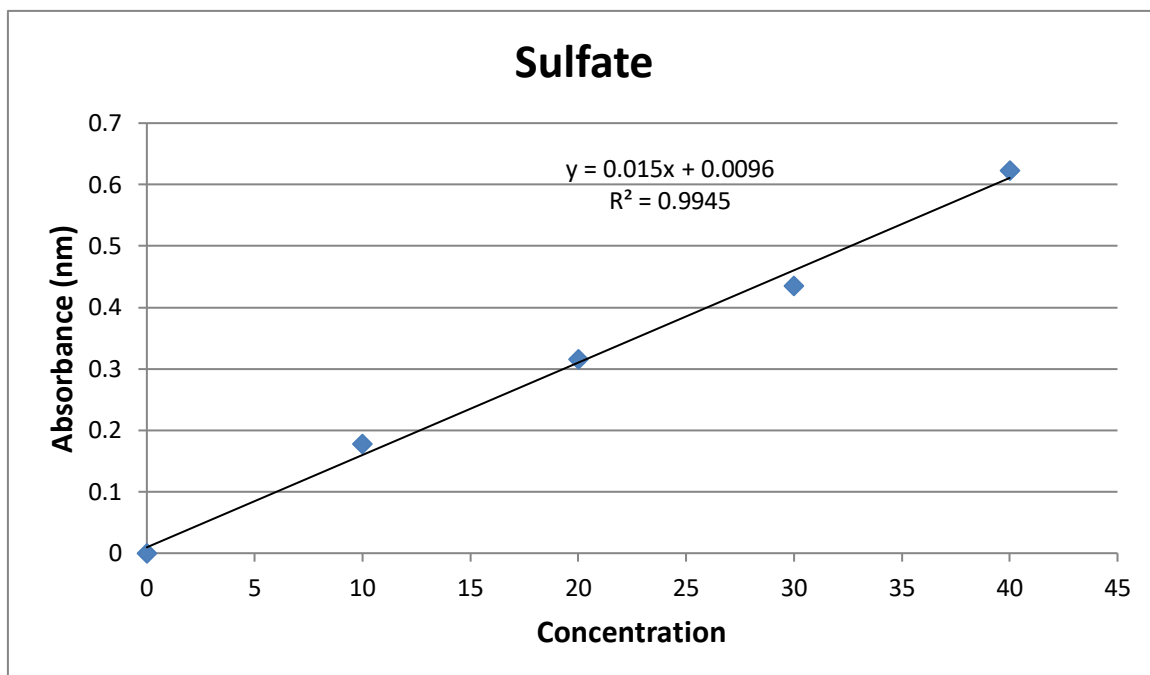
Annexe 18 : les courbes d'étalonnage



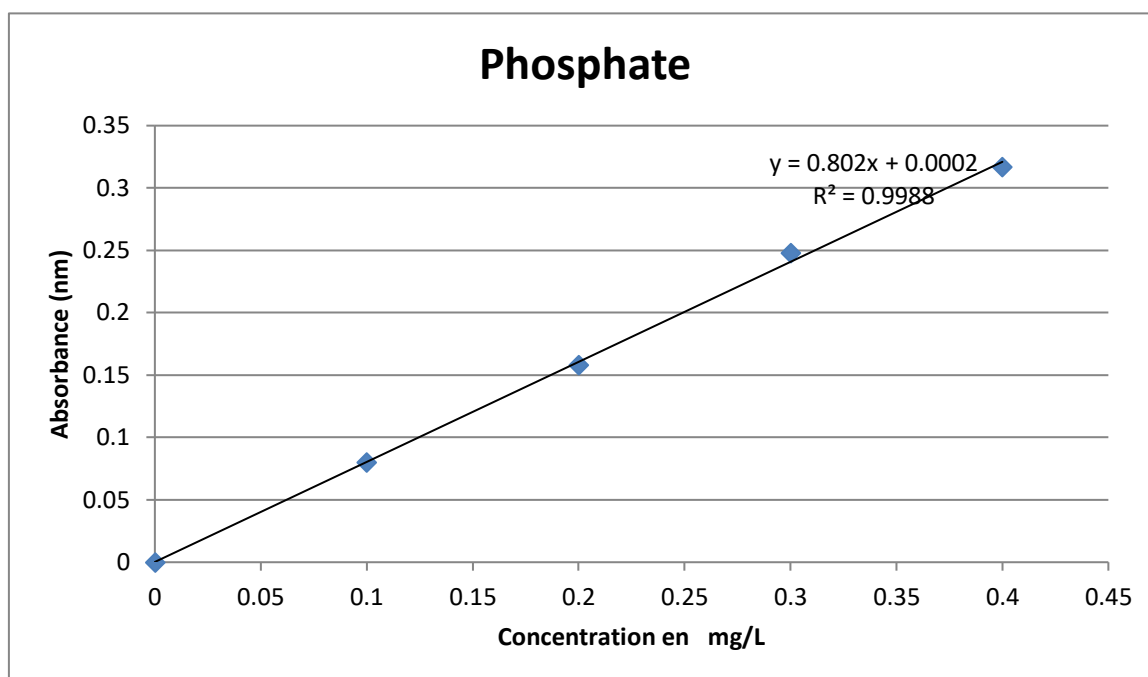
courbe d'étalonnage de nitrate



courbe d'étalonnage de nitrite



courbe d'étalonnages de sulfate



courbe d'étalonnage de phosphate

Paramètres bactériologiques

Annexe 19 : Milieux de culture utilisés

Milieux solides :

- **Milieu gélosé VRBG (Violet Red Bile Glucose)** : utilisé pour la recherche et le dénombrement des coliformes totaux et fécaux.
- **Milieu PCA (Plate Count Agar)** : utilisé pour le dénombrement de la flore mésophile aérobie totale (FTAM).

Milieux liquides :

- **Milieu BCPL (Bouillon au Lauryl Sulfate et Tryptose avec Brillant Vert et Bile)** : utilisé pour la recherche des coliformes totaux.
- **Milieu BLBVB (Bouillon Lactosé au Vert Brillant et au Bile)** : utilisé pour la confirmation des coliformes fécaux.

Annexe 20 : Préparation de l'eau physiologique

L'eau physiologique (solution saline à 0,9 %) est préparée en dissolvant 9 g de chlorure de sodium (NaCl) dans 1000 mL d'eau distillée. La solution est ensuite stérilisée à l'autoclave à 121 °C pendant 15 minutes.

Annexe 21 : Recherche et dénombrement de la flore mésophile aérobie totale (FTAM)

Mode opératoire (technique d'ensemencement en masse) :

- Étiqueter les boîtes de Pétri vides selon les dilutions prévues (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3}).
- Homogénéiser soigneusement les tubes de dilution avant utilisation.
- À l'aide d'une micropipette stérile, transférer aseptiquement 1 mL de la dilution 10^{-3} dans le fond d'une boîte de Pétri ; procéder de même pour les dilutions 10^{-2} puis 10^{-1} avec le même embout.
- Couler environ 15 mL de gélose PCA fondue et maintenue à 47 °C dans chaque boîte.
- Mélanger soigneusement l'inoculum à la gélose par des mouvements de rotation en forme de « 8 ».
- Après solidification du milieu, retourner les boîtes et les incuber à l'étuve pendant 72 heures.

Lecture des résultats :

- Examiner les boîtes dès la fin de la période d'incubation.
- Compter les colonies lenticulaires à l'aide d'un compteur de colonies, en utilisant si nécessaire une loupe de grossissement ($\times 1,5$) ou une loupe binoculaire.

Expression des résultats :

Dénombrer les colonies pour les boîtes contenant entre 30 et 300 unités formant colonie (UFC). Le résultat est exprimé en UFC/mL d'eau analysée.

Annexe 22 : Recherche et dénombrement des coliformes

Mode opératoire :

- À partir des dilutions décimales 10^{-1} à 10^{-3} , ensemencer 1 mL par dilution dans deux boîtes de Pétri.
- Compléter chaque boîte avec environ 15 mL de gélose VRBG fondue et refroidie à 45 °C.
- Homogénéiser le mélange inoculum-gélose par des mouvements circulaires en forme de « 8 ».
- Incuber à 37 °C pour les coliformes totaux et à 44 °C pour les coliformes fécaux, pendant 24 à 48 heures.

Lecture des résultats :

Annexe

Dénombrer les colonies présentant une coloration violette et un diamètre compris entre 0,5 et 1 mm, caractéristiques des coliformes en milieu VRBG. Le résultat est exprimé en nombre de colonies pour 100 mL d'eau analysée.

Annexe 23 : Images des résultats microbiologiques

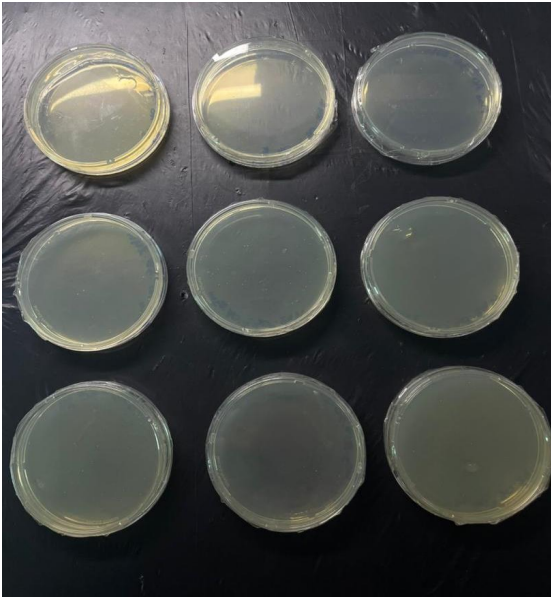


Figure 30: Boîte PCA négative à 37°C

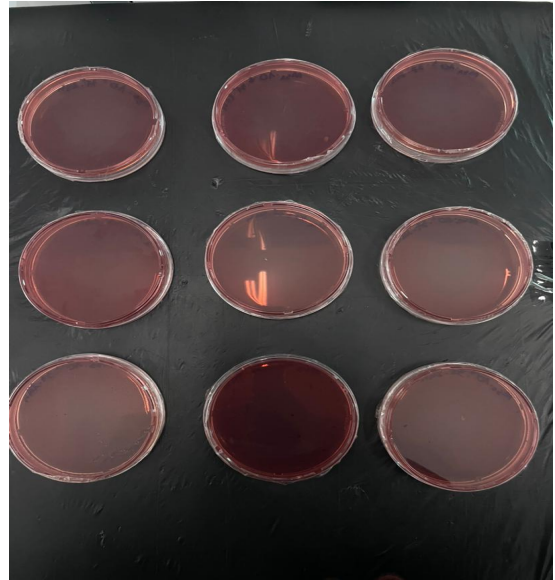


Figure 31: Boîte VRBG négative à 37°C