



DEMOCRATIC AND POPULAR ALGERIAN REPUBLIC
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
CHADLI BENDJEDID EL TARF UNIVERSITY
كلية علوم الطبيعة والحياة
FACULTY OF NATURE AND LIFE SCIENCES
قسم



Mémoire de Fin d'Études
Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en
« **Toxicologie industrielle et Environnementale** »

Thème

Etude physicochimique et microbiologique des eaux de Source : évaluation de la qualité et de l'indice de pollution microbienne

Présenté Par : **Debbab Nourhen & Leulmi Saloua**

Soutenue publiquement le : 14/ 06/2026

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Dr. FELLAH Imene	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Présidente
Dr . BERGAL Amira	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Directeur de thèse
Dr. BOUMARAF Warda	MCA	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Examinatrice

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

D'abord, nous remercions dieu qui nous donné la force, la patience et volonté pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directrice de mémoire,

***Dr BERGAL Amira**, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'encadrer cette recherche. Je la remercie sincèrement pour la rigueur de son suivi, la pertinence de ses critiques constructives et la liberté intellectuelle qu'elle m'a accordée, éléments déterminants dans la réalisation de ce projet.*

*Je tiens à exprimer mes sincères et très vifs remerciements à notre Examinatrice, **Dr BOUMARAF Warda**, pour ses orientations pertinentes.*

*J'exprime mes sincères remerciements à **Dr FELLAH Imene**, Docteure au département de Biologie de l'Université Chadli Benjedid El Tarf de m'avoir accueilli au de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

إهداء

والوفاء،

بكلّ مشاعر الحبّ

أهدي ثمرة جهدي المتواضعة هذه إلى من كانوا سندي الحقيقي في مشواري الدراسي،
إلى أعزّ الناس على قلبي، أبي "جمال" وأمي "زهيرة"
الذين لم يبخلا عليّ يوماً بالدعم والدعاء والتشجيع، وكانا دائماً النور
الذي يضيء طريقي نحو النجاح.
حفظهما الله وأدامهما تاجاً فوق رأسي.

إلى أختي الغالية ملاك،
إلى رفيقة أيامي وسندي الجميل،
إلى من كانت بقربي في لحظات التعب قبل الفرح، وكانت كلماتها
دائماً تمنحني القوة والأمل للاستمرار

وإلى روح أخي الغالي " محمد شرف "

رحمه الله وأسكنه فسيح جنّاته،
الذي كان حضوره في حياتي مصدر قوة وفرح، ورغم غيابه
بقيت ذكراه ترافقني في كلّ خطوة،
أدعو الله أن يرحمه رحمة واسعة وينير قبره،

كما أتقدّم بخالص الشكر والامتنان إلى خالي العزيز وزوجته الكريمة، على وقفتها معي
ومساندتها لي في أصعب اللحظات،
وعلى كلّ ما قدّمه لي من دعم ومحبة واهتمام، فجزاهما الله
عني كلّ خير، وجعل ذلك في ميزان حسناتهما.
وأهدي له هذا العمل عربون حبّ ووفاء لن ينتهي أبداً.

إلى صديقتي العزيزات، شكراً لكنّ على كلّ كلمة تشجيع، وعلى كلّ موقف
جميل بقي محفوراً في قلبي،
فبوجودكنّ أصبحت الأيام أخفّ والنجاحات أجمل.

أسأل الله أن يديم محبتنا وصداقتنا،
وأن يرزقنّ سعادة تليق بقلوبكنّ الطيبة .

وإلى أصدقاء أخي رحمه الله،
الذين لم ينسوه يوماً وبقوا أوفياء لذكراه الطيبة، أشركم على
محبتكم الصادقة ودعواتكم الطيبة.

وفي الأخير،
أهدي هذا العمل إلى كلّ من دعمني ولو بكلمة طيبة أو دعوة صادقة، وإلى كلّ من
آمن بقدرتي على النجاح وتحقيق أحلامي.
أسأل الله أن يوفّقنا جميعاً لما يحبّه ويرضاه. □

نور هان

إهداء

الحمد لله الذي ما خاب معه سعي وما ضاع عنده تعب
الحمد لله الذي بلغني هذا اليوم بعد صبرٍ طويل ودعواتٍ صادقة وأيامٍ ظننت فيها أن الوصول بعيد

فإذا بالله يكتب لي النهاية التي تمنيتها دائماً إلى من كانت

الجنة تحت قدميها

إلى الحزن الذي لا يميل مهما تعبت الحياة

إلى أُمي الغالية

مهما كتبت من كلمات فلن أوفيكِ حقكِ كنتِ دعائي حين ضاقت الدنيا ونوري حين أظلم الطريق وسندي في كل لحظة ضعف

هذا التخرج ثمرة تعبكِ قبل أن يكون ثمرة جهدي فالله يحفظكِ ويبطيل في عمركِ إلى أبي العزيز إلى الرجل الذي علّمني أن التعب من أجل الأحلام عبادة وأن النجاح لا يأتي إلا بالصبر كنتِ قوتي وسندي وفخري وكل خطوة وصلت إليها كان وراءها تعبكِ ودعاؤكِ

أسأل الله أن يبارك فيكِ ويجزيكِ عني خير الجزاء إلى إخوتي وأغلى ما أملك:

إيمان، أميرة، سهيلة، لميس، نور، رونق، وأخي إلياس
كنتم دائماً الأمان وسط تعب الأيام والفرحة التي تهون كل شيء
وجودكم بجانبني نعمة لا تُقدّر بثمن فشكراً لكل كلمة دعم ولكل لحظة كنتم فيها سنداً لي
إلى صغيرتي وقطعة من قلبي حنين ابنتي
الغالية

أنتِ أجمل هدية من الله وسبب ابتسامتي وسط كل الضغوط
كبرت في قلبي حباً يفوق الوصف وأسأل الله أن أكون دائماً مصدر فخر لكِ كما كنتِ أنتِ
مصدر قوتي

إلى صديق الدرب جابر

بعض الأشخاص لا تكفيهم الكلمات وأنت منهم

كنتِ الأخ الذي لم تلده أُمي والرفيق الذي لم يتغير رغم كل الظروف

شكراً لأنك كنت حاضراً في أصعب أيامي قبل أجملها وشكراً لأنك آمنت بي حتى عندما كنت أشك في نفسي

دمتِ نعمة ورفيق عمر لا يميل وأخيراً

إلى نفسي

إلى تلك النسخة التي تعبت كثيراً وبكت بصمت ثم نهضت من جديد كل مرة

أقول لك: لقد فعلتها
وما هذا التخرج إلا بداية لحلم أكبر بإذن الله

هبة الله

Liste des Figures

N° Figures	Titre	N° Pages
01	Situation géographique de la zone d'études	21
02	Variation des températures mensuelles moyennes de la région d'El Tarf de 1988 à 2018	22
03	Variation des précipitations mensuelles moyennes de la région d'El Tarf de 1988 à 2018	23
04	Variation des humidités mensuelles moyennes de la région d'El Tarf de 1988 à 2018	24
05	Mesure du pH	34
06	Mesure de la conductivité électrique	35
07	Mesure de la turbidité	35
08	Dosage de nitrite	37
09	Dosage du phosphore	38
10	Dosage de Dureté Total	39
11	Dosage du Calcium	40
12	Filtration sur membrane	42
13	Incubateurs	42
14	Test de confirmation	44
15	Variation mensuelle de la température des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	49
16	Variation mensuelle du pH des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	50
17	Variation mensuelle de la conductivité électrique des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	51

18	Variation mensuelle des solides dissous totaux (TDS) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	52
19	Variation mensuelle de la salinité des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	53
20	Variation mensuelle de la turbidité des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	54
21	Variation mensuelle des concentrations en ammonium (NH_4^+) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	55
22	Variation mensuelle des concentrations en nitrites (NO_2^-) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	56
23	Variation mensuelle des concentrations en orthophosphates (PO_4^{3-}) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	57
24	Variation mensuelle de la dureté totale (TH) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	58
25	Variation mensuelle des concentrations en calcium (Ca^{2+}) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	59
26	Variation mensuelle des concentrations en magnésium (Mg^{2+}) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.	60

Liste des Tableaux

N° Tableaux	Titre	N° Pages
1	Classification des eaux selon leur Ph	8
2	Rapport entre la conductivité et la minéralisation	8
3	Les valeurs du titre hydrométrique (Dureté totale).	9
4	Classification de la pollution microbiologique (IQM)	17
5	Les paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain et les appareils utilisés.	31
6	Normes algériennes des paramètres physico-chimiques des eaux de source.	41
7	Les recommandations de l’OMS sont	45
8	Les limites admissibles selon les normes algériennes	45
9	Classification la qualité microbiologique de l’eau	46
10	Présentation des résultats des analyses physico-chimique des deux sources (Dran et Boutheldja) en 2023-2024	47
11	Présentation des résultats des analyses physico-chimique des deux sources (Dran et Boutheldja) en 2024-2025	47
12	Comparaison des paramètres physico-chimiques aux normes algériennes	60

Résumé

L'eau est une ressource essentielle dont la qualité dépend étroitement des conditions géologiques et environnementales. Cette étude vise à évaluer la qualité physico-chimique des eaux de source dans les communes de Deran et Boutheldja (wilaya d'El Tarf, Nord-Est de l'Algérie), afin d'identifier les facteurs contrôlant leur composition et d'apprécier leur aptitude à la consommation.

La méthodologie repose sur des campagnes d'échantillonnage mensuelles réalisées durant deux périodes (2023–2024 et 2024–2025). Les analyses ont porté sur plusieurs paramètres, notamment la température, le pH, la conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS), la salinité, la turbidité, la dureté totale (TH), ainsi que les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et les nutriments (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}).

Les résultats montrent une stabilité globale des paramètres au cours du temps, avec une différenciation nette entre les deux sites. La source de Deran se caractérise par une forte minéralisation (CE $\approx 3730 \mu\text{S/cm}$; TDS $\approx 1910 \text{ mg/L}$; TH $\approx 900 \text{ mg/L}$), liée à l'interaction eau-roche, dépassant les normes de potabilité. À l'inverse, la source de Boutheldja présente une faible minéralisation (CE $\approx 153 \mu\text{S/cm}$; TDS $\approx 72 \text{ mg/L}$; TH $\approx 30 \text{ mg/L}$), traduisant un effet de dilution.

Les concentrations en nutriments sont très faibles dans les deux stations, indiquant l'absence de pollution significative. Par conséquent, les eaux de Boutheldja sont aptes à la consommation directe, tandis que celles de Deran nécessitent un traitement préalable en raison de leur forte minéralisation.

Mots-clés : Qualité de l'eau ; Hydrochimie ; Minéralisation ; Eaux de source ; El Tarf

Abstract

Water is an essential resource whose quality is closely influenced by geological and environmental conditions. This study aims to assess the physico-chemical quality of spring waters in the communes of Deran and Boutheldja (El Tarf province, Northeast Algeria), in order to identify the factors controlling their composition and evaluate their suitability for consumption.

The methodology is based on monthly sampling campaigns conducted over two periods (2023–2024 and 2024–2025). The analyses included several parameters such as temperature, pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), salinity, turbidity, total hardness (TH), as well as major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+}) and nutrients (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}).

The results indicate an overall stability of the parameters over time, with a clear distinction between the two sites. The Deran spring is characterized by high mineralization ($\text{EC} \approx 3730 \mu\text{S/cm}$; $\text{TDS} \approx 1910 \text{ mg/L}$; $\text{TH} \approx 900 \text{ mg/L}$), related to water–rock interaction, exceeding drinking water standards. In contrast, the Boutheldja spring exhibits low mineralization ($\text{EC} \approx 153 \mu\text{S/cm}$; $\text{TDS} \approx 72 \text{ mg/L}$; $\text{TH} \approx 30 \text{ mg/L}$), reflecting a dilution effect.

Nutrient concentrations are very low in both stations, indicating the absence of significant pollution. Therefore, Boutheldja waters are suitable for direct consumption, whereas Deran waters require prior treatment due to their high mineralization.

Keywords: Water quality; Hydrochemistry; Mineralization; Spring water; El Tarf

ملخص

الماء مورد أساسي تعتمد جودته بشكل وثيق على الظروف الجيولوجية والبيئية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية لمياه الينابيع في بلديتي درّان وبوثلجة (ولاية الطارف، شمال شرق الجزائر)، من أجل تحديد العوامل المتحكمة في تركيبها وتقدير مدى صلاحيتها للاستهلاك.

تعتمد المنهجية على حملات أخذ عينات شهرية أُنجزت خلال فترتين (2023–2024 و 2024–2025). وشملت التحاليل عدة مؤشرات، والملوحة، (TDS)، وإجمالي المواد الصلبة الذائبة (CE)، والتوصيلية الكهربائية (pH) منها درجة الحرارة، والرقم الهيدروجيني (NH_4^+ ، NO_2^- ، PO_4^{3-}) والعناصر المغذية (Ca^{2+} ، Mg^{2+})، بالإضافة إلى الأيونات الرئيسية (TH) والعكارة، والعسر الكلي.

أظهرت النتائج استقرارًا عامًا للمعايير المدروسة مع مرور الوقت، مع وجود تباين واضح بين الموقعين. تتميز عين درّان بدرجة عالية ملغ/لتر)، ويرتبط ذلك بتفاعل الماء مع الصخور، $\text{TH} \approx 900$ ملغ/لتر؛ $\text{TDS} \approx 1910$ ميكروسيمينز/سم؛ $\text{CE} \approx 3730$ من التمعدين $\text{CE} \approx 153$ حيث تتجاوز هذه القيم المعايير المسموح بها لمياه الشرب. في المقابل، تُظهر عين بوثلجة درجة ضعيفة من التمعدين ملغ/لتر)، مما يعكس تأثير التخفيف $\text{TH} \approx 30$ ملغ/لتر؛ $\text{TDS} \approx 72$ ميكروسيمينز/سم؛

أما تراكيز العناصر المغذية فهي منخفضة جدًا في كلتا المحطتين، مما يدل على غياب تلوث ملحوظ. وبناءً على ذلك، فإن مياه بوثلجة صالحة للاستهلاك المباشر، في حين أن مياه درّان تتطلب معالجة مسبقة بسبب ارتفاع درجة تمعدنها.

الكلمات المفتاحية: جودة المياه؛ الكيمياء المائية؛ التمعدين؛ مياه الينابيع؛ الطارف.

Sommaire

	Pages
Remercîment Dédicace Liste des figures Liste des tableaux Résumé Abstract ملخص	
Introduction	01
Chapitre I : Revue bibliographique	
I.1. Généralités sur les eaux de source	3
I.1.1. Définition et classification	3
I.1.1.1. Définition	3
I.1.1.2. Classification	4
I.1.2. Différents types de source	5
I.1.3. Importance écologique et sanitaire	6
I.1.4. Utilisations des eaux de source	6
I.2. Qualité physico-chimique des eaux	7
I.2.1. Paramètres physico-chimiques et leur signification	7
I.2.2. Facteurs naturels influençant la composition de l'eau	12
I.2.3. Sources de pollution physico-chimique	13
I.3. Qualité microbiologique des eaux	13
I.3.1. Microorganismes indicateurs de contamination	14
I.3.2. Origine de la pollution microbiologique	15
I.3.3. Risques sanitaires associés	16
I.4. Indices de qualité et de pollution des eaux	16
I.4.1. Indice de qualité de l'eau	16

I.4.2. Principe de l'indice de pollution microbienne (IPM)	17
I.4.3. Intérêt et limites des indices	18
Chapitre II : Matériels et méthodes	
II.1. Présentation de la zone d'étude	20
II.1.1. Situation géographique	20
II.1.2. Conditions climatiques et hydrogéologiques	21
II.1.2.1. Condition climatique	21
II.1.2.2. Hydrogéologiques	24
II.1.3. Activités anthropiques	26
II.2. Stratégie d'échantillonnage	27
II.2.1. Choix des sites	27
II.2.2. Période et fréquence des prélèvements	28
II.2.3. Méthodes de prélèvement et de conservation	28
II.2.3.1. Prélèvement	28
II.2.3.2. Conservation	29
II.3. Analyses physico-chimiques	29
II.3.1. Paramètres mesurés in situ	29
II.3.2. Paramètres mesurés ex situ (Au Laboratoire)	31
II.3.3. Méthodes et normes utilisées	33
II.3.3.1. Méthodes	33
II.3.3.2. Normes utilisées	41
II.4. Analyses microbiologiques	41
II.4.1. Méthode de filtration sur membrane	41
II.5. Évaluation de la qualité et calcul de l'IPM	44
II.5.1. Normes de référence (OMS, normes nationales)	44

II.5.2. Méthode de calcul de l'indice de pollution microbienne	45
II.5.3. Classification de la qualité des eaux	46
Chapitre III : Résultats et discussion	
III.1. Résultats des analyses physico-chimiques	47
III.1.1. Présentation des résultats	47
III.1. 2.Analyse spatiale et/ou temporelle	48
III.1.3. Comparaison aux normes	60
III.1.4. Discussion	63
III.1.5. Conclusion	64
III.1.6. Comparaison aux études antérieures	65
Conclusion générale	67
Références Bibliographiques	

INTRODUCTION

Introduction

L'eau constitue un élément indispensable à la vie et au développement des activités humaines. Elle représente une composante fondamentale des milieux minéral et biologique et intervient dans l'ensemble des usages quotidiens, notamment domestiques, industriels et agricoles. De ce fait, elle devient un récepteur privilégié de diverses formes de pollution et peut être considérée comme un vecteur potentiel de transmission de maladies (Microbiology).

La problématique de la ressource en eau constitue aujourd'hui une préoccupation majeure à toutes les échelles. Cet enjeu vital concerne l'ensemble de la société, d'autant plus que les besoins en eau ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies sous l'effet de la croissance démographique et du développement socio-économique. Face à la diversification des activités exploitant cette ressource naturelle, il devient impératif de s'interroger sur la rationalité, l'efficacité et la durabilité de son utilisation.

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2005), environ 1,8 million de décès sont enregistrés chaque année dans le monde en raison de maladies d'origine hydrique, dont près de 90 % concernent des enfants de moins de cinq ans vivant principalement dans les pays en développement. En outre, 88 % des maladies diarrhéiques sont attribuées à la dégradation de la qualité de l'eau, à l'insuffisance des systèmes d'assainissement et à des conditions d'hygiène inadéquates.

Les eaux souterraines représentent environ 97 % des eaux douces continentales liquides (Bosca, 2002) et constituent une composante stratégique du cycle hydrologique global, souvent qualifiée de fraction invisible de celui-ci. À l'échelle mondiale, une proportion importante de la population dépend des ressources en eau souterraine pour satisfaire ses besoins domestiques et agricoles.

En Algérie, les eaux souterraines constituent une part essentielle du patrimoine hydraulique national et représentent traditionnellement la principale source d'approvisionnement en eau potable, en raison de leur accessibilité et de leur relative protection vis-à-vis des polluants comparativement aux eaux de surface (Merzoug *et al.*, 2010). Toutefois, la situation actuelle se caractérise par un déséquilibre marqué entre les ressources disponibles et les besoins exprimés. La croissance démographique ainsi que le développement économique et social ont entraîné, au cours des dernières décennies, une augmentation significative de la demande en eau potable,

industrielle et agricole, dépassant parfois les volumes mobilisés et générant des tensions d'usage (Remini, 2010).

Bien que les eaux souterraines présentent généralement une bonne qualité physico-chimique et microbiologique grâce à leur confinement au sein de formations géologiques protectrices, elles demeurent exposées à de multiples facteurs naturels et anthropiques susceptibles d'altérer leur qualité (Custodio, 2002). La pollution de ces ressources constitue un processus évolutif dans l'espace et dans le temps, souvent difficile à détecter et à maîtriser (Myrand, 2008). Elle représente un risque sanitaire notable, notamment lorsque ces eaux sont destinées à la consommation humaine (Laferrière *et al.*, 1996 ; El Kettani & Azzouzi, 2006).

La qualité physico-chimique des eaux souterraines dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature des sols, la lithologie, la perméabilité de l'aquifère, la profondeur de la nappe, les apports en polluants issus des activités anthropiques et les variations saisonnières (Freeze & Cherry, 1979). Par ailleurs, la qualité microbiologique est évaluée par la recherche de germes indicateurs de contamination fécale et de bactéries pathogènes, dont la présence peut engendrer des risques sanitaires à court, moyen et long terme (OMS, 1986 ; Le Minor & Véron, 1989).

Ainsi, le contrôle et la surveillance de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines constituent un enjeu majeur de santé publique et de préservation des ressources hydriques (El Ouali Lalami *et al.*, 2011).

Dans cette perspective, la présente étude vise à évaluer la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de source dans la région d'El Tarf, afin d'apprécier leur conformité aux normes en vigueur et d'identifier les éventuels risques sanitaires associés à leur utilisation.

Chapitre I :

Revue bibliographique

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1. Généralités sur les eaux de source

Les eaux de source sont des eaux d'origine souterraine qui émergent naturellement à la surface du sol à la suite de l'intersection d'un aquifère avec la topographie ou sous l'effet de la pression hydrostatique (**Freeze & Cherry, 1979**).

Elles proviennent essentiellement de l'infiltration des précipitations à travers les sols et les formations géologiques perméables, au cours de laquelle l'eau subit une filtration naturelle et acquiert des caractéristiques physico-chimiques étroitement liées à la nature lithologique du milieu traversé (**USGS, 2019**).

À l'état naturel, les eaux de source présentent généralement une bonne qualité microbiologique et chimique au point d'émergence, bien que leur composition minérale puisse varier dans le temps et selon les conditions hydrogéologiques locales, contrairement aux eaux minérales naturelles dont la stabilité est exigée par la réglementation (**WHO, 2017**). En tant qu'élément fondamental du cycle hydrologique, les sources jouent un rôle important dans l'alimentation des cours d'eau et des zones humides, et constituent une ressource précieuse pour l'alimentation en eau potable, sous réserve d'une protection adéquate des zones de recharge contre les contaminations d'origine naturelle ou anthropique (**Freeze & Cherry, 1979 ; WHO, 2017**).

I.1.1. Définition et classification

I.1.1.1. Définition

Une eau dite «de source » est une eau souterraine captée dans une source ou un forage, et dont la composition chimique et bactériologique soit telle qu'elle satisfasse aux normes de potabilité sans aucun traitement (**Marsily, 1995**). Elles sont le plus souvent distribuées en bouteilles (verre, plastique) ou dans certains pays en conteneurs de 5 litres (**Marsily, 1995**). Tout au plus peuvent-elles subir un traitement d'aération et de filtration pour éliminer les éléments « instables », c'est-à-dire en général quelques gaz et le fer ou le manganèse en solution, qui précipitent lors de l'aération (**Marsily, 1995**).

Le décret exécutif no 04-196 du 15 juillet 2004, définit l'eau de source comme étant une eau d'origine exclusivement souterraine apte à la consommation humaine, microbiologiquement saine et protégée contre les risques de pollution (**Joradp, 2004**). Elle répond à des normes requises pour la potabilité analogue à celles définies pour les eaux de distribution (**Joradp, 2004 ;Hazzab a et b, 2011**)

Les eaux de source sont de deux types : les eaux de source naturelles et les eaux de source minérales.

- **Eaux de source naturelle** Une eau de source est une eau d'origine souterraine, ayant bénéficié d'une protection contre la pollution, et n'ayant subi ni traitement chimique, ni adjonction. Elle doit donc être naturellement conforme. Elle doit satisfaire les critères de potabilité (**Alouane, 2012**).
- **Eaux de source minérale** Une eau minérale naturelle est également une eau d'origine souterraine, protégée de toute pollution. Ses caractéristiques chimiques doivent être stables. L'eau minérale n'est pas potable au sens réglementaire (on ne pourrait pas la distribuer au robinet). En effet, elle contient des substances minérales en quantités trop importantes pour pouvoir servir de boisson exclusive. Les eaux minérales font donc l'objet d'autorisations spécifiques, après analyse de leurs effets thérapeutiques.

Les eaux minérales peuvent être classées selon leurs teneurs en minéraux en eau très peu minéralisée, eau sulfatée calcique et eau bicarbonatée sodique (**Alouane, 2012**).

I.1.1.2. Classification

Les sources sont classées suivant différents critères (**Ballouki, 2012**)

- L'hydrochimie permet de classer les sources selon leurs qualités ;
- L'hydrogéologie qui cherche à expliquer l'origine et le fonctionnement de la source ;
- Le thermalisme qui classe les sources selon leur température et l'usage qui peut en être tiré.

Les eaux de source constituent des ressources naturelles essentielles, et leur classification permet de mieux comprendre leur origine, leur composition chimique et leur usage potentiel. Cette classification repose sur plusieurs critères complémentaires : hydrogéologiques, physico-chimiques et minéralogiques.

- **Classification hydrogéologique**

D'un point de vue hydrogéologique, les sources se distinguent selon leur mode d'émergence et le contexte géologique :

- **Sources de contact** : l'eau jaillit à l'interface entre deux couches de perméabilité différente.
- **Sources de fracture** : l'eau circule dans des fissures ou fractures du substrat rocheux.
- **Sources karstiques** : typiques des terrains calcaires, l'eau s'écoule à travers des cavités avant d'émerger.
- **Sources artésiennes** : l'eau jaillit spontanément d'un aquifère confiné sous pression (**Freeze & Cherry, 1979**).

Cette classification est essentielle pour **prévoir le régime hydrologique des sources**, la gestion de leur débit et la protection contre la pollution.

- **Classification physico-chimique**

Les eaux de source peuvent également être regroupées selon leur composition chimique dominante, représentée par des diagrammes hydro-chimiques tels que Piper ou Stiff :

- **Bicarbonatées** : prédominance de HCO_3^-
- **Sulfatées** : prédominance de SO_4^{2-}
- **Chlorurées** : prédominance de Cl^-

Les cations dominants (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) sont également utilisés pour distinguer différents **faciès hydro-chimiques (Hazzaba, 2011)**.

- **Classification selon la minéralisation et l'usage**

Selon leur minéralisation, les eaux de source peuvent être :

- **Faiblement minéralisées** : adaptées à la consommation quotidienne et à l'alimentation infantile.
- **Moyennement minéralisées** : convenant à la consommation générale et à un usage domestique.
- **Fortement minéralisées** : utilisées pour des usages thérapeutiques ou spécifiques (Dassargues, 2020).

I.1.2. Différents types de source

- **Les sources d'affleurement**

L'eau s'apparaît à la surface sous forme d'un Chaplet de source. Ce type de source apparaît surtout dans les terrains calcaires ou cristallins (Naimi & Allaoua, 2017).

- **Les sources de déversement**

Ce type de source apparaît sur les pentes et les grandes hauteurs, dans les terrains fissurés en surface, calcaires et granites. Généralement leur débit est faible, pratiquement constant et peuvent facilement tarir (Yahmi & Zeroukhi, 2022).

- **Les sources d'émergence**

La couche perméable soit fissurée en direction du sol, on peut avoir un débit alimentant un trou d'eau, souvent envahi de végétation par une ou plusieurs facteurs ou l'on peut voir l'eau bouillonner. Le débit localisé de ces sources est souvent important, leur risque de tarissement est inégal (Naimi & Allaoua, 2017).

I.1.3. Importance écologique et sanitaire des eaux de source

Les eaux de source jouent un rôle crucial à la fois sur le plan écologique et sanitaire, constituant des ressources essentielles pour l'homme et pour les écosystèmes aquatiques.

- **Importance écologique**

Les sources sont souvent des points névralgiques de la biodiversité aquatique :

- Elles fournissent un habitat stable pour de nombreuses espèces aquatiques, notamment les invertébrés et les poissons sensibles aux variations de température et de composition chimique (**Krause et al., 2020**).
- Elles contribuent à la recharge des cours d'eau et des zones humides, assurant ainsi la régulation hydrologique et la continuité écologique des bassins versants (**Custodio & Llamas, 2001**).
- Les sources naturelles participent également à l'épuration naturelle des eaux, grâce à la filtration et aux processus biologiques souterrains, limitant ainsi la pollution des écosystèmes aquatiques (**Chapelle, 2025**).

- **Importance sanitaire**

Sur le plan sanitaire, les eaux de source représentent une source d'eau potable saine et naturelle :

- Elles sont microbiologiquement saines à l'émergence, ce qui les rend consommables sans traitement chimique obligatoire, réduisant l'exposition aux résidus de désinfectants (**WHO, 2017**).
- Les eaux de source fournissent des oligoéléments essentiels (calcium, magnésium, bicarbonates, potassium) nécessaires à la santé humaine, contribuant à la minéralisation de l'alimentation quotidienne (**Bligny & Hartemann, 2005**).
- Certaines sources naturelles sont exploitées pour leurs propriétés thérapeutiques ou diététiques, en raison de leur composition stable et spécifique (**Hazzab, 2011**).

I.1.4. Utilisations des eaux de source

Les eaux de source sont principalement utilisées pour l'alimentation en eau potable, en raison de leur origine souterraine protégée et de leurs caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques généralement conformes aux normes sanitaires. Elles sont consommées directement par les populations locales ou exploitées pour l'embouteillage, à condition qu'elles soient captées et protégées contre toute source de contamination (**Rodier et al., 2009 ; WHO, 2017**).

Dans de nombreuses régions rurales ou montagneuses, les eaux de source constituent une ressource essentielle pour l'approvisionnement domestique, notamment en l'absence de réseaux publics de distribution d'eau potable **(UNESCO, 2012)**.

Par ailleurs, certaines eaux de source sont utilisées à des fins thérapeutiques et de bien-être, en raison de leur composition minérale spécifique, notamment dans les stations thermales et les établissements de soins **(Aubert, 2002 ; Dassargues, 2012)**.

De manière plus limitée, les eaux de source peuvent également être mobilisées pour des usages agricoles ou industriels, sous réserve d'une gestion durable garantissant la préservation de la qualité de l'eau et la pérennité de la ressource **(Hem, 1985 ; Custodio & Llamas, 2001)**.

I.2. Qualité physico-chimique des eaux

I.2.1. Paramètres physico-chimiques et leur signification

- **Paramètres physiques**

Température

Température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques. Toute variation brusque de ce paramètre entraîne une perturbation de l'équilibre de l'écosystème aquatique **(Berradia & Serisserr, 2019)**.

Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH est la concentration d'ions hydrogène dans une solution. Dans l'eau, ce facteur est d'une importance exceptionnelle, en particulier dans les procédés de traitement. Le pH mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physicochimique et dépend de facteurs simples dont l'origine de l'eau. Le pH doit être mesuré In situ, c'est un élément important pour la détermination de la qualité de l'eau **(Brasilia, 2013)**.

L'échelle des pH compris en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) avec une valeur médiane "7" qui correspond à un pH neutre (Tableau 1). L'OMS préconise pour l'eau destinée à la consommation humaine un pH compris entre 6,5 et 8,5 **(Hane et al, 2020)**.

Tableau 1. Classification des eaux selon leur pH (C.I.E, 2005).

pH < 5	Acidité forte → présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée → majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

Conductivité

La conductivité est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Elle varie en fonction de la température, de la concentration et la nature des substances dissoutes. En général, les sels minéraux sont de bons conducteurs par opposition à la matière organique (CEAEQ, 2015). Elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Tableau 2).

Tableau 2. Rapport entre la conductivité et la minéralisation (Diallo , 2010).

Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation
0-100	Minéralisation très faible
100-200	Minéralisation faible
200-333	Minéralisation moyenne
333-666	Minéralisation accentuée
666-1000	Minéralisation importante
>1000	Minéralisation élevée

Turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. Elle traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques, ...). Une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension. La détermination de la turbidité est très utile dans le contrôle d'un traitement, éviter les dépôts et aussi pour l'amélioration de l'aspect esthétique de l'eau de consommation (Rejsek, 2002).

Salinité

La salinité est un facteur écologique propre aux biotopes aquatiques (mais aussi aux sols) qui caractérise leur teneur en sel (NaCl) et autres sels dissous dans les eaux. Par ailleurs, toute modification intempestive de la salinité due à l'action de l'homme peut présenter un impact redoutable sur les biotopes aquatiques concernés (**Ramade, 2011**).

- **Paramètres chimiques**

Chlorures (Cl⁻) :

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux (**Makhoukh, 2011**).

Dureté totale (TH) :

La dureté ou le titre hydrotimétrique (TH) correspond à la somme des concentrations en cations Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ à l'exception des alcalins (**Ledler, 1986**).

Tableau 03. Les valeurs du titre hydrométrique (Dureté totale). (**Khammar ,2018**).

TH (°F)	0 à	7 7 à 15	15 à 30	30 à 40	+40
Eau	Très douce	Eau douce	Moyennement douce	Dure	Très dure

Titre alcalimétrique (TA) :

La teneur en hydroxyde (OH⁻), est la moitié de la teneur en carbonate CO₃²⁻ et un tiers environs des phosphates présents. (**Menad &Metadjer, 2012**)

TA : permet de mesurer la teneur totale en hydroxydes et seulement la moitié de celle en carbonates, lorsque ces teneurs sont mesurées en méq /l ou °F, ce qui est traduit par la formulation :

$$T = [OH^-] + 1/2 [CO_3^{2-}] \text{ méq/l ou } ^\circ F$$

Titre alcalimétrique complet (TAC) :

Il correspond à la teneur en ions OH⁻, CO₃²⁻ et HCO₃⁻ - pour des pH inférieurs, à 8.3, la teneur en ions OH⁻ et CO₃²⁻ est négligeable (TA=0), dans ce cas la mesure de TAC correspondant au dosage des bicarbonates seuls. (**Menad &Metadjer ,2012**) **TAC** permet de mesurer les teneurs totales en hydroxydes, en carbonates et en Hydrogénocarbonates, en méq/l ou °F, soit :

$$TA = [OH^-] + [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] \text{ méq/l ou } ^\circ F$$

Magnésium (Mg^{2+}) :

Le magnésium est plus abondant après le calcium par rapport au sodium et au potassium. Le Magnésium peut avoir deux gains : Les calcaires dolomitiques qui libèrent le magnésium par dissolution, en présence du gaz carbonique. La dissolution du $MgSO_4$ des terrains gypseux du Trias situés au Sud.(**Sahraoui, 2015**).

Calcium (Ca^{2+}) :

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Est un composant majeur de la dureté totale de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Il existe surtout à l'état d'hydrogénocarbonates et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorure etc. les eaux de bonne qualité renferment de 250 à 350 mg/l les eaux qui dépassent les 500 mg/l présente de sérieux inconvénient pour les usages domestique et pour l'alimentation des chaudières (**Khelili & Lazali, 2015**).

Sodium (Na^+) :

Les concentrations en sodium peuvent être extrêmement variables, indépendamment du lessivage des formations géologiques contenant du chlorure de sodium. Le sel peut provenir de la décomposition des minéraux, comme les silicates de sodium et d'aluminium. L'OMS recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine une valeur limite de 150 mg/l. Une ingestion excessive de chlorure de sodium provoque des cas pathologiques tels que l'hyper inflammation et l'hypertension. Son dosage s'effectue par la SAA (**Sabrina, 2004**).

Potassium (K^+) :

La teneur en potassium est beaucoup moins importante que celle de sodium, sa présence est à peu près constante dans les eaux naturelles. Il ne présente aucun inconvénient particulier, bien qu'il soit une des sources possibles de radioactivité de l'eau. Selon les normes de L'OMS, sa valeur maximale dans les eaux de consommation est de 12mg/L. Il est également dosé par la SAA (**Sabrina, 2004**).

Les Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates sont naturellement présents dans divers minéraux et ont de nombreuses applications commerciales, principalement dans l'industrie chimique. Leur présence dans l'eau peut provenir des effluents industriels et de dépôts d'origine atmosphérique, mais les concentrations les plus élevées se rencontrent généralement dans les eaux souterraines et sont d'origine naturelle. L'ion sulfate est l'un des anions les moins toxiques. Toute fois des concentrations élevées peut avoir un effet purgatif ou entraîner une déshydratation et une irritation gastro-intestinale. La présence de sulfates dans l'eau de boisson peut aussi lui

communiquer un goût perceptible et contribuer à la corrosion du réseau de distribution (**Maiga, 2005**).

Oxygène dissous

On considère qu'une eau est polluée lorsque la concentration en O₂ dissous est située au-dessous d'une certaine valeur limite ; car la consommation d'O₂ dans l'eau est principalement due à des substances polluantes qui sont microbiologiquement désagréables (**Bliefert & Perraud, 2001**).

Ammonium (NH₄⁺)

C'est un composé d'hydrogène et d'azote. Dans l'eau de surface et dans l'eau souterraine à faible profondeur, sa présence constitue un indicateur de pollution, tandis que dans l'eau souterraine profonde, c'est le signe que cette eau a séjourné longtemps dans le sol, ce qui en garantit sa bonne qualité. Dans les deux cas, l'ammonium doit être éliminé lors du traitement de l'eau (**Livre bleu, 2002**).

Les nitrates (NO₃⁻)

Les nitrates sont des ions minéraux nutritifs solubles dans l'eau, qui sont directement assimilables par les plantes. Ils sont ajoutés au sol soit directement par les agriculteurs soit indirectement par le fumier ou le purin, à cause de leurs solubilités dans l'eau, les nitrates sont facilement éliminés du sol en direction de la nappe phréatique, en particulier quand le sol est en jachère, par exemple en hiver (**Bliefert et Perraud, 2001**).

Les nitrites (NO₂⁻)

Les nitrites sont oxydés en NO par Cl, ClO et O. Les traitements biologiques peuvent transformer NH en NO. Si la quantité d'oxygène de l'eau n'est pas suffisante pour suivre l'oxydation jusqu'au stade de nitrate. Ce phénomène peut se produire la nuit sur des lacs à débit forcé en raison de la diminution de la photosynthèse (**Vilaginés, 2000**).

Demande biologique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ ou Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours, représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique présente dans un échantillon d'eau maintenu à 20°C, à l'obscurité, pendant 5 jours. Pour mesurer la DBO₅, on réalise une première mesure de la concentration en dioxygène dans l'échantillon d'eau. On répète cette mesure 5 jours plus tard. La DBO₅ représente la différence entre les deux concentrations mesurées. Cette technique permet de mesurer en laboratoire sur 5 jours (à 20°C dans l'obscurité), la quantité d'oxygène consommée par le processus naturel de décomposition de la matière organique décomposable présente dans un litre d'eau. Le résultat est donné en mg/l. d'oxygène (**Bahroun, 2020**).

Demande chimique en oxygène (DCO)

Elle regroupe la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation de l'ensemble des matières minérales et organiques biodégradables ou non, présentes dans un milieu. Donc les matières oxydables par les processus purement chimiques et celles oxydables par les processus biochimiques (**Boussebouda, 2005**).

I.2.2. Facteurs naturels influençant la composition de l'eau

La composition physico-chimique des eaux est influencée par plusieurs facteurs naturels, indépendants de l'activité humaine. Ces facteurs déterminent les concentrations en minéraux, en ions et en éléments dissous dans les eaux de surface, les nappes phréatiques ou les sources naturelles.

- **La géologie et le type de sol**

Les roches et les sols traversés par l'eau jouent un rôle essentiel dans sa composition. L'eau qui circule dans des formations calcaires est généralement riche en calcium et en bicarbonates, ce qui augmente sa dureté. À l'inverse, les terrains granitiques ou siliceux produisent des eaux moins minéralisées. Les processus naturels de dissolution des roches et de lixiviation des sols déterminent ainsi la teneur en minéraux et oligo-éléments présents dans l'eau (**Appelo & Postma, 2005**).

- **Le climat et les précipitations**

Le climat et le régime des précipitations affectent la dilution ou la concentration des substances dissoutes. Dans les zones à fortes pluies, l'eau est souvent plus diluée, ce qui réduit la teneur en ions et sels minéraux. Dans les régions arides, l'évaporation augmente la concentration en sodium, chlorures et autres ions dissous. Les précipitations peuvent également transporter naturellement des composés comme les oxydes de soufre et d'azote, qui modifient l'acidité des eaux de source (**Gene&Herbert, 1974; Driscoll et al., 2001**).

- **La température**

La température de l'eau influence la solubilité des gaz et des sels minéraux. Une eau froide contient davantage d'oxygène dissous, favorisant les équilibres chimiques naturels, tandis qu'une eau plus chaude peut libérer certains composés et modifier la chimie de l'eau.

- **Interaction avec les facteurs anthropiques**

Bien que ces facteurs soient naturels, ils déterminent en grande partie la sensibilité des eaux aux pollutions d'origine agricole et industrielle. Les sols perméables ou fissurés facilitent l'infiltration des nitrates et des pesticides provenant des activités agricoles (**Carstea et al., 2016**), tandis que les rejets industriels peuvent introduire des substances chimiques et des

métaux lourds. La vulnérabilité des nappes souterraines à ces contaminants dépend alors de leur composition géologique et de leur capacité naturelle de filtration (**Kümmerer, 2004**).

I.2.3. Sources de pollution physico-chimique

- **Eaux usées domestiques et fuites septiques**

Les rejets domestiques représentent une autre source importante de pollution physico-chimique des eaux de source. Les eaux usées non traitées ou issues de systèmes d'assainissement défectueux contiennent des nitrates, des phosphates, des détergents et d'autres produits chimiques ménagers. Ces substances peuvent s'infiltrer dans le sol et atteindre les sources naturelles, entraînant la contamination de l'eau potable. Elles modifient également les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, notamment le pH et l'oxygène dissous. **Tchobanoglous et al., 2003** soulignent que les systèmes d'assainissement inadéquats constituent une menace directe pour la qualité des eaux de source.

- **Activités minières et carrières**

Les activités d'extraction minière peuvent générer des résidus contenant des métaux lourds et des produits chimiques tels que le cyanure, qui peuvent contaminer les nappes phréatiques alimentant les sources. L'infiltration de ces substances peut provoquer l'acidification de l'eau et poser un risque sérieux pour la santé humaine et les écosystèmes aquatiques. **Lottermoser, 2010** ; explique que les déchets miniers non traités sont une source majeure de pollution chimique des eaux souterraines et des sources naturelles.

- **Pollution atmosphérique et pluies acides**

Les polluants atmosphériques, tels que le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x), peuvent se dissoudre dans l'eau de pluie et s'infiltrer dans le sol jusqu'aux nappes phréatiques et sources. Cette pollution provoque une diminution du pH des eaux de source, affectant la chimie de l'eau et perturbant les micro-organismes aquatiques. **Gene & Herbert (1974)** ont montré que les pluies acides issues de la pollution atmosphérique peuvent modifier durablement la qualité des eaux naturelles.

I.3. Qualité microbiologique des eaux

Généralement, tous les ressources d'eaux soit des lacs, des rivières, des fleuves, aussi bien des nappes phréatiques un peu profondes, contient 3 type des germes : typiquement aquatique, tellurique (due par ruissellement) et des germes de contamination humaine ou animale (contamination fécal) ; que ce soit le type du germe il peut engendrer des maladies infectieuses chez l'homme (**Debabza, 2005**).

I.3.1. Microorganismes indicateurs de contamination

L'analyse microbiologique de l'eau distribuée à la consommation basée sur la recherche des "microorganismes indicateurs de contamination fécale". Ces indicateurs sont spécifiques de la flore intestinale, ils ne sont pas nécessairement pathogènes, mais leur présence en grand nombre dans un milieu aquatique indique l'existence d'une contamination fécale, et donc un risque épidémiologique potentiel **(Manceur & Djaballah 2016)**.

- **Les germes totaux**

Sa recherche vise à dénombrer non spécifiquement le plus grand nombre de microorganismes, le dénombrement des bactéries aérobies à 22°C et 37°C s'effectue dans La gélose glucosée à l'extrait de levure ou PCA. La charge mésophile totale n'est pas un paramètre d'appréciation de la qualité bactériologique mais quand même peut nous renseigner sur le degré de potabilité des eaux et tous produits alimentaires. Ainsi, ils renseignent sur le degré de protection des nappes souterraines d'où provient l'eau à analyser **(Rodier, 2005)**.

- **Bactéries indicatrices spécifiques de pollution fécale**

Ces bactéries ont été choisies parce qu'elles sont présentes en grand nombre dans les selles des animaux à sang chaud qui sont des sources fréquentes de contamination assez grave, qu'elles sont détectables facilement. Trois indicateurs sont à noter : les Coliformes totaux, Coliformes fécaux, et Les streptocoques fécaux **(Dahel, 2009)**.

- **Les coliformes totaux :**

Sous le terme de « coliformes » est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant en fait à la famille des *Enterobacteriaceae*, correspondent à des bacilles Gram négatif, non sporulés, aéro/anaérobies facultatifs, possèdent des propriétés caractéristiques de structure et de culture à 35- 37C°, ils sont sensibles au chlore. Ils se répartissent en deux catégories:

- Les germes thermophiles
- Les germes psychrophiles (aquatique ou terrigène).

Leur intérêt plus moindré pour déceler une contamination d'origine fécale. Les coliformes comprennent les genres : *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Yersinia*, *Serratia*. **(Rodier J., 2005)**.

- **Les coliformes fécaux :**

Les coliformes fécaux sont un sous-groupe de coliformes totaux, l'existence de ces germes peut être une indication de la présence des micro-organismes entéropathogènes, comme les salmonelles **(Debabza, 2005)**.

Un autre test peut fournir les mêmes indications que celles fournies par le dénombrement des coliformes fécaux, c'est le dénombrement des *E. coli* présumés qui correspondent à des coliformes thermo-tolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane, à 44°C.

***E. coli*:** L'espèce la plus fréquemment associée aux coliformes fécaux est *E. coli* représente toutefois 80 à 90% des coliformes thermo-tolérants détectés. Selon l'OMS (2004), n'énonce que la présence d'*E.coli*, apporte la preuve incontestable d'une pollution fécale récente (Maiga,2005).

➤ **Les streptocoques fécaux :**

Ce sont des bactéries sphériques groupées en paires ou en chaînes, Gram positif, catalase négatif et anaérobies facultatives. Ce groupe est divisé en deux sous-groupes : *Enterococcus* et *Streptococcus*. Ce sont les streptocoques possédant une substance antigénique caractéristique du groupe D de Lancefield (Rodier, 2005).

➤ **Les Clostridium sulfito-réducteurs**

Ce sont des bactéries à Gram positif mesurant 4 à 6µm de long et 1 à 2µm de large produisant des spores dont le plus caractéristique est *Clostridium perfringens*. Elles font partie de la flore tellurique naturelle, aussi bien que dans les matières fécales humaines et animales. C'est pourquoi, leur utilisation en tant qu'indicateurs de contamination fécale d'une eau n'est pas très spécifique. (Maiga, 2005) L'intérêt de la recherche de tels indicateurs réside dans la propriété de sporuler, ce qui les rend particulièrement résistant aux traitements de désinfection (Hélène, 2000).

➤ **Bactéries pathogènes**

Les bactéries pathogènes jouent le rôle de signal d'alarme. En fait, seules les *Salmonella* et les *Shigella* sont des bactéries fréquemment recherchées, en dehors de cas d'épidémies. Ces dernières années cependant, une certaine importance a été attribuée aux *Yersinia*, *Campylobacter*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Legionella pneumophila*, *Aeromonashydrophila*, *Vibrio cholerae*. (Manceur & Djaballah, 2016)

I.3.2. Origine de la pollution microbiologique

Si ses sources sont variées, la plus en vue reste les rejets des structures sanitaires (El Ouali et al., 2010).

Les micro-organismes pullulant en milieu aquatique sont naturellement acheminés par l'écoulement de l'eau, entraînant l'éclosion de plusieurs maladies hydriques à l'instar du choléra ou de la fièvre typhoïde. Même quand les maladies ne surgissaient pas, ce ne serait qu'un sursis très aléatoire pour la santé de ses consommateurs, avalant des variétés de bactéries

qui entreraient le moment opportun en conflit avec le système immunitaire. En plus l'eau peut être un milieu favorable aux développements des bactéries et virus nuisibles rendant, ainsi l'eau impropre à la santé humaine utilisé pour leurs besoins, pour leur consommation d'aliments contaminés par l'eau, ou encore lors d'un bain ou d'un contact avec des eaux à usage récréatif. Le moyen le plus commun de ces transmissions reste la voie fécale (**Saab et al., 2007**).

I.3.3. Risques sanitaires associés

La pollution microbiologique des eaux de source constitue un risque sanitaire majeur pour la santé humaine, en particulier lorsque ces eaux sont utilisées pour la consommation sans traitement approprié.

Elle résulte de la présence de micro-organismes pathogènes d'origine fécale, notamment des bactéries (*Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*), des virus (norovirus, entérovirus, virus de l'hépatite A et E) et des protozoaires (*Giardia intestinalis*, *Cryptosporidium parvum*), capables de provoquer des maladies hydriques telles que les gastro-entérites aiguës, les diarrhées sévères, les vomissements, la fièvre et les hépatites virales (**World Health Organization [WHO], 2017**).

Ces pathologies peuvent entraîner des complications graves chez les populations vulnérables, notamment les nourrissons, les personnes âgées, les femmes enceintes et les individus immunodéprimés, et certaines peuvent être mortelles en cas d'exposition prolongée ou de forte contamination (**Ashbolt, 2004**). Par ailleurs, certains parasites comme *Cryptosporidium* présentent une résistance élevée aux procédés classiques de désinfection, ce qui augmente le risque de persistance dans les eaux de source (**Payment & Locas, 2011**).

Selon l'OMS, les maladies liées à l'eau contaminée représentent encore une cause importante de morbidité et de mortalité à l'échelle mondiale, ce qui souligne l'importance de la surveillance microbiologique, de la protection des captages et du traitement adéquat des eaux de source afin de réduire les risques sanitaires associés (**WHO, 2016**).

I.4. Indices de qualité et de pollution des eaux

I.4.1. Indices de qualité de l'eau

Les indices de qualité des eaux constituent des outils synthétiques largement utilisés dans les études hydrologiques et environnementales afin d'évaluer l'état global des ressources en eau. Leur principe repose sur l'intégration de plusieurs paramètres physico-chimiques, biologiques et parfois microbiologiques en une valeur numérique unique ou en classes qualitatives représentatives du niveau de qualité de l'eau. Cette approche permet de simplifier l'interprétation de données analytiques complexes et de faciliter la communication des résultats

auprès des gestionnaires, des décideurs et des usagers de l'eau (**Horton, 1965 ; Brown et al., 1970**).

Les indices de qualité des eaux sont généralement établis par comparaison des valeurs mesurées aux normes ou aux seuils de référence définis par des organismes nationaux ou internationaux, ce qui permet d'apprécier la conformité de l'eau aux différents usages, notamment l'alimentation en eau potable, l'irrigation ou la protection des écosystèmes aquatiques (**CCME, 2001**). Introduits initialement pour l'évaluation physico-chimique des eaux, ces indices ont progressivement évolué vers des approches plus intégrées, tenant compte des composantes biologiques et microbiologiques, reconnues pour leur capacité à refléter les effets cumulés et à long terme des pressions naturelles et anthropiques sur les milieux aquatiques (**Rosenberg & Resh, 1993**).

En outre, l'intégration d'indicateurs microbiologiques, tels que les coliformes et *Escherichia coli*, est essentielle pour l'évaluation des risques sanitaires associés à l'utilisation de l'eau, en particulier pour la consommation humaine (**WHO, 2016**). Ainsi, les indices de qualité des eaux constituent aujourd'hui des outils incontournables pour la surveillance, la gestion durable et la protection des ressources hydriques.

I.4.2. Principe de l'indice de pollution microbienne (IPM)

L'Indice de Pollution Microbienne (IPM) est un outil d'évaluation de la qualité microbiologique des eaux qui permet d'estimer le degré de contamination d'un milieu aquatique par des microorganismes d'origine fécale. Il repose sur le dénombrement de germes indicateurs tels que les coliformes fécaux (*Escherichia coli*), les streptocoques fécaux ou entérocoques intestinaux et parfois les clostridiums sulfito-réducteurs, exprimés en unités formant colonies par 100 mL d'eau.

Le principe est de répartir les valeurs des éléments polluants en 05 classes et de déterminer à partir de ses propres mesures le numéro de classe correspondant pour chaque paramètre pour en faire la moyenne (**Kherifi & Bousnoubra, 2012**) (Tableau 4).

Tableau 4. Classification de la pollution microbiologique (IQM)

Classe	Bact. tot./ml	colif. f./ml	strepto. f./ml	IQM	Contamination fécale
1	<2000	<100	<5	4,3-5,0	Nulle
2	2000-9000	100-500	5-10	3,5-4,2	Faible
3	9000-45000	500-2500	10-50	2,7-3,4	Modérée
4	45000-360000	2500-20000	50-500	1,9-2,6	Forte
5	>360000	>20000	>500	1,0-1,8	Très forte

I.4.3. Intérêts et limites des indices

➤ Indices de qualité de l'eau

Intérêts :

- Permettent de synthétiser un grand nombre de paramètres physico-chimiques, biologiques et microbiologiques en une information globale et facilement interprétable.
- Facilitent la compréhension et la communication des résultats auprès des gestionnaires, décideurs et du grand public (**Horton, 1965 ; Brown *et al.*, 1970**).
- Autorisent la comparaison spatiale et temporelle de la qualité des eaux entre différents sites ou périodes d'étude.
- Constituent des outils efficaces d'aide à la décision pour la gestion, la surveillance et la protection des ressources en eau.
- Permettent d'évaluer la conformité des eaux aux normes nationales et internationales selon les usages envisagés (**CCME, 2001**).
- Offrent une approche intégrée en tenant compte, dans certains cas, des impacts biologiques et microbiologiques sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine (**Rosenberg & Resh, 1993 ; WHO, 2016**).

limites

- Le choix des paramètres et l'attribution des poids relatifs peuvent être subjectifs et varier selon les méthodes et les auteurs.
- La simplification des données peut masquer des pollutions spécifiques ou des dépassements critiques de certains paramètres.
- Certains indices sont peu sensibles aux pollutions ponctuelles ou aux variations saisonnières rapides.
- Les indices globaux ne reflètent pas toujours fidèlement l'état écologique réel des milieux aquatiques.
- La comparaison entre différentes études peut être difficile lorsque des indices ou des normes de référence différentes sont utilisés.
- Les polluants émergents et certains contaminants microbiologiques spécifiques sont souvent insuffisamment pris en compte (**WHO, 2016**).

➤ Indice de pollution microbienne (IPM)

intérêts

- Permet d'évaluer rapidement le niveau de contamination microbiologique des eaux, en particulier par les microorganismes indicateurs de pollution fécale comme *Escherichia coli* et les coliformes.
- Fournit une synthèse simple et quantitative de l'état sanitaire des eaux, facilitant la lecture et l'interprétation des données.
- Aide à identifier les zones ou les périodes présentant un risque sanitaire élevé pour l'usage de l'eau (consommation humaine, irrigation, loisirs).
- Sert d'outil de surveillance efficace pour le suivi des impacts des activités anthropiques sur les ressources en eau.
- Permet la comparaison spatiale et temporelle de la qualité microbiologique des différents sites ou campagnes d'échantillonnage.
- Contribue à la prise de décision pour la gestion, la protection et le traitement des eaux, en complément des indices physico-chimiques **(WHO, 2016)**.

Limites

- Repose sur des microorganismes indicateurs, qui ne reflètent pas toujours la présence réelle de tous les agents pathogènes.
- Ne permet pas d'identifier précisément l'origine de la contamination (humaine, animale ou environnementale).
- Sensible aux variations saisonnières et aux conditions hydrologiques, ce qui peut entraîner des fluctuations importantes des résultats.
- La simplification des données en un indice unique peut masquer des contaminations ponctuelles ou des pics de pollution.
- Ne tient pas toujours compte de la survie différente des microorganismes dans l'environnement aquatique.
- Dépend fortement de la qualité des méthodes d'échantillonnage et d'analyse microbiologique.
- Ne prend généralement pas en compte les contaminants microbiologiques émergents comme certains virus ou protozoaires **(WHO, 2016)**.

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Introduction

La zone d'étude est située dans la wilaya d'El Tarf, localisée à l'extrême Nord-Est de l'Algérie, à la frontière algéro-tunisienne. Cette wilaya relevait administrativement de la wilaya d'Annaba jusqu'en 1984, année de son accession au statut de wilaya à part entière. Elle s'étend sur une superficie d'environ 3 339 km², répartie en sept (07) daïras et vingt-quatre (24) communes. En raison de sa position géographique au sein du bassin méditerranéen et de la richesse de ses écosystèmes naturels, notamment la diversité de ses zones humides, la wilaya d'El Tarf est communément désignée comme la « wilaya verte ». Ces caractéristiques confèrent à la région une importance environnementale et écologique particulière à l'échelle nationale.

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. La situation géographique de la commune Boutheldja et Deran :

Les communes de Boutheldja et de Dréan sont situées dans le Nord-Est de l'Algérie, au sein de la wilaya d'El Tarf. Elles appartiennent toutes deux à la plaine d'El Tarf

- **La commune de Boutheldja** occupe une position orientale de la wilaya, à proximité immédiate de la frontière algéro-tunisienne, et se distingue par la présence de zones humides naturelles, de marais et de plans d'eau d'intérêt écologique majeur. Cette localisation place Boutheldja dans un contexte environnemental sensible, fortement dépendant des conditions hydrologiques et climatiques régionales.
- **La commune de Dréan**, quant à elle, est située dans la partie centrale de la wilaya d'El Tarf. Elle bénéficie d'une situation géographique favorable, marquée par une bonne accessibilité et une vocation agricole dominante. Son territoire est caractérisé par un relief de plaine, des sols riches et un environnement naturel influencé par les ressources en eaux superficielles et souterraines.

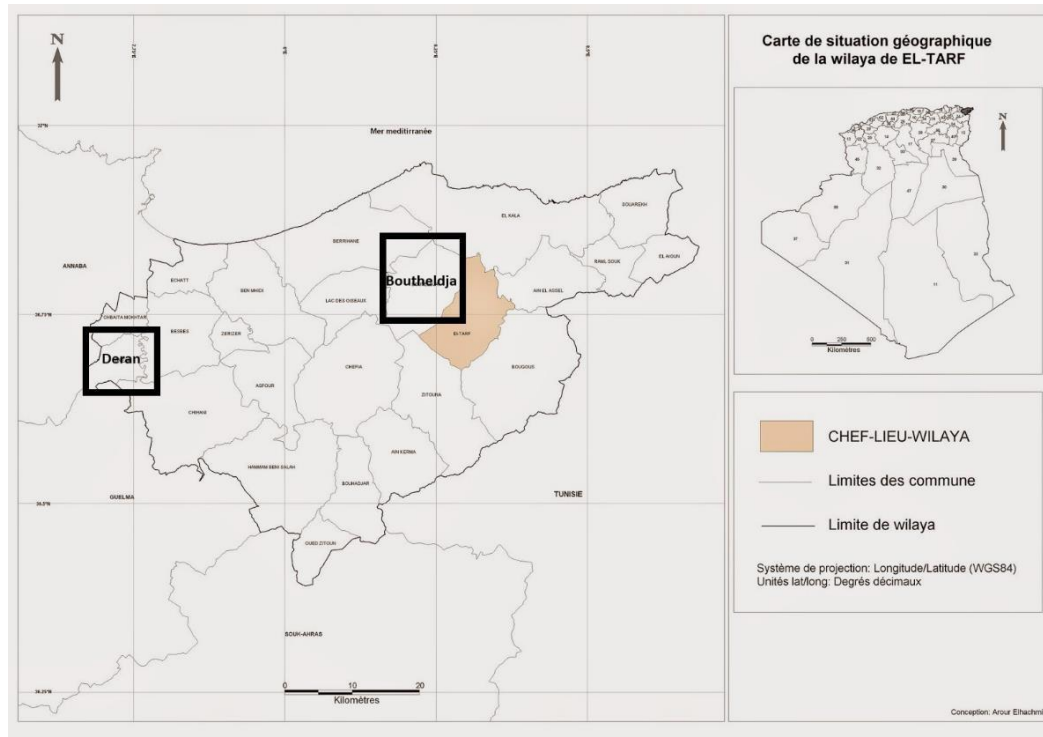


Figure 01. Situation géographique de la zone d'études

II.1.2. Conditions climatiques et hydrogéologiques

II.1.2.1. Condition climatique

Le climat d'El Tarf se caractérise par des étés très chauds, secs et majoritairement dégagés, mais avec une humidité notable. Les hivers sont longs, frais, venteux et partiellement nuageux, accompagnés de précipitations. Sur l'année, les températures varient typiquement de 7 °C à 32 °C, avec des extrêmes inférieurs à 4 °C ou supérieurs à 37 °C qui restent rares.

➤ Température

La température constitue un paramètre fondamental contrôlant la répartition géographique des biomes et des êtres vivants. Son influence s'explique par son action directe sur les processus métaboliques, puisqu'elle affecte l'ensemble des réactions chimiques, physiques et biochimiques (**Ramade, 2009**). Les variations régionales de température sont principalement liées à l'altitude et à l'éloignement de la côte (**Carrega & Garcia, 2000**). Une étude sur le nord de l'Algérie (**Seltzer, 1946**) montre ainsi une période plus froide que la moyenne (novembre-avril) suivie d'une période plus chaude (mai-octobre). Les données climatiques d'El Tarf indiquent que les températures minimales sont observées en janvier et février, alors que les

maximales sont enregistrées en juillet et août (Figure 02). Les valeurs moyennes mensuelles de la température de la région d'étude pour la période de 1988 à 2018

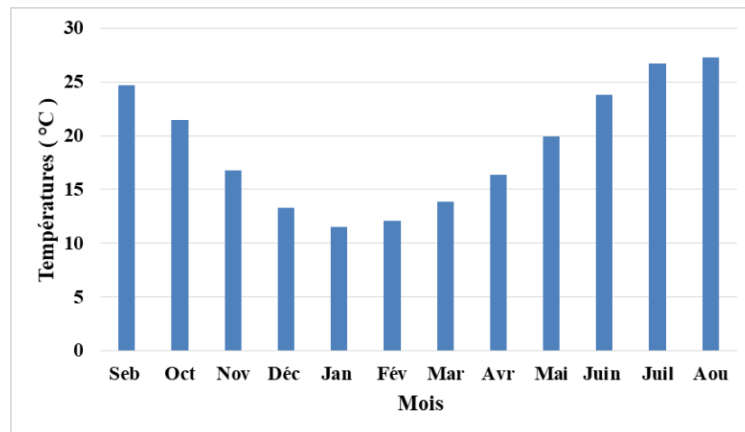


Figure 02. Variation des températures mensuelles moyennes de la région d'El Tarf de 1988 à 2018 (in Chettibi, 2020).

➤ La pluviométrie

Les précipitations, élément essentiel et permanent au fonctionnement des écosystèmes, jouent un rôle clé dans le cycle hydrologique et les milieux aquatiques (**Ramad, 2009**). En Méditerranée, plus de 65% des pluies surviennent durant les six mois les plus froids (**Aschmann, 1973**).

Ces précipitations résultent principalement des perturbations cycloniques atlantiques et de l'interception des masses nuageuses par les reliefs élevés (**Philandraset al., 2011**). Le NordEst algérien, caractérisé par de fortes précipitations (>1500 mm/an), enregistre l'essentiel de ses pluies en automne et en hiver. (**Lazriet al., 2013**). Des données climatiques de la Wilaya d'El Tarf indiquent que les mois de novembre et décembre enregistrent les cumuls pluviométriques les plus élevés, contrairement aux mois de juillet et août qui sont les plus secs. (Figure 03).

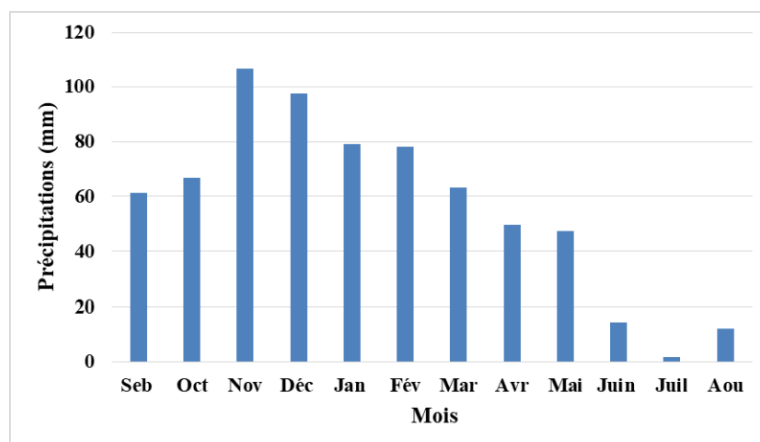


Figure 03. Variation des précipitations mensuelles moyennes de la région d’El Tarf de 1988 à 2018 (in Chettibi, 2020).

➤ Le vent

Agent écologique majeur, le vent agit comme un facteur limitant dans plusieurs biotopes. Son influence s’étend à des processus clés tels que la dispersion des propagules et des graines, le transport passif d’organismes animaux et végétaux, et la colonisation de nouveaux habitats **(Vanschoenwinkel et al., 2009)**. Cette importance se manifeste particulièrement dans le Nord-Est algérien. Cette région est en effet dominée par des vents d’Ouest et de Nord-Ouest, surtout hivernaux, qui sont à l’origine des précipitations provenant de l’Atlantique. En été, les vents sont d’origine du Sud-Ouest, l’air chaud du Sahara traverse la chaîne montagneuse de l’Atlas pour atteindre le littoral. Ces derniers réchauffent l’atmosphère, favorisent l’assèchement des plans d’eau et des végétations, et augmentent le risque des incendies **(Samraoui & De Belair, 1998)**.

➤ L’humidité

L’humidité, définie comme la quantité de vapeur d’eau atmosphérique, affecte directement la vie d’espèces comme les amphibiens et la croissance végétale **(Dreux, 1980)**. En Numidie, cette humidité reste élevée toute l’année, même en été. Cette particularité régionale s’explique par la proximité de la côte et l’abondance de lacs et d’étendues d’eau saisonnières. **(Benyacoub, 1993)**. L’examen de tableau. Et la (Figure 04) permettent de noter que les valeurs les plus élevées de l’humidité ont été enregistrées au mois de décembre et les valeurs les plus faibles ont été enregistrées pour le mois de juin

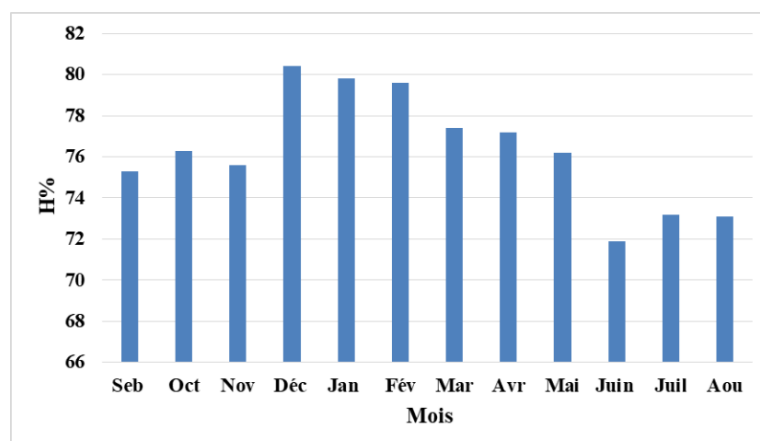


Figure 04. Variation des humidités mensuelles moyennes de la région d’El Tarf de 1988 à 2018 (in Chettibi, 2020).

II.1.2.2. Hydrogéologiques

➤ Les bassins versants

La wilaya est traversée par trois oueds importants, qui sont de l’ouest à l’est : - Oued Seybousse qui traverse la wilaya sur un parcours de 30 Km et poursuit son cours plus au nord pour se jeter à la mer au niveau de la ville de Annaba, la superficie du bassin versant de l’oued seybousse situé dans la wilaya d’El- Tarf est de 267 Km², Soit environ 4 %de la superficie totale du bassin versant de l’oued Seybousse. - Oued Bounamoussa et Oued Kebir Est, qui forment à leur jonction l’embouchure de l’Oued Mafragh au niveau du Marais de la Mekhada à environ 20 Km à l’Est de la ville d’Annaba et à 45 Km à l’Ouest de la ville d’El- Kala. Du point de vue Hydrologique, La wilaya d’El- Tarf est située majoritairement dans le bassin versant des côtiers constantinois Est (03) : totalement les sous bassin versant de la Magragh (03 17), des côtiers El- Kala (03 18) et de l’Oued Ed daba (03 19) et partiellement les sous bassins de la Bounamoussa (03 15) et du Kebir Est (03 16). Une infime partie de la wilaya à l’Ouest couvre une partie du sous bassin versant de la Seybousse maritime (14 06) (**Patw El-Tarf phase1, 2011**).

➤ Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la wilaya d’E –Tarf est très singulier par rapport au reste des régions telliennes, il se distingue par la présence d’un grand nombre de lacs et de marécages développés sur la partie basse de cette wilaya. Ils sont tous développés dans la plaine de Ben M’Hidi et localement à travers les reliefs collinaires de l’extrémité NE de cette wilaya, à la frontière tunisienne. Cependant, à l’exception des oueds débouchant dans les lacs, la totalité du

réseau hydrographique de cette wilaya est entièrement tributaire de la mer méditerranée. Parmi les principaux oueds débouchant en mer. L'ensemble du territoire de la wilaya d'El-Tarf est drainé par trois principaux systèmes hydrographiques : Le premier, celui de l'Oued Seybousse qui ne concerne cette wilaya que dans sa partie ouest, entre Drean au nord et Chihani au sud, Le second, le plus important de la wilaya, est celui de l'Oued Mefragh qui draine la majeure partie des oueds de la région. Ce sont tous les oueds venant des reliefs montagneux au sud en allant d'Ouest en Est comme suit :

-L'Oued Bounamoussa qui draine le plus important bassin versant de la wilaya en recevant l'oued El Kébir avec ses principaux affluents, comme les oueds M'Kouk et l'Oued Bou-Hadjar. Notons aussi que l'oued Bounamoussa reçoit, en plus de l'Oued el Kébir et l'Oued Guerra, même les eaux de la région de Chihani au SW de la wilaya. Notons ici qu'il existe dans la wilaya d'El-Tarf deux oueds qui portent le même nom, il s'agit de l'oued El-Kébir (Ouest), affluent de l'oued Bounamoussa et l'Oued El-Kébir (Est), le plus important, celui qui draine la partie Est et SE de la wilaya et qui représente le principal affluent de l'Oued El-Mefragh.

-L'Oued Cheffia qui change de nom à l'aval du domaine montagneux en portant le nom de Oued Bou Latane aux environs de Bouteldja. C'est un oued nettement plus petit que celui de Bounamoussa, mais il reste très important sur le plan des eaux drainées. De direction générale S-N, cet oued draine partiellement les eaux de la partie sud-centre de la wilaya.

-L'Oued El Kébir, dont la direction principale est Est-Ouest, draine la majeure partie des oueds provenant du SE et Est de la wilaya. Il ne reçoit du nord et du NE que quelques oueds mineurs dont la plupart tournent le dos au domaine des lacs. Parmi les principaux affluents de cet oued, nous citons d'ouest en Est l'Oued Bou Hallouf, l'Oued Guergour et l'Oued Sebaa. Notons que le bassin versant de l'oued Bou Hallouf est très important, il draine une large partie des reliefs méridionaux de la wilaya. Il est alimenté, entre autres, par les oueds Zitoune, l'Oued Bsibisse et l'Oued Guentour. L'Oued El Kébir, après avoir reçu les oueds Ballouta et Bougous, drainant la frontière algéro-tunisienne, il élabore un grand bassin dans lequel est développée l'agglomération, chef-lieu de la wilaya, El-Tarf (**Patw El-Tarf phase1, 2011**).

➤ Géologie

Les dépôts du matelas dunaire sont le produit principale de l'érosion intense des massifs argilo gréseux numidiens et gneissiques charries vers la mer, dégradés en sable, puis ramenés à l'intérieur par le vent. Les niveaux d'argiles, provenant du massif numidien, s'intercalent dans les niveaux sableux. La délapidification progressive des grés numidiens et des formations métamorphiques a donc donnée des sables qui à l'état pure renfermes 80 à 90% de silice. C'est

ce qui dégage de la carte géologique et structurale établit par **Vila (1978)** qui montre un lambeau du socle de l'Edough au Nord de Bouteldja. Le sable est donc siliceux, fin et renferme une quantité plus ou moins forte d'argile. Il devient très argileux au pied de la chaîne numidienne. La présence de fer oxydé donne au sable sa coloration rouge, brune ou jaune (source de Bouglès).

Les travaux réalisés dans la région (**Khérici, 1985 ; Ramdani, 1996 ; Hani, 2003**) permettent de distinguer :

- Dessables blancs ou jaune claire généralement perméables situés au centre du massif dunaire ;
- Des sables dont les grains sont enrobés d'une fine pellicule d'argile et de ce fait moins perméable que les bancs localisés surtout en bordures des reliefs gréseux ;
- Des sables rouges, localisés à l'Ouest et au Sud Ouest, plus perméables que les précédentes ;
- Des vases sablo-limoneuse déposées au fond des marigots « Nechaas » de couleur noir en relation avec la décomposition des végétaux. Les analyses granulométriques effectuées à différents points du massif dunaire (en surface et en profondeur) ont bien confirmé que ces sables sont homogènes et d'origine éolienne (bien superposables à la courbe standard des dépôts éoliens)

La granulométrie est fine à moyenne (75 à 85 %), les grains ayant un diamètre de 0.15– 0.5 mm. Il s'en suit en l'absence d'argile une bonne perméabilité de la formation (10⁻⁴ à 10⁻³ m/s) de telle sorte que l'eau précipitée y pénètre immédiatement et totalement. Ces sables jouent ainsi le rôle de filtre naturel et de magasin aquifère. Seuls les sables des bas reliefs argilo- gréseux ont une moins bonne perméabilité (10⁻⁶ m/s) mais une capacité de rétention supérieure due à la fraction argileuse provenant de l'érosion (**Joleaud, 1936**)

II.1.3. Activités anthropiques

La diversification et la richesse du sol de la wilaya d'El Tarf, lui confère une double vocation agricole et touristique ; elle dispose d'une superficie agricole utile (S.A.U) de 71 000 hectares (24% du territoire) et d'un littoral de 90 km de long, regroupant cinq zones d'expansion touristique. Elle est en outre frontalière avec la république de la Tunisie sur une bande de 98 km de long, allant de la commune de Souarekh au Nord, jusqu'à la commune d'Aïn Karma au Sud

- **L'agriculture**

L'agriculture en générale, et le secteur forestier plus précisément, sont les identifiants directs de la wilaya. Les principales spéculations agricoles sont menées en sec. Leurs superficies représentent 95% de la SAU. Cette situation pour la rappeler, est attribuée au climat humide de la région avec une moyenne de précipitation de l'ordre de 750 mm/an. Les terres de parcours et improductives représentent moins de 20%. A l'échelle de la wilaya, la céréaliculture est la plus convoitée par les exploitants avec une surface de l'ordre de 30% de la SAU. La situation de l'occupation du sol montre que 57% de la SAU ont été mobilisés pour la campagne agricole 2008/2009. EL Tarf et Aïn Assel restent les seules communes qui mobilisent le moins de SAU pour leur campagne agricole. A l'opposé, nous retrouvons trois communes dans lesquelles presque 80% de la SAU est utilisée, il s'agit de Bouteldja, Berrihane et El Aioun

➤ **L'industrie**

Le secteur de l'industrie reste le moins développer dans la wilaya par rapport aux autres secteurs. Par région, le parc national d'El Kala ne renferme sur son territoire que 10 unités avec une grande concentration dans les communes d'El Kala et de Bouteldja. Dans les autres communes de la wilaya, l'activité agro-alimentaire prédomine. Elles se localisent dans les communes limitrophes de la région d'Annaba. Cela démontre bien le caractère attractif du pôle industriel d'Annaba (El Hadjar).

II.2. Stratégie d'échantillonnage

Les principaux aspects, dont il faut tenir compte pour obtenir un échantillon d'eau représentatif sont les suivants:

- La sélection convenable du point d'échantillonnage.
- Le strict respect des procédures d'échantillonnage.
- La conservation adéquate de l'échantillon (**Rodier. J., 1997**).

II.2.1. Choix des stations

Pour contribuer à l'étude de la qualité microbiologique et physico-chimique des eaux de sources de la région d'el Tarf, nous avons choisis deux points d'eau (source) dans la commune de Boutheldja et la commune de Drane. Le choix repose sur des considérations scientifiques et pratiques clairement établies :

- Elle constitue une ressource fondamentale pour l'alimentation en eau potable des habitants de la région.
- Ce point d'eau, largement utilisé par la population locale, est situé dans un environnement susceptible d'être soumis à diverses sources de pollution, ce qui en fait un site pertinent pour l'évaluation de la qualité des eaux.
- Sa proximité et sa facilité d'accès ont permis d'assurer un suivi régulier et fiable des prélèvements.

II.2.2. Période et fréquence des prélèvements

Dans notre travail, le prélèvement des échantillons d'eaux (échantillons) s'est effectué durant la période allant de 2023/2024 et 2024/2025

II.2.3. Méthodes de prélèvement et de conservation

II.2.3.1. Prélèvement

➤ Prélèvement de l'eau pour avoir la qualité physicochimique :

L'échantillonnage destiné à la physico-chimie ne pose pas de problèmes particuliers. des flacons plastiques (polyéthylène) sont suffisants et le volume du prélèvement est de un litre pour une analyse complète. L'échantillon peut être gardé quelques jours mais il est préférable d'effectuer le dosage des éléments chimiques le plus tôt possible. Les éléments tel les nitrates peuvent subir des modifications lors de la conservation. **(Coulibaly, 2005).**

A chaque échantillon, les flacons sont rincés d'abord avec l'eau à analyser puis ils sont remplis jusqu'au bord, rébouchonnés, étiquetés et conservés immédiatement dans une glacière portative avec une réserve de froid suffisante pour garder une température inférieure à 4°C, jusqu'à l'arrivée au laboratoire.

➤ Prélèvement de l'eau pour avoir la qualité bactériologique :

L'échantillonnage destiné à la bactériologie sont prélevés à l'aide de flacons en verre pyrex munis de bouchons à vis, stériles **(Derwicheet al, 2008)**. Le flacon débouché et immergé complètement à une profondeur de 30 cm en position verticale renversée en le tenant par le fond : il est alors retourné jusqu'à ce que l'ouverture soit légèrement plus haute que le fond et dirigée dans le sens contraire du courant. Après le prélèvement, les flacons doivent être soigneusement rebouchés **(Guiraud, 1998)**. Il est essentiel que les échantillons soient

clairement étiquetés immédiatement avant les prélèvements et que les étiquettes soient lisibles et in détachables (**Lightfoot, 2002**).

Les échantillons sont transportés dans une caisse iso-thermique (4-6 °C) jusqu'à leur arrivée au laboratoire (Haddad, 2004). La teneur des échantillons en coliformes se modifie entre le moment du prélèvement et celui d'examen. Il est important donc de procéder à l'analyse le plus rapidement possible, de préférence dans l'heure suivante et en aucun cas après 24 heures (**Coulibaly, 2005**).

II.2.3.2. Conservation

Pour un meilleur résultat d'analyse il faut faire une meilleure condition de conservation et de transport.

- L'échantillon conservé dans des glacières entre 4 à 6 °C, durée de prélèvement et transport jusqu'au laboratoire d'ADE de Bouthalja.

Depuis le moment du prélèvement à celui de l'examen, la teneur des Echantillons encoliformes se modifie, il est important de procéder à l'analyse dans un délai très court, inférieur à 8 heures. En aucun cas l'analyse ne doit être effectuée lorsque le délai dépasse 24 heures.

Si le transport doit dépasser une heure, il faut utiliser une boîte isotherme munie d'éléments réfrigérants. Pour les Echantillons qui ne sont pas analysés sont aussitôt placés au réfrigérateur et conservés jusqu'au début des analyses.

II.3. Analyses physico-chimiques

Différents paramètres globaux sont ainsi mesurés dont certains sur site (sur le terrain) et les autres aux laboratoires, Les paramètres enregistrés sont :

II.3.1. Paramètres mesurés in situ

Le paramètre enregistré sur site est la conductivité électrique (CE) et l'appareil de mesure est un multi-paramètre sur site. Il a une sonde qui affiche les résultats en même temps.

➤ Température

La température de l'eau constitue un paramètre physico-chimique important influençant plusieurs caractéristiques de l'eau. Elle affecte notamment la solubilité des gaz, les réactions chimiques ainsi que certains paramètres analytiques tels que la conductivité électrique.

La température doit être mesurée directement sur le site d'échantillonnage afin d'obtenir des valeurs représentatives des conditions naturelles. Les appareils de mesure du pH ou de la conductivité sont généralement équipés d'un thermomètre intégré permettant l'enregistrement simultané de la température.

➤ **pH**

Le pH est un paramètre important permettant d'évaluer l'acidité ou l'alcalinité de l'eau. Il peut également mettre en évidence la présence de certaines substances chimiques dans l'échantillon. Ainsi, l'eau peut être caractérisée par un pH acide, neutre ou alcalin.

La mesure du pH est réalisée à l'aide d'un pH-mètre portable selon la méthode potentiométrique, basée sur la mesure de la différence de potentiel entre une électrode de verre sensible au pH et une électrode de référence.

➤ **Conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique (CE) est un paramètre physico-chimique qui permet d'évaluer la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Cette propriété dépend principalement de la présence des ions dissous dans l'eau, tels que les ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-).

La conductivité constitue ainsi un indicateur important du degré de minéralisation de l'eau. Une valeur élevée de la conductivité traduit généralement une forte concentration en sels minéraux dissous.

La mesure de la conductivité électrique est réalisée in situ à l'aide d'un conductimètre intégré dans un multi-paramètre portable, équipé d'une sonde permettant la mesure directe dans l'eau. Les résultats sont généralement exprimés en micro Siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

➤ Turbidité

La turbidité correspond à la diminution de la transparence de l'eau due à la présence de matières en suspension non dissoutes telles que les particules minérales, les matières organiques, les micro-organismes ou les bactéries.

La mesure de la turbidité est réalisée à l'aide d'un turbidimètre, basé sur la comparaison entre la lumière diffusée et la lumière transmise à travers l'échantillon d'eau, en utilisant une gamme étalon.

La turbidité constitue ainsi un indicateur important de la qualité de l'eau, car elle permet de détecter la présence de particules et de contaminants susceptibles d'affecter les caractéristiques physico-chimiques et biologiques de l'eau.

Tableau 5. Les paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain et les appareils utilisés.

Paramètres	Appareille utilisé	Unité
Température	Multi-paramètre	C°
pH	pH-mètre	-
Conductivité Eléctrique	Conductimètre	µS/cm
Turbidité	Turbidimètre	NUT

II.3.2. Paramètres mesurés ex situ (Au Laboratoire)

Les échantillons d'eau prélevés sur le terrain ont été transportés au laboratoire dans des flacons propres et stériles afin d'éviter toute contamination. Les analyses ont été réalisées dans les plus brefs délais afin de préserver les caractéristiques physico-chimiques des échantillons. Les flacons ont été remplis en laissant un petit espace d'air entre la surface de l'eau et le bouchon, ce qui permet d'assurer une bonne homogénéisation de l'échantillon avant l'analyse. Parmi les paramètres analysés au laboratoire figure :

L'azote ammoniacal (NH_4^+) : La présence de ce composé dans l'eau peut indiquer une dégradation incomplète de la matière organique ou une pollution d'origine domestique ou agricole. La détermination de l'azote ammoniacal a été réalisée par méthode colorimétrique,

basée sur la formation d'un composé coloré dont l'intensité est proportionnelle à la concentration du paramètre étudié. La lecture des absorbances a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre, permettant la quantification précise des faibles concentrations d'ammonium dans les échantillons d'eau.

Calcium (Ca^{2+}) : Le calcium (Ca^{2+}) est l'un des principaux ions présents dans les eaux naturelles. Sa présence est généralement liée à la dissolution des roches calcaires et dolomitiques. Le calcium joue un rôle important dans la minéralisation de l'eau et contribue à sa dureté. La détermination du calcium a été réalisée par titrage complexométrique à l'EDTA, en présence d'un indicateur coloré spécifique permettant de détecter le point d'équivalence de la réaction.

Magnésium (Mg^{2+}) : Le magnésium (Mg^{2+}) est également un élément majeur des eaux naturelles. Il provient principalement de la dissolution des minéraux contenant du magnésium, notamment les dolomites et certains silicates. La concentration en magnésium est généralement déterminée par méthode complexométrique à l'EDTA, après détermination du calcium, ce qui permet de calculer la teneur en magnésium dans l'échantillon d'eau.

Titre hydrotimétrique (TH) : Le titre hydrotimétrique (TH), appelé également dureté totale de l'eau, correspond à la concentration totale des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) présents dans l'eau. La détermination du TH est réalisée par titrage complexométrique à l'EDTA en présence d'un indicateur coloré. Cette méthode permet d'évaluer la dureté de l'eau, généralement exprimée en degrés français ($^{\circ}\text{F}$) ou en mg/L de CaCO_3 . Le TH constitue un paramètre important pour l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux et permet de classer les eaux selon leur degré de dureté (eaux douces, moyennement dures ou dures).

Les nitrates (NO_3^-) : représentent la forme la plus oxydée de l'azote présent dans les eaux naturelles. Leur présence peut être liée à la dégradation de la matière organique, à l'utilisation des engrais agricoles ou aux rejets domestiques.

La détermination des nitrates est réalisée par méthode spectrophotométrique, basée sur la formation d'un composé coloré dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en nitrates dans l'échantillon. La lecture de l'absorbance est effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre.

Les nitrites (NO_2^-) constituent une forme intermédiaire dans le cycle de l'azote. Leur présence dans l'eau peut indiquer une pollution récente d'origine organique ou une

transformation

incomplète de l'azote ammoniacal. La détermination des nitrites est réalisée par méthode colorimétrique, basée sur une réaction chimique produisant un composé coloré. L'intensité de la coloration est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre, permettant de déterminer la concentration des nitrites dans l'échantillon.

Les phosphates (PO_4^{3-}) : sont des éléments nutritifs essentiels pour les organismes aquatiques. Cependant, des concentrations élevées peuvent entraîner des phénomènes d'eutrophisation des milieux aquatiques. La détermination des phosphates est réalisée par méthode spectrophotométrique, basée sur la formation d'un complexe coloré dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en phosphates dans l'eau.

II.3.3. Méthodes et normes utilisées

II.3.3.1. Méthodes

➤ Détermination du pH :

Le pH (potentiel hydrogène) mesure l'activité des ions hydrogène (H^+) dans une solution aqueuse. Il permet de déterminer le caractère acide, neutre ou basique de l'eau.

- Une solution de $\text{pH} = 7$ est neutre
- Une solution de $\text{pH} < 7$ est acide
- Une solution de $\text{pH} > 7$ est basique

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre de laboratoire.



Figure 05. Mesure du pH

Principe

- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée.
- Plonger l'électrode dans un bécher contenant l'échantillon d'eau.
- Attendre la stabilisation de la valeur.
- Lire la valeur du pH directement sur l'écran de l'appareil.

➤ Détermination de la conductivité électrique

La conductivité électrique permet d'estimer la quantité totale de sels minéraux dissous dans l'eau. Elle est exprimée en micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre.

Principe

- Rincer la sonde avec de l'eau distillée.
- Introduire la sonde dans un bécher contenant l'échantillon.
- Attendre la stabilisation de la valeur.
- Lire la conductivité sur l'écran.



Figure 06. Mesure de la conductivité électrique

➤ Détermination de la turbidité

La turbidité représente la diminution de la transparence de l'eau causée par la présence de matières en suspension. La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre et exprimée en NTU.

Principe

- Remplir une cuve avec l'échantillon d'eau.
- Placer la cuve dans le turbidimètre.
- L'appareil mesure la lumière diffusée par les particules présentes dans l'eau.
- Lire la valeur de la turbidité sur l'écran.



Figure 07. Mesure de la turbidité

➤ Détermination TDS

Les solides dissous totaux (TDS) représentent la quantité totale des sels minéraux et des substances dissoutes dans l'eau, tels que les carbonates, chlorures, sulfates, calcium, magnésium et sodium. Ce paramètre permet d'évaluer le degré de minéralisation de l'eau.

La mesure du TDS a été réalisée à l'aide d'un TDS-mètre ou à partir du multi-paramètre de laboratoire.

Principe

- Rincer l'électrode de l'appareil avec de l'eau distillée.
- Introduire la sonde dans un bécher contenant l'échantillon d'eau.
- Attendre la stabilisation de la valeur.
- Lire directement la valeur du TDS sur l'écran de l'appareil.

➤ Détermination Salinité

La salinité correspond à la concentration totale des sels dissous présents dans l'eau. Elle est un paramètre important pour caractériser les eaux naturelles, notamment les eaux marines et saumâtres. La salinité est mesurée à l'aide d'un salinomètre ou d'un multi-paramètre.

Principe

- Rincer la sonde de l'appareil avec de l'eau distillée.
- Plonger la sonde dans l'échantillon d'eau contenu dans un bécher.
- Attendre la stabilisation de la valeur affichée.
- Lire la valeur de la salinité directement sur l'écran de l'appareil

➤ Détermination de l'azote ammoniacal (NH_4^+)

L'azote ammoniacal indique généralement une pollution organique récente.

La détermination est réalisée par méthode colorimétrique au spectrophotomètre

Principe

- Ajouter les réactifs nécessaires à l'échantillon.
- Une coloration apparaît proportionnelle à la concentration d'ammonium.
- Mesurer l'absorbance avec un spectrophotomètre.

- Déterminer la concentration à partir d'une courbe d'étalonnage.

➤ **Détermination des nitrites**

La concentration des nitrites a été mesurée avec une photo bioréacteur à une longueur d'onde de 507 nm.

Solutions utilisées : Réactif coloré nitrites

Principe :

- Nous avons prélevé 40 ml d'eau d'échantillon et l'avons placé dans une cuve à échantillon carrée de 50 ml
- Ensuite nous avons ajouté le contenu d'un sachet de poudre de Réactif coloré nitrites. et mélangé bien jusqu'à apparition d'une couleur rose en cas de présence des nitrites
- Nous appuyons sur le bouton de lecture, l'écran NO₂-mg/l apparaîtra.

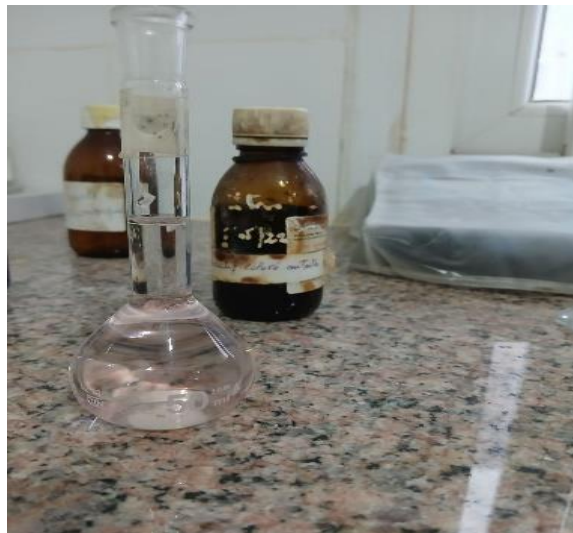


Figure 08. Dosage de nitrite

➤ **Détermination du phosphore (PO₄³⁻)**

Le phosphore, présent principalement sous forme de phosphates (PO₄³⁻) dans les eaux naturelles, est un élément nutritif essentiel pour les organismes aquatiques. Cependant, des concentrations élevées peuvent provoquer des phénomènes d'eutrophisation, entraînant une prolifération excessive d'algues et une dégradation de la qualité de l'eau.

Solutions utilisées :

- Acide d'ascorbique
- Molybdate

Principe

- Prélever un volume déterminé de l'échantillon d'eau dans un bécher ou une cuve.
- Ajouter les réactifs spécifiques (réactif molybdate) nécessaires à la réaction.
- Une coloration bleue apparaît proportionnelle à la concentration en phosphates.
- Placer la cuve dans le spectrophotomètre.
- Lire l'absorbance et déterminer la concentration en phosphates à l'aide d'une courbe d'étalonnage.



Figure 09. Dosage du phosphore

➤ **Détermination du titre hydrotimétrique (TH) ou dureté totale**

La dureté totale de l'eau, appelée également titre hydrotimétrique (TH), correspond à la concentration totale des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) présents dans l'eau. Ces ions proviennent principalement de la dissolution des roches calcaires et dolomitiques. La dureté est un paramètre important pour l'évaluation de la minéralisation de l'eau.

La détermination du TH est réalisée par méthode titrimétrique à l'EDTA.

Solutions utilisées

- Solution EDTA (solution titrante)
- Solution tampon (complexon)
- Indicateur Ériochrome noir T

Principe

- Prélever 50 ml de l'échantillon d'eau dans un erlenmeyer.
- Ajouter 2 ml de solution tampon (complexon).
- Ajouter une goutte d'indicateur Ériochrome noir T ; la solution prend une coloration rouge.
- Effectuer le titrage avec la solution EDTA jusqu'au changement de couleur rouge → bleu, indiquant le point d'équivalence.
- Noter le volume d'EDTA utilisé.

Calcul :

$$\text{TH (mg/L)} = \text{VEDTA} \times 10$$

où :

- **TH** : dureté totale de l'eau (mg/L)
- **VEDTA** : volume de la solution EDTA utilisé pour le titrage (ml)

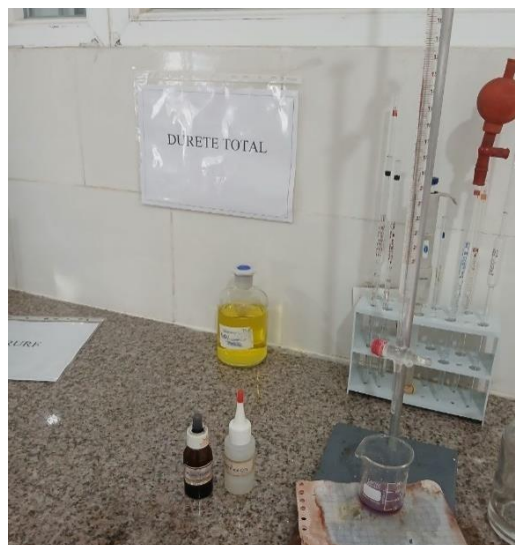


Figure 10. Dosage de Dureté Total

➤ **Le calcium Ca²⁺ :**

La concentration de calcium a été mesurée par la méthode de titrage de couleur. Solutions utilisées :

- Solution EDTA, sa concentration (0,01 N).
- Solution de NaOH, sa concentration est (1N).
- Réactif Meroxide

Principe :

- Nous prélevons 100 ml d'eau d'échantillon et les mettons dans d'ermenmeyer d'une capacité de 300 ml
- Ajouter 2 ml de NaOH à cet échantillon.
- Nous rajoutons une petite quantité de réactif MEROXIDE qui clore l'échantillon en rose.
- Titré avec une solution EDTA, l'étalonnage s'arrête à un point où la couleur passe du rose au violet
- Nous enregistrons le volume d'EDTA descendant de la burette.
- nous calculons la concentration de calcium en appliquant la relation suivante :

$$[Ca^{+2}] \text{ mg/l} = V_{EDTA} * 10$$

Où : $[Ca^{+2}]$: concentration de calcium en mg/l.

V_{EDTA} : le volume de la solution EDTA utilisée pour l'échantillon en ml.



Figure 11. Dosage du Calcium

➤ **Magnésium (Mg^{2+}) :**

Nous calculons la concentration de magnésium à partir de la différence entre la valeur de la dureté et la valeur de concentration de calcium en appliquant la relation suivante :

$$[Mg^{+2}] \text{ mg/l} = [TH] - [Ca^{+2}]$$

$[Mg^{+2}]$: concentration de magnésium en mg/L

$[Ca^{+2}]$: concentration de calcium en mg/L

$[TH]$: la dureté en mg/L.

II.3.3.2. Normes utilisées

Tableau 6. Normes algériennes des paramètres physico-chimiques des eaux de source.

Groupe de paramètre	Paramètre	Unité	Valeur Limite
Paramètres physique	pH	-	6.5 – 8.5
	Température	C°	25
	Conductivité électrique	µS/cm	≤ 2800
	Turbidité	NUT	≤ 5
	Salinité	g/l	0.5
	TDS	mg/L	≤ 1000
Paramètres chimique	NH ⁴⁺	mg/L	≤ 0.5
	NO ²⁻		≤ 0.1
	PO ₄ ³⁻		≤ 0.5
	Ca ²⁺		≤ 200
	Mg ²⁺		≤ 150
	TH		≤ 500 CaCO ₃

II.4. Analyse bactériologique

II.4.1. Méthode de filtration sur membrane

Principe Cette méthode consiste à filtrer l'échantillon de l'eau sur une membrane filtre de 0,45µm qui retient les microorganismes. Cette membrane est incubée à 44 pendant 24 heures sur milieu Tergitol 7 pour la recherche des coliformes fécaux et incubée 37 °C pendant 48 h pour la recherche des coliformes totaux. Pour la recherche des streptocoques, la membrane filtre est incubée sur milieu de culture Slanetz à 37°C pendant 24h.



Figure 12. Filtration sur membrane (photo originale).

➤ **Mode opératoire**

- Allumer le bec bunsen et stériliser l'équipement de la rampe de filtration.
- A l'aide d'une pince stérile déposer une membrane filtre de porosité $0.45\mu\text{m}$ sur la membrane porteuse.
- Remplir l'entonnoir avec l'eau à analyser puis remettre le couvercle.
- Allumer la rampe de filtration et faire vider jusqu'à la filtration totale d'échantillon.
- Déposer la membrane filtre à l'aide d'une pince stérile sur les milieux de culture.
- Étiqueter les boîtes pétries avec la date, nome de source et l'heur de l'ensemencement.
- Incuber les boîtes pétries couvercle vers bas.
 - ✓ Pour les coliformes fécaux : à 44°C pendant 24h.
 - ✓ Pour les coliformes totaux : à 37°C pendant 48h.
 - ✓ Pour les streptocoques fécaux : à 37° pendant 24h.



Figure 13. Incubateurs

➤ **La recherche des coliformes totaux (CT)**

- Verser 100 ml d'échantillon d'eau à analyser dans l'entonnoir et filtrer en aspirant avec une trompe à vide.
- Ouvrir le système de filtration et retirer la membrane avec une pince stérile puis la déposer dans la boîte de pétri qui contient la gélose TTC Tergitol.
- Placer les boîtes à l'étuve à 37°C pendant 24heures (incuber les boîtes couvercle vers le bas pour que la condensation s'accumule dans le couvercle).
- Les coliformes totaux sont considérées comme caractéristiques les colonies qui présentent une coloration jaune orangé, lisse, peu bombées.

➤ **La recherche des coliformes fécaux (CF)**

Les mêmes étapes sont suivies que celle des CT.

- Placer la membrane sur la boîte de pétri contenant la gélose TTC Tergitol.
- Mettre la boîte dans une étuve de 44°C pendant 24heures.
- Après incubation, les coliformes fécaux sont apparus sous forme de petites colonies jaune orangé, lisses et peu bombées.

➤ **La recherche des streptocoques fécaux**

La recherche et le dénombrement des streptocoques fécaux est tout comme la recherche des coliformes, nécessitent la disponibilité d'une rampe de filtration.

➤ **Mode opératoire**

- Préparer le système de filtration avec une zone stérile et placer la membrane stérile sur le système de filtration.
- Mettre en place la trompe à vide et agiter le flacon vigoureusement.
- Verser 100 ml d'échantillon d'eau et filtrer en aspirant avec une trompe à vide.
- Retirer la membrane avec une pince stérile et la déposer dans une boîte de pétrie contenant la gélose de SLANETZ. C'est le milieu de culture spécifique pour les streptocoques fécaux.
- Après 48 heures d'incubation à 37°C, les colonies apparaissent rouge Bordeu.

➤ **Test de confirmation**

→ Les coliformes fécaux (*Escherichia coli*) Après l'incubation, la présence des colonies jaune ou jaune orange indique la présence des coliformes fécaux. Cinq colonies seront repiquées à l'aide d'une pipette stérile puis ensemencées dans un bouillon tryptophane et incubé dans une étuve à 44 °C pendant 24h.



Figure 14. Test de confirmation (photo originale).

Après l'incubation, rajouter 2 à 3 gouttes de réactif Kovacs. L'apparition d'un anneau rouge indique la présence d'E. Coli.

➤ **Pour les streptocoques fécaux :**

Après l'incubation, la présence des colonies rose ou rouge brique indique la présence des streptocoques fécaux. Les colonies seront repiquées dans des milieux de confirmation.

II.5. Évaluation de la qualité et calcul de l'IPM

II.5.1 Normes de référence de la qualité microbiologique de l'eau

L'évaluation de la qualité microbiologique de l'eau repose sur la comparaison des résultats analytiques avec des normes internationales et nationales. Ces normes permettent de déterminer si l'eau est propre à la consommation humaine ou si elle présente un risque sanitaire.

➤ **Normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)**

Selon les directives de l'OMS pour la qualité de l'eau potable, l'eau destinée à la consommation humaine ne doit contenir aucun microorganisme pathogène susceptible de provoquer des maladies.

Les indicateurs microbiologiques utilisés sont principalement :

- Escherichia coli (E. coli)
- Coliformes totaux
- Streptocoques fécaux (Entérocoques)
- Clostridium sulfito-réducteurs

Tableau 7. Les recommandations de l'OMS sont

Paramètre microbiologique	Norme OMS
Escherichia coli	0 UFC / 100 mL
Coliformes totaux	0 UFC / 100 mL
Entérocoques intestinaux	0 UFC / 100 mL

La présence de ces bactéries indique généralement une contamination fécale récente ou ancienne de l'eau.

➤ **Normes de référence de la qualité microbiologique de l'eau en Algérie**

L'évaluation de la qualité microbiologique de l'eau repose sur la comparaison des résultats analytiques avec les normes algériennes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, définies par le décret exécutif n°11-219 du 22 juin 2011 fixant les normes de potabilité de l'eau.

Ces normes visent à protéger la santé publique en garantissant l'absence de microorganismes indicateurs de contamination fécale.

Les principaux indicateurs microbiologiques utilisés pour contrôler la qualité de l'eau sont :

- Escherichia coli (E. coli)
- Coliformes totaux
- Streptocoques fécaux (Entérocoques)
- Clostridium sulfito-réducteurs

Tableau 8. Les limites admissibles selon les normes algériennes

Paramètre microbiologique	Valeur maximale admissible
Escherichia coli	0 UFC / 100 mL
Coliformes totaux	0 UFC / 100 mL
Entérocoques intestinaux	0 UFC / 100 mL
Clostridium sulfito-réducteurs	0 UFC / 20 mL

La présence de ces microorganismes dans l'eau indique une contamination d'origine fécale et rend l'eau non conforme aux normes de potabilité.

II.5.2 Méthode de calcul de l'Indice de Pollution Microbienne (IQM)

L'Indice de Pollution Microbienne (IQM) est un indicateur utilisé pour évaluer le degré de contamination bactérienne des eaux. Cet indice permet de synthétiser plusieurs paramètres microbiologiques en une seule valeur facilitant l'interprétation de la qualité de l'eau.

Le calcul de l'IPM se base généralement sur les concentrations des bactéries indicatrices de contamination fécale, notamment :

- Coliformes totaux (CT)
- Coliformes fécaux (CF)
- Streptocoques fécaux (SF)

La formule utilisée est :

$$IPM = \frac{\log(CT) + \log(CF) + \log(SF)}{3}$$

où :

- **CT** : nombre de coliformes totaux (UFC/100 mL)
- **CF** : nombre de coliformes fécaux (UFC/100 mL)
- **SF** : nombre de streptocoques fécaux (UFC/100 mL)

L'utilisation du logarithme décimal permet de réduire l'influence des fortes variations des concentrations bactériennes et d'obtenir un indice représentatif du niveau global de contamination microbiologique.

II.5.3. Classification de la qualité des eaux selon l'IPM

Tableau 9 : La valeur de l'IPM permet de classer la qualité microbiologique de l'eau en plusieurs catégories de pollution :

Tableau 9. Classification la qualité microbiologique de l'eau

Valeur de l'IPM	Qualité de l'eau	Niveau de pollution
IPM < 1	Eau de très bonne qualité	Pollution très faible
1 ≤ IPM < 2	Eau de bonne qualité	Pollution faible
1 ≤ IPM < 2	Eau de bonne qualité	Pollution faible
2 ≤ IPM < 3	Eau moyennement polluée	Pollution modérée
3 ≤ IPM < 4	Eau fortement polluée	Pollution élevée
IPM ≥ 4	Eau très fortement polluée	Pollution très élevée

Cette classification permet d'évaluer rapidement le niveau de contamination microbiologique de l'eau, d'identifier les zones les plus polluées et d'orienter les mesures de gestion et de protection des ressources hydriques.

Chapitre III : Résultats et Discussion

Chapitre III :Résultats et Discussion

III.1. Résultats des analyses physico-chimiques

III.1.1. Présentation des résultats

Tableau 10 :Présentation des résultats des analyses physico-chimique des deux sources (Dran et Boutheldja) en 2023-2024

	Stations	T	pH	EC	TDS	Salt	Turb	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	TH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Janvier	Dran	13.5	8.50	3731	1911	1.96	0.81	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	14.1	6.51	153	72.6	0.07	0.86	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Février	Dran	13.9	8.56	3731	1911	1.96	0.38	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	14	6.61	153.3	72.4	0.07	0.68	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Mars	Dran	13.8	8.53	3731	1911	1.96	0.48	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	17.2	6.54	1529	72.4	0.07	0.81	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Avril	Dran	17.3	8.59	3730	1910	1.96	0.48	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	20.8	6.58	153	72.3	0.07	0.68	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Mai	Dran	21	8.64	3731	1911	1.96	0.51	0.01	0.01	0.01	900	260	60
	Bouth	24.3	6.51	153.2	72.6	0.07	0.61	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Juin	Dran	24.5	8.61	3730	1910	1.96	0.63	0.01	0.01	0.02	900	260	60
	Bouth	25	6.57	153.2	72.4	0.07	0.44	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Juillet	Dran	25	8.60	3730	1911	1.96	0.60	0.01	0.00	0.02	900	260	60
	Bouth	25.1	6.51	153	72.1	0.07	0.67	0.01	0.00	0.02	30	8	2.4
Aout	Dran	15.2	8.64	3730	1910	1.96	0.52	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.1	6.58	153.3	72.3	0.07	0.49	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Sept	Dran	15.1	8.59	3730	1910	1.96	0.59	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.2	6.48	153.4	72.6	0.07	0.38	0.01	0.00	0.01	30	8	4
Octob	Dran	15.3	8.55	3730	1910	1.96	0.59	0.01	0.00	0.02	900	260	60
	Bouth	15.4	6.50	153.4	72.6	0.07	0.54	0.01	0.00	0.01	30	8	4
Nouv	Dran	15.6	8.58	3730	1910	1.96	0.55	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.7	6.51	153.1	72.3	0.07	0.51	0.01	0.00	0.01	30	8	4
Décem	Dran	15.3	8.61	3731	1911	1.96	0.51	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.3	6.50	152.8	71.8	0.07	0.48	0.01	0.00	0.01	30	8	4

Tableau 11 :Présentation des résultats des analyses physico-chimique des deux sources (Dran et Boutheldja) en 2024-2025

	Stations	T	pH	EC	TDS	Salt	Turb	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	TH	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Janvier	Dran	14.8	8.53	3730	1910	1.96	0.51	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	14.9	6.50	153	72.4	0.07	0.78	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Février	Dran	14.8	8.51	3730	1910	1.96	0.54	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	14.8	6.54	153	72.1	0.07	0.64	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Mars	Dran	14.8	8.51	3730	1911	1.96	0.53	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.1	6.48	153.1	72.2	0.07	0.44	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Avril	Dran	15	8.53	3730	1911	1.96	0.53	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15	6.50	153.2	72.3	0.07	0.38	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4

Mai	Dran	15	8.50	3731	1911	1.96	0.48	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.1	6.58	153	72	0.07	0.38	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Juin	Dran	15	8.56	3730	1910	1.96	0.44	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.1	6.66	153	72.1	0.07	0.38	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Juillet	Dran	15.6	8.51	3731	1911	1.96	0.41	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.6	6.51	153.1	72.3	0.07	0.40	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Aout	Dran	16	8.58	3730	1910	1.96	0.38	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	16.8	6.50	153.3	72.4	0.07	0.41	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Sept	Dran	16.8	8.59	3731	1911	1.96	0.40	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.8	6.51	153.3	72.1	0.07	0.38	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Octob	Dran	15.8	8.59	3730	1910	1.96	0.41	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15.8	6.50	153	72	0.07	0.41	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Nouv	Dran	15.8	8.59	3731	1911	1.96	0.38	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15	6.51	153.3	72.1	0.07	0.36	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4
Décem	Dran	15	8.59	3730	1910	1.96	0.44	0.01	0.00	0.01	900	260	60
	Bouth	15	6.51	153.4	72.3	0.07	0.71	0.01	0.00	0.01	30	8	2.4

III.1. 2. Analyse physico-chimique

➤ Température

L'analyse conjointe des variations mensuelles de la température au niveau des stations de Deran et de Bouthéldja met en évidence une dynamique saisonnière contrastée entre les campagnes 2023/2024 et 2024/2025, ainsi qu'une variabilité spatiale notable entre les deux sites. En 2023/2024, les deux stations présentent une évolution thermique typique, caractérisée par des valeurs relativement faibles et stables en hiver (13–14 °C), suivies d'une augmentation progressive au printemps pour atteindre un maximum estival en juin-juillet (24–25 °C), avant une diminution en fin d'été et une stabilisation automnale. Toutefois, une chute brutale est observée au mois d'août dans les deux stations (15 °C), suggérant l'influence de facteurs externes tels que des apports d'eaux plus fraîches ou des conditions climatiques particulières. En revanche, la campagne 2024/2025 se distingue par une homogénéité thermique marquée, avec des températures globalement stables autour de 15–16 °C durant la majorité de l'année, traduisant une atténuation du cycle saisonnier. Néanmoins, une anomalie majeure est enregistrée à Deran au mois d'avril (3,15 °C), valeur largement inférieure aux normales, pouvant indiquer soit un événement climatique extrême, soit une erreur de mesure. Par ailleurs, la station de Bouthéldja apparaît globalement plus stable que celle de Deran, ce qui met en évidence l'influence des conditions locales sur la régulation thermique. Ainsi, ces résultats soulignent une forte variabilité interannuelle et spatiale, impliquant l'intervention conjointe de facteurs climatiques et environnementaux dans la structuration du régime thermique des sites étudiés.

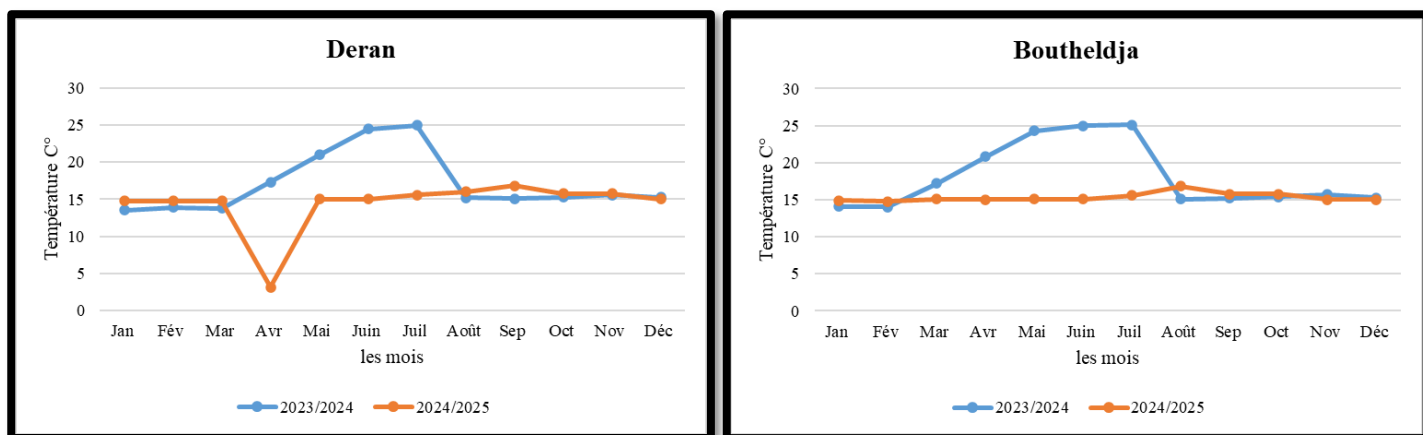


Figure 15. Variation mensuelle de la température (°C) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Potentiel hydrogène pH

Les variations du pH enregistrées au niveau des deux sites (Dran et Boutheldja) montrent des comportements saisonniers relativement stables avec des différences marquées entre les deux stations. À Dran, le pH reste globalement alcalin durant les deux périodes (2023–2024 et 2024–2025), avec des valeurs comprises entre 8,5 et 8,64, traduisant une faible variabilité temporelle et une bonne stabilité chimique de l’eau, malgré de légères hausses au printemps et en été, probablement liées à l’intensification de l’activité photosynthétique. En revanche, à Boutheldja, le pH est légèrement acide à neutre (6,48–6,66), avec une variabilité plus prononcée, notamment un pic en juin 2024–2025 (6,66), ce qui peut être associé à des apports externes ou à des processus biologiques et hydrologiques locaux. Comparativement, les valeurs de 2024–2025 montrent une tendance à la stabilisation dans les deux sites, particulièrement en automne et en hiver. Globalement, ces résultats mettent en évidence une différenciation nette entre un milieu alcalin (Dran) et un milieu plus légèrement acide (Boutheldja), reflétant l’influence des conditions géochimiques et environnementales propres à chaque site.

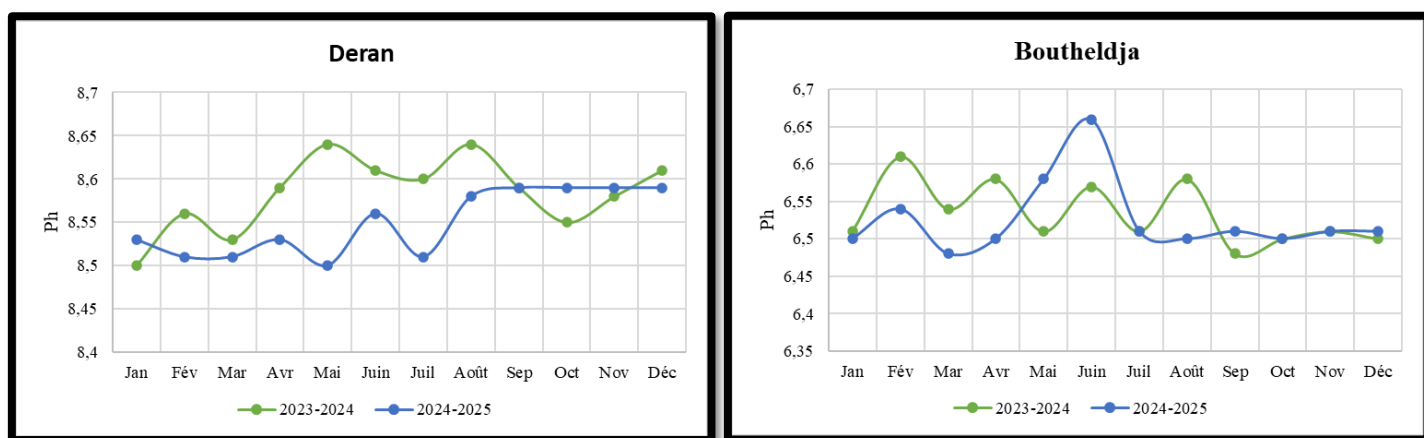


Figure 16. Variation mensuelle du pH des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Conductivité électrique (EC)

Les variations de la conductivité électrique au niveau des sites de Deran et Boutheldja révèlent une forte stabilité temporelle durant les deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec toutefois des différences nettes entre les deux stations. À Deran, les valeurs sont très élevées et quasi constantes (3730–3731 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indiquant une forte minéralisation de l'eau et une faible influence saisonnière, malgré de légères fluctuations ponctuelles sans tendance marquée. En revanche, à Boutheldja, la conductivité est nettement plus faible (152,8–153,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et présente de faibles variations saisonnières, avec une légère hausse en fin d'année 2024–2025 (décembre), ce qui pourrait être lié à des apports dissous ou à des conditions hydrologiques spécifiques. Comparativement, les deux périodes montrent une grande homogénéité des valeurs, traduisant une stabilité globale des apports ioniques dans les deux milieux. Ainsi, la différence importante entre les deux sites reflète des contextes géologiques et hydrogéochimiques distincts, avec un milieu fortement minéralisé à Deran et un milieu faiblement minéralisé à Boutheldja.

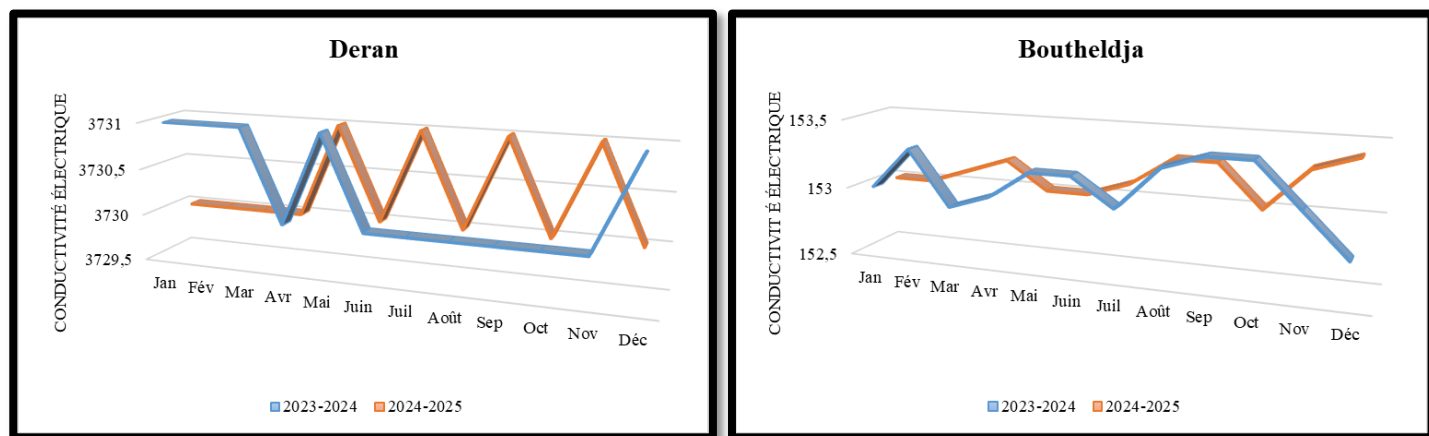


Figure 17. Variation mensuelle de la conductivité électrique des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Solides dissous totaux (TDS)

Les variations des solides dissous totaux (TDS) au niveau des sites de Deran et Boutheldja mettent en évidence une stabilité temporelle globale au cours des deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), tout en révélant des contrastes marqués entre les deux stations. À Deran, les valeurs de TDS sont très élevées et pratiquement constantes (1910–1911 mg/L), traduisant une forte minéralisation de l'eau et une influence saisonnière très limitée. Les faibles fluctuations observées au cours de l'année ne montrent pas de tendance significative et peuvent être attribuées à de légères variations hydrologiques ou à des phénomènes d'évapoconcentration, sans impact notable sur l'équilibre global du milieu.

À l'inverse, au niveau de Boutheldja, les valeurs de TDS sont nettement plus faibles (71,8–72,6 mg/L), indiquant une eau faiblement minéralisée. Une légère variabilité saisonnière est toutefois perceptible, avec des diminutions modérées durant certaines périodes et une légère augmentation en fin d'année 2024–2025 (notamment en décembre). Ces variations peuvent être liées aux apports hydriques, aux processus de dilution pendant les périodes de recharge et à une concentration relative des sels dissous en conditions plus sèches.

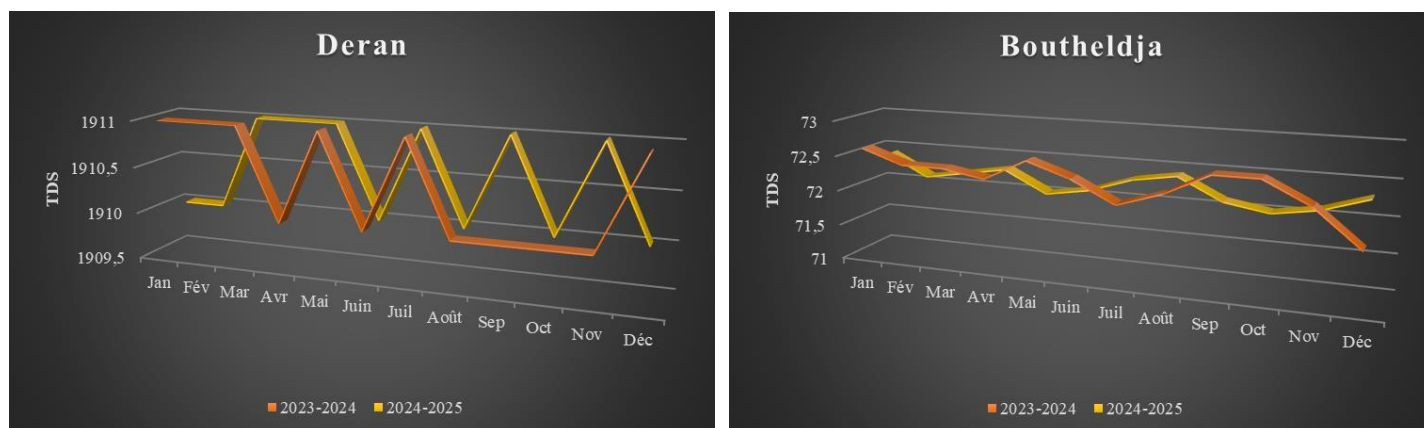


Figure 18. Variation mensuelle des solides dissous totaux (TDS) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Salinité

Les variations de la salinité au niveau des sites de Deran et Boutheldja montrent une stabilité temporelle remarquable durant les deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec des différences nettes entre les deux stations. À Deran, les valeurs de salinité sont relativement élevées et parfaitement constantes tout au long de l'année (1,96 g/L), ce qui traduit une forte minéralisation du milieu et une absence d'influence saisonnière significative. Cette constance suggère un système hydrogéochimique stable, probablement dominé par des apports souterrains riches en sels dissous et peu affecté par les variations climatiques ou hydrologiques.

En revanche, au niveau de Boutheldja, la salinité est nettement plus faible (0,07 g/L) et demeure également constante sur l'ensemble des mois et pour les deux campagnes étudiées. Cette faible minéralisation reflète un milieu dilué, vraisemblablement influencé par des apports d'eau douce et une faible concentration en ions dissous. L'absence totale de variation saisonnière indique une grande stabilité des conditions environnementales et des sources d'alimentation en eau.

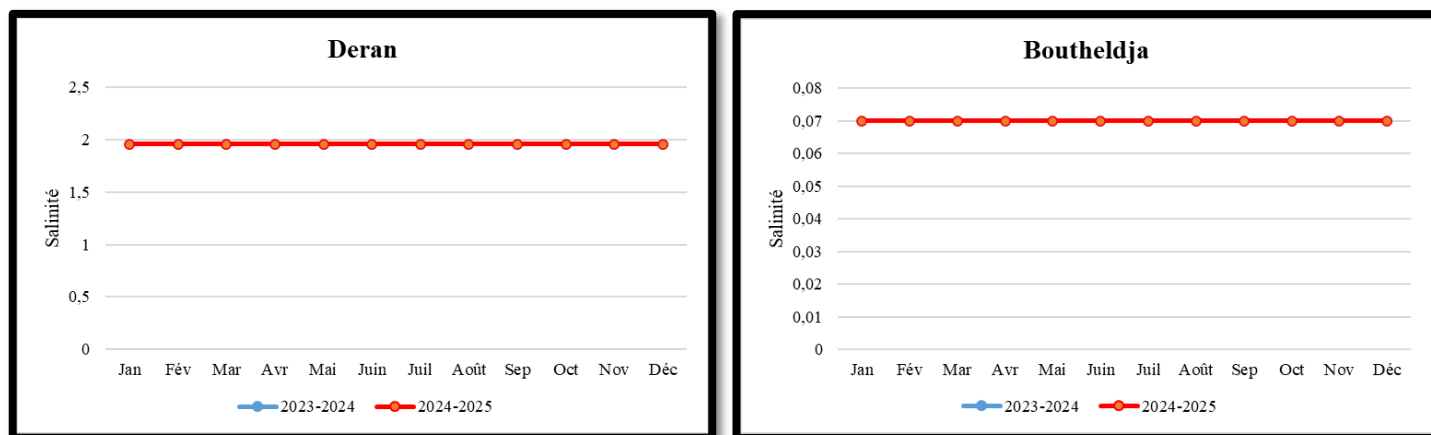


Figure 19. Variation mensuelle de la salinité des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Turbidité

Les variations de la turbidité au niveau des sites de Deran et Boutheldja montrent une variabilité saisonnière plus marquée que les autres paramètres étudiés, avec des différences notables entre les deux périodes (2023–2024 et 2024–2025) et entre les deux stations.

À Deran, la turbidité présente des fluctuations modérées. Durant la période 2023–2024, une valeur élevée est observée en janvier (0,81 NTU), suivie d’une diminution en février, puis d’une augmentation progressive atteignant un maximum relatif en juin (0,63 NTU). Par la suite, les valeurs oscillent légèrement jusqu’à la fin de l’année. En revanche, pour la période 2024–2025, les valeurs sont globalement plus faibles et plus homogènes (0,38–0,54 NTU), avec une tendance générale à la diminution du début de l’année jusqu’à l’été, suivie de faibles variations. Cette différence interannuelle pourrait être liée à des conditions hydrologiques distinctes, notamment une réduction des apports en matières en suspension durant la seconde période.

Au niveau de Boutheldja, la turbidité montre une variabilité plus importante. Pour la période 2023–2024, les valeurs sont élevées en début d’année (0,86 NTU en janvier), puis diminuent progressivement jusqu’en juin (0,44 NTU), avant de présenter des fluctuations au cours de l’été et de l’automne. Durant la période 2024–2025, une diminution marquée est observée du début de l’année jusqu’au printemps (0,78 à 0,38 NTU), suivie d’une relative stabilité durant l’été et l’automne, puis d’une augmentation notable en décembre (0,71 NTU). Cette hausse en fin d’année pourrait être associée à des épisodes pluvieux entraînant un apport accru de particules en suspension.



Figure20. Variation mensuelle de la turbidité des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ **Ammonium(NH_4^+)**

Les variations de ce paramètre au niveau des sites de Deran et Boutheldja montrent une stabilité temporelle absolue durant les deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025). En effet, les valeurs enregistrées restent constantes à 0,01 pour l'ensemble des mois et pour les deux stations, sans aucune fluctuation saisonnière ni interannuelle.

À Deran comme à Boutheldja, cette constance parfaite traduit une absence de variabilité du paramètre mesuré, suggérant soit une concentration extrêmement faible et stable dans le milieu, soit une limite de détection analytique atteinte, en dessous de laquelle les variations ne peuvent être mises en évidence. Cette homogénéité indique également que les conditions hydrologiques et environnementales n'exercent pas d'influence significative sur ce paramètre au cours de l'année.

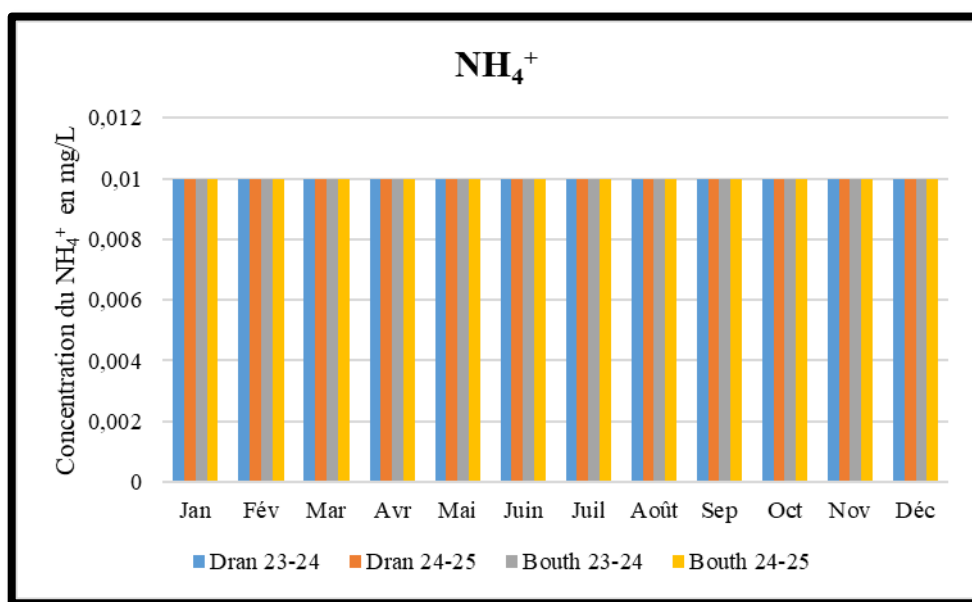


Figure 21. Variation mensuelle des concentrations en ammonium (NH_4^+) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Nitrites (NO_2^-)

Les variations des nitrites (NO_2^-) au niveau des sites de Deran et Boutheldja mettent en évidence des concentrations extrêmement faibles durant les deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec une absence quasi totale de variabilité temporelle.

À Deran, les concentrations sont nulles pendant la majeure partie de l'année, à l'exception de faibles traces enregistrées en mai et juin de la période 2023–2024 (0,01 mg/L). Cette apparition ponctuelle de nitrites peut être liée à une activité biologique transitoire, notamment des processus de nitrification incomplète ou de réduction des nitrates, favorisés par des conditions environnementales spécifiques (température, matière organique, oxygénation). En revanche, aucune trace n'est détectée durant la période 2024–2025, traduisant une amélioration ou une stabilisation des conditions oxydantes du milieu.

Au niveau de Boutheldja, les concentrations en NO_2^- sont nulles tout au long de l'année pour les deux campagnes, indiquant l'absence de pollution azotée sous forme de nitrites et une transformation rapide de ces composés en nitrates, forme plus stable dans les milieux aquatiques bien oxygénés.

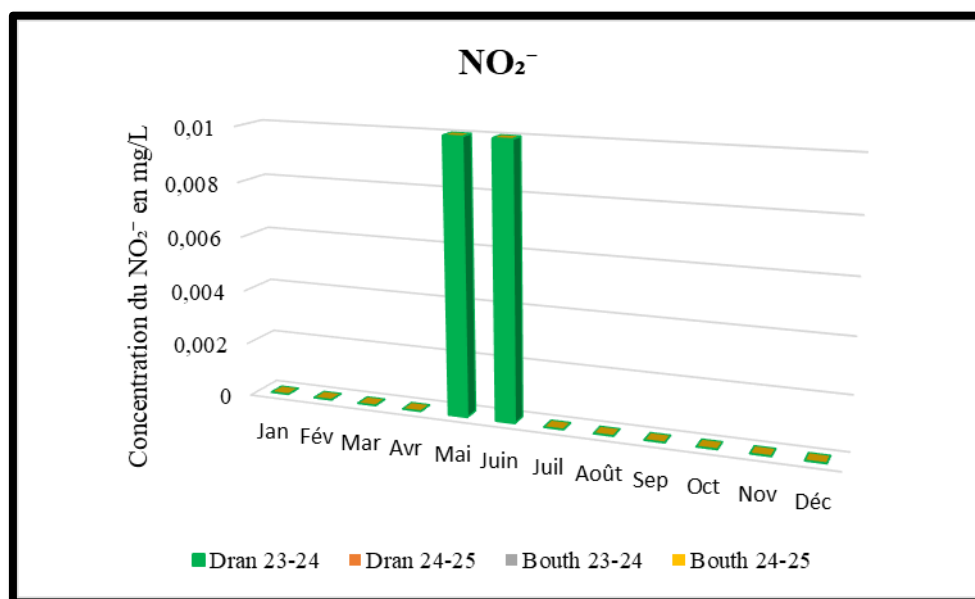


Figure 22. Variation mensuelle des concentrations en nitrites (NO_2^-) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Les ortho-phosphates (PO_4^{3-})

Les variations des ortho-phosphates (PO_4^{3-}) au niveau des sites de Deran et Boutheldja révèlent des concentrations globalement faibles et une stabilité temporelle marquée au cours des deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec de légères fluctuations ponctuelles.

À Deran, les concentrations sont majoritairement constantes autour de 0,01 mg/L durant toute l'année pour les deux campagnes. Toutefois, une légère augmentation est observée en juillet et en octobre de la période 2023–2024, où les valeurs atteignent 0,02 mg/L. Ces hausses ponctuelles peuvent être attribuées à des apports temporaires en nutriments, possiblement liés au ruissellement, à la décomposition de la matière organique ou à des activités anthropiques locales. En revanche, durant la période 2024–2025, les valeurs restent parfaitement stables (0,01 mg/L), traduisant une absence d'enrichissement significatif en phosphates.

Au niveau de Boutheldja, les concentrations en PO_4^{3-} sont également faibles et très homogènes (0,01 mg/L) tout au long de l'année pour les deux périodes, à l'exception d'une légère augmentation en juillet 2023–2024 (0,02 mg/L). Cette stabilité témoigne d'un milieu peu impacté par les apports en nutriments phosphorés et suggère une bonne qualité de l'eau vis-à-vis de ce paramètre.

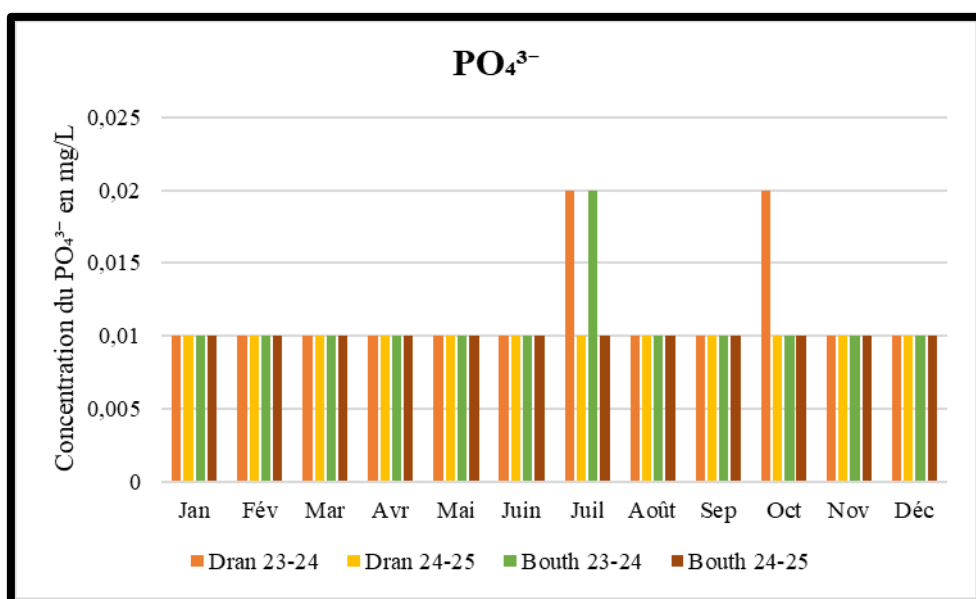


Figure 23. Variation mensuelle des concentrations en orthophosphates (PO_4^{3-}) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ La dureté totale (TH)

Les variations de la dureté totale (TH) au niveau des sites de Deran et Boutheldja mettent en évidence une stabilité temporelle absolue durant les deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec des différences très marquées entre les deux stations.

À Deran, les valeurs de la dureté totale sont très élevées et constantes tout au long de l'année (900 mg/L), traduisant une eau extrêmement dure. Cette forte minéralisation est généralement liée à une concentration élevée en ions calcium et magnésium, probablement d'origine géologique (présence de formations calcaires ou évaporitiques). L'absence totale de variation saisonnière indique un système hydrogéochimique stable, dominé par des apports souterrains et peu influencé par les conditions climatiques ou les phénomènes de dilution.

En revanche, au niveau de Boutheldja, la dureté totale est nettement plus faible et également constante (30 mg/L), caractérisant une eau douce. Cette faible minéralisation suggère un milieu dominé par des apports d'eau de surface ou de pluie, avec une faible interaction avec des formations géologiques riches en minéraux.

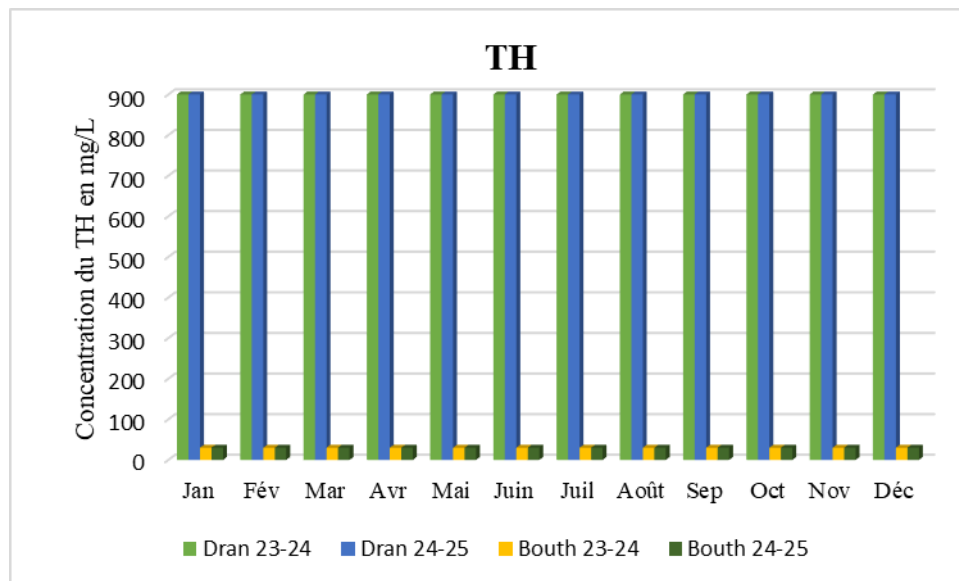


Figure 24. Variation mensuelle de la dureté totale (TH) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Le calcium (Ca^{2+})

Les variations du calcium (Ca^{2+}) au niveau des sites de Deran et Boutheldja montrent une stabilité temporelle absolue au cours des deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec des contrastes marqués entre les deux stations.

À Deran, les concentrations en calcium sont élevées et constantes tout au long de l'année (260 mg/L), traduisant une forte minéralisation de l'eau. Cette richesse en Ca^{2+} est généralement liée à la dissolution de formations géologiques carbonatées (calcaires ou dolomitiques). L'absence de variation saisonnière indique que les apports en calcium sont continus et peu influencés par les conditions climatiques, ce qui suggère une dominance des eaux souterraines dans l'alimentation du milieu.

En revanche, à Boutheldja, les concentrations en calcium sont nettement plus faibles et également constantes (8 mg/L), caractérisant un milieu faiblement minéralisé. Cette faible teneur reflète une interaction limitée avec les roches riches en calcium et suggère une influence plus importante des eaux de surface ou des précipitations.

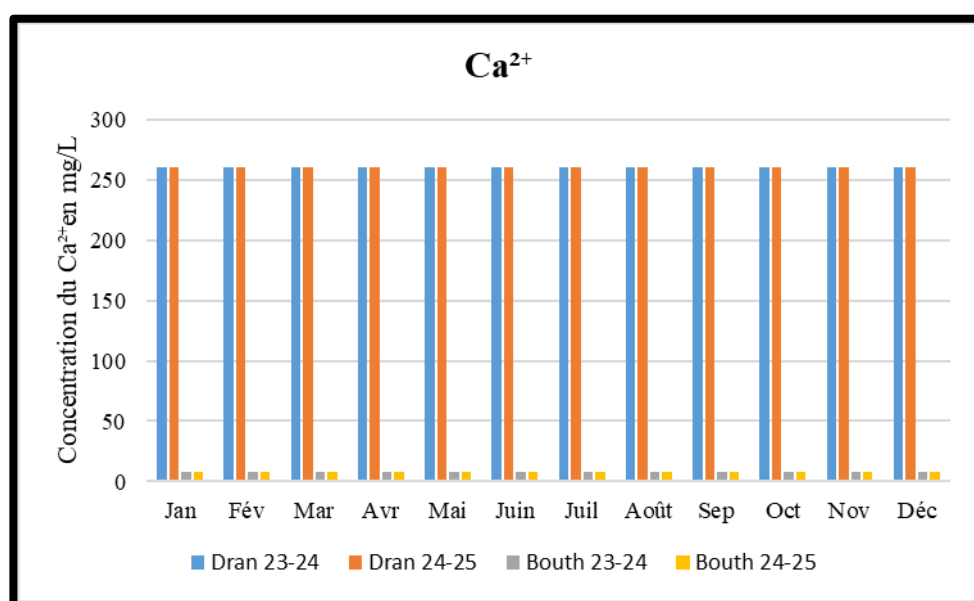


Figure 25. Variation mensuelle des concentrations en calcium (Ca^{2+}) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

➤ Le magnésium (Mg^{2+})

Les variations du magnésium (Mg^{2+}) au niveau des sites de Deran et Boutheldja montrent une stabilité globale au cours des deux périodes d'étude (2023–2024 et 2024–2025), avec toutefois une légère variabilité saisonnière observée à Boutheldja.

À Deran, les concentrations en magnésium sont élevées et parfaitement constantes tout au long de l'année (60 mg/L) pour les deux campagnes. Cette stabilité traduit une forte minéralisation d'origine géologique, probablement liée à la dissolution de formations dolomitiques ou magnésiennes. L'absence de variation saisonnière indique un système hydrogéochimique stable, dominé par des apports souterrains et peu influencé par les conditions climatiques.

En revanche, à Boutheldja, les concentrations en Mg^{2+} sont nettement plus faibles (2,4 mg/L) durant la majeure partie de l'année, reflétant une faible minéralisation. Cependant, une augmentation est observée durant la période 2023–2024 entre septembre et décembre, où les valeurs atteignent 4 mg/L. Cette hausse saisonnière pourrait être liée à des apports ponctuels en sels dissous, possiblement dus au ruissellement, à la concentration par évaporation ou à des interactions temporaires avec des substrats géologiques. Durant la période 2024–2025, les valeurs restent constantes (2,4 mg/L), suggérant une absence de ces apports ou des conditions hydrologiques plus stables.

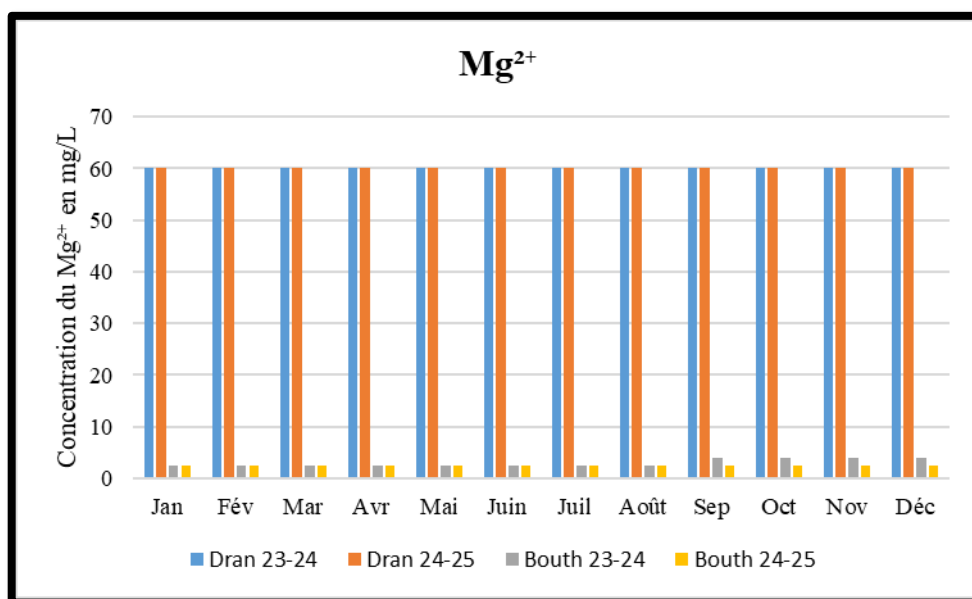


Figure 26. Variation mensuelle des concentrations en magnésium (Mg^{2+}) des eaux des stations de Deran et Boutheldja durant les périodes 2023–2024 et 2024–2025.

III.1.3. Comparaison aux normes

Tableau 12. Comparaison des paramètres physico-chimiques aux normes algériennes

Paramètre	Norme algérienne	Deran	Boutheldja	Interprétation
Température (°C)	-	13–25	14–25	Conforme
pH	6,5 – 8,5	8,5–8,6	6,5–6,6	Conforme
Conductivité ($\mu S/cm$)	≤ 2800	3730	153	Dépassement à Deran
TDS (mg/L)	≤ 1500	1910	72	Dépassement à Deran
Salinité (g/L)	-	1,96	0,07	Élevée à Deran
Turbidité (NTU)	≤ 5	0,38–0,81	0,36–0,86	Conforme
NH_4^+ (mg/L)	$\leq 0,5$	0,01	0,01	Conforme
NO_2^- (mg/L)	$\leq 0,1$	0–0,01	0	Conforme
PO_4^{3-} (mg/L)	$\leq 0,5$	0,01–0,02	0,01–0,02	Conforme
TH (mg/L)	≤ 500	900	30	Très dure à Deran
Ca^{2+} (mg/L)	≤ 200	260	8	Dépassement à Deran
Mg^{2+} (mg/L)	≤ 50	60	2,4	Légèrement élevé (Deran)

La comparaison des paramètres physico-chimiques mesurés au niveau des stations de Deran et Boutheldja avec les normes algériennes de qualité des eaux (fixées par le décret exécutif n° 11-219 relatif à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine) met en évidence des différences significatives selon les paramètres et les sites.

La température (T) mesurée dans les deux stations varie selon les saisons, mais reste dans des intervalles normaux pour les eaux naturelles et ne présente aucune contrainte réglementaire spécifique. Le pH est légèrement alcalin à Deran (8,5–8,6) et légèrement acide à neutre à Boutheldja (6,5–6,6), tout en restant dans l'intervalle admissible (6,5–8,5), ce qui indique un bon équilibre acido-basique des eaux.

En revanche, la conductivité électrique (CE) montre un contraste marqué : à Deran (3730 $\mu\text{S/cm}$), elle dépasse la valeur guide recommandée (2800 $\mu\text{S/cm}$), traduisant une forte minéralisation, alors qu'à Boutheldja (153 $\mu\text{S/cm}$), elle est largement conforme et caractérise une eau faiblement minéralisée.

Les solides dissous totaux (TDS) confirment ces observations. Les valeurs élevées enregistrées à Deran (1910 mg/L) dépassent la limite recommandée (1500 mg/L), indiquant une charge importante en sels dissous, tandis que celles de Boutheldja (72 mg/L) restent très faibles et conformes.

La salinité suit la même tendance, avec des valeurs élevées à Deran (1,96 g/L) traduisant une eau saline, alors qu'à Boutheldja (0,07 g/L), elle reste faible et compatible avec les normes de potabilité.

La turbidité présente des variations saisonnières dans les deux stations, notamment à Boutheldja, mais les valeurs restent globalement inférieures à la limite admissible (5 NTU), indiquant une bonne qualité visuelle de l'eau.

Concernant les éléments azotés, les concentrations en ammonium (NH_4^+) (0,01 mg/L) sont largement inférieures à la norme (0,5 mg/L), traduisant l'absence de pollution organique récente. Les nitrites (NO_2^-) sont quasi nuls, bien en dessous de la limite (0,1 mg/L), ce qui indique une bonne oxygénation et une nitrification complète. Les ortho-phosphates (PO_4^{3-}) présentent également des concentrations faibles (0,01–0,02 mg/L), révélant un faible risque d'eutrophisation et une absence de pollution phosphorée significative.

La dureté totale (TH) montre des différences importantes : à Deran (900 mg/L), elle dépasse largement les valeurs recommandées, classant l'eau comme très dure, tandis qu'à Boutheldja (30 mg/L), elle correspond à une eau douce conforme aux normes.

Les concentrations en calcium (Ca^{2+}) à Deran (260 mg/L) dépassent la valeur guide (200 mg/L), contribuant à la forte dureté de l'eau, alors qu'à Boutheldja (8 mg/L), elles restent faibles et conformes. De même, le magnésium (Mg^{2+}) est relativement élevé à Deran (60 mg/L), proche des limites admissibles, tandis qu'il est très faible à Boutheldja (2,4 mg/L).

En synthèse, la comparaison aux normes algériennes met en évidence deux profils hydrochimiques distincts :

- Boutheldja présente une eau globalement conforme à toutes les normes, caractérisée par une faible minéralisation et une bonne qualité physico-chimique ;
- Deran, bien que conforme pour les paramètres liés à la pollution (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} , turbidité), se distingue par une minéralisation excessive (CE, TDS, TH, Ca^{2+} , Mg^{2+}), dépassant certaines valeurs recommandées et pouvant limiter son usage pour la consommation sans traitement.

Ainsi, l'ensemble des paramètres étudiés confirme que la qualité des eaux est principalement contrôlée par les conditions géologiques et hydrogéochimiques locales, avec une influence dominante des formations minérales à Deran et une alimentation plus diluée à Boutheldja.

Synthèse interprétative

Les résultats physico-chimiques mettent en évidence deux systèmes aquatiques nettement contrastés sur le plan hydrochimique. La station de Deran se caractérise par une minéralisation très élevée et stable dans le temps, traduite par des valeurs importantes de CE, TDS, TH, Ca^{2+} et Mg^{2+} . Cette stabilité suggère une dominance des apports souterrains et une forte interaction eau-roche, probablement liée à des formations carbonatées et évaporitiques. À l'inverse, la station de Boutheldja présente une eau faiblement minéralisée, plus sensible aux variations saisonnières, indiquant un système dominé par des apports de surface et des processus de dilution.

Globalement, la faible variabilité des nutriments (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}) dans les deux sites traduit une absence de pollution organique ou agricole significative, ce qui confirme un bon état écologique global des systèmes étudiés.

III.1.4. Discussion

L'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux des stations de Deran et Boutheldja met en évidence une différenciation hydrochimique très marquée entre les deux sites, traduisant l'influence déterminante des conditions géologiques et hydrologiques locales. En effet, les valeurs très élevées de la conductivité électrique, des solides dissous totaux (TDS), de la salinité et de la dureté totale enregistrées à Deran témoignent d'une forte minéralisation de l'eau, contrairement à Boutheldja où ces paramètres restent faibles, caractérisant une eau diluée. Ce contraste traduit l'existence de deux types d'eaux distincts : une eau fortement minéralisée de type calco-magnésien à Deran et une eau faiblement minéralisée à Boutheldja.

Les niveaux élevés de minéralisation observés à Deran sont cohérents avec de nombreuses études réalisées en zones semi-arides et en Algérie, où les fortes valeurs de conductivité et de dureté sont généralement attribuées à la dissolution des formations carbonatées et évaporitiques ainsi qu'aux processus d'évapoconcentration (Appelo & Postma, 2005 ; Hem, 1985 ; Kherici-Bousnoubraet *al.*, 2011 ; Boukhallat *et al.*, 2025 ; Menad, 2018). En effet, la présence de concentrations élevées en calcium et en magnésium à Deran confirme une interaction prolongée entre l'eau et les roches carbonatées, phénomène largement documenté dans les aquifères du Nord et du Sud de l'Algérie (Bounab *et al.*, 2017 ; Bouteraa *et al.*, 2019).

À l'inverse, les faibles concentrations enregistrées à Boutheldja sont comparables aux eaux faiblement minéralisées dominées par les apports pluviaux, où les processus de dilution prédominent sur les interactions eau-roche (Freeze & Cherry, 1979 ; Drever, 1997). Ce type d'eau est également observé dans plusieurs aquifères superficiels du Nord de l'Algérie, caractérisés par une recharge rapide et une faible résidence de l'eau dans le substrat (Bounab *et al.*, 2017).

Par ailleurs, la stabilité temporelle observée pour la majorité des paramètres physico-chimiques indique que les caractéristiques chimiques des eaux sont principalement contrôlées par des facteurs structuraux plutôt que saisonniers. Cette stabilité est typique des systèmes hydrogéochimiques dominés par des apports souterrains constants ou des régimes hydrologiques équilibrés (Custodio & Llamas, 1983 ; Bouteraa *et al.*, 2019).

Le pH met également en évidence deux environnements distincts. Les eaux de Deran présentent un caractère alcalin, en lien avec la présence de carbonates, alors que celles de Boutheldja sont légèrement acides à neutres. Ce comportement est largement documenté dans les systèmes aquatiques contrôlés par les équilibres du système carbonaté (**Stumm & Morgan, 1996**).

En ce qui concerne les nutriments, les concentrations très faibles en ammonium, nitrites et orthophosphates observées dans les deux stations indiquent une absence de pollution anthropique significative. Ces résultats sont en accord avec les travaux de **Meybeck (1982)** et **Allan et Castillo (2007)**, ainsi qu'avec des études récentes en Algérie qui montrent que les milieux peu anthropisés présentent généralement des concentrations très faibles en nutriments (**Derdouret al., 2023**). La quasi-absence de nitrites traduit également une bonne oxygénation du milieu.

La turbidité constitue le seul paramètre présentant une variabilité saisonnière notable, notamment à Boutheldja, où elle semble influencée par les apports de matières en suspension liés aux précipitations et au ruissellement, phénomène typique des systèmes hydrologiques de surface (**Wetzel, 2001**).

Enfin, la comparaison aux normes algériennes montre que les eaux de Boutheldja sont globalement conformes, tandis que celles de Deran présentent des dépassements pour les paramètres liés à la minéralisation. Toutefois, les faibles concentrations en nutriments confirment que la qualité des eaux est principalement contrôlée par des facteurs naturels plutôt que par des apports anthropiques (**Bounab et al., 2017 ; Derdouret al., 2023**).

III.1.5. Conclusion

Les résultats révèlent un contrôle hydrochimique principalement gouverné par la lithologie et les processus de dissolution des minéraux, avec une forte minéralisation à Deran et une eau faiblement minéralisée à Boutheldja. La qualité globale reste bonne pour les paramètres de pollution, mais les dépassements observés à Deran pour la conductivité, la dureté et les ions majeurs indiquent une limitation naturelle d'usage sans traitement préalable.

De manière générale, les eaux de Deran présentent un caractère fortement minéralisé, dominé par les ions calcium et magnésium, traduisant une interaction intense avec les formations carbonatées et, possiblement, évaporitiques. Cette minéralisation élevée, associée à une stabilité temporelle des paramètres, suggère une alimentation majoritairement souterraine et un temps

de résidence important des eaux dans le milieu géologique. En revanche, les eaux de Boutheldja se distinguent par une faible minéralisation et une composition chimique stable, témoignant d'une dominance des apports pluviaux et d'une faible interaction eau-roche, ce qui favorise des phénomènes de dilution.

Par ailleurs, les faibles concentrations en nutriments (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}) observées dans les deux stations confirment l'absence de contamination anthropique significative et traduisent un bon état écologique des eaux étudiées. La variabilité saisonnière limitée de la majorité des paramètres, à l'exception de la turbidité, met en évidence un système hydrogéochimique relativement stable, peu influencé par les fluctuations climatiques.

En termes d'aptitude à l'usage, les eaux de Boutheldja apparaissent globalement conformes aux normes de potabilité et présentent une bonne qualité physico-chimique. À l'inverse, les eaux de Deran, bien que non affectées par une pollution d'origine anthropique, présentent une minéralisation excessive d'origine naturelle, pouvant limiter leur utilisation directe pour la consommation humaine et nécessiter des traitements appropriés, notamment pour la réduction de la dureté et de la salinité.

Ainsi, l'ensemble des résultats met en évidence deux contextes hydrogéochimiques distincts : un système fortement minéralisé contrôlé par les interactions eau-roche à Deran, et un système dilué dominé par les apports météoriques à Boutheldja. Ces différences soulignent l'importance des facteurs géologiques et hydrologiques dans la détermination de la qualité des eaux, et constituent une base essentielle pour la gestion et la valorisation durable des ressources hydriques dans la région étudiée.

III.1.6. Comparaison aux études antérieures

Les résultats obtenus dans la présente étude sont globalement cohérents avec plusieurs travaux réalisés dans des contextes hydro-géochimiques similaires en région méditerranéenne et en Afrique du Nord.

La forte minéralisation observée à Deran (CE élevée, TDS > 1500 mg/L et TH très élevée) est comparable aux résultats rapportés dans les aquifères carbonatés du nord de l'Algérie, notamment dans les régions de Annaba, Guelma et El Tarf, où les eaux souterraines présentent des conductivités élevées dues à la dissolution des carbonates et des formations évaporitiques.

Des études similaires ont montré que dans les zones semi-arides, l'évaporation et le temps de résidence prolongé des eaux favorisent l'enrichissement en Ca^{2+} et Mg^{2+} , conduisant à des eaux de type très minéralisé et parfois non conformes aux normes de potabilité.

À l'inverse, les faibles valeurs de conductivité et de TDS enregistrées à Boutheldja sont proches de celles décrites dans les systèmes de surface alimentés principalement par les précipitations, où la dilution domine les processus hydrochimiques. Ce type de signature est fréquemment observé dans les zones à forte recharge pluviale ou à faible interaction avec les formations géologiques réactives.

Concernant les nutriments (NH_4^+ , NO_2^- et PO_4^{3-}), les concentrations très faibles ou nulles dans les deux sites sont en accord avec les recommandations de l'OMS et les résultats d'études antérieures montrant que les eaux non impactées par les activités agricoles ou domestiques présentent généralement des niveaux proches de zéro pour les formes réduites de l'azote. L'absence de nitrites détectables confirme également un bon état d'oxygénation du milieu et une nitrification complète, ce qui est typique des systèmes aquatiques peu pollués.

Par ailleurs, les faibles concentrations en orthophosphates observées sont similaires à celles rapportées dans des milieux naturels peu anthropisés, où le phosphore est rapidement assimilé par la biomasse ou fixé dans les sédiments, limitant ainsi sa disponibilité dans la colonne d'eau.

Enfin, la différence marquée entre les deux sites (Deran fortement minéralisé vs Boutheldja faiblement minéralisé) est en accord avec les travaux de plusieurs auteurs ayant démontré que la variabilité hydrochimique des eaux naturelles est principalement contrôlée par la lithologie, le mode de recharge et le degré d'interaction eau-roche, plutôt que par des facteurs anthropiques dans les systèmes peu urbanisés.

Globalement, ces résultats confirment que la chimie des eaux étudiées est principalement gouvernée par des processus géogéniques, en accord avec les tendances décrites dans les environnements méditerranéens similaires.

CONCLUSION

Conclusion

Au terme de ce travail consacré à l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de source dans les communes de Deran et Boutheldja, il apparaît que ces ressources hydriques présentent des caractéristiques contrastées, fortement influencées par les conditions géologiques, hydrologiques et environnementales propres à chaque site. L'analyse menée sur deux périodes successives (2023–2024 et 2024–2025) a permis de mettre en évidence à la fois une différenciation spatiale marquée entre les deux stations et une dynamique temporelle globalement stable des paramètres étudiés.

Dans l'ensemble, les résultats révèlent une stabilité notable des paramètres physico-chimiques au cours du temps. La conductivité électrique, les solides dissous totaux (TDS), la salinité, la dureté totale ainsi que les ions majeurs (calcium et magnésium) présentent de faibles variations saisonnières. Cette constance suggère un contrôle dominant des facteurs structuraux, notamment la lithologie et les conditions de circulation des eaux souterraines, plutôt que des fluctuations climatiques. Elle témoigne également d'un équilibre hydrogéochimique relativement stable.

La station de Deran se caractérise par une forte minéralisation, avec des valeurs élevées de conductivité, de TDS, de salinité et de dureté. Les concentrations importantes en calcium et en magnésium traduisent un faciès hydrochimique de type calco-magnésien, indiquant une interaction prolongée entre l'eau et les formations géologiques, probablement riches en carbonates et en minéraux évaporitiques. Ce contexte est généralement associé à un temps de résidence élevé des eaux souterraines, favorisant les processus de dissolution et l'enrichissement en ions.

À l'inverse, la station de Boutheldja présente une faible minéralisation, caractérisée par de faibles valeurs de conductivité, de TDS et de dureté. Cette composition reflète un système hydrologique dominé par les apports météoriques, avec une circulation rapide des eaux et un temps de résidence limité dans le substrat géologique. Ce type de fonctionnement est typique des nappes superficielles ou des systèmes fortement influencés par les précipitations.

Le pH confirme cette différenciation : les eaux de Deran présentent un caractère alcalin relativement stable, en lien avec la présence de carbonates, tandis que celles de Boutheldja sont légèrement acides à neutres, traduisant une moindre influence lithologique carbonatée.

Par ailleurs, les concentrations en nutriments (ammonium, nitrites et orthophosphates) restent très faibles dans les deux stations. Cela indique une absence de pollution anthropique significative et témoigne d'un environnement globalement préservé. La quasi-absence de nitrites suggère également une bonne oxygénation du milieu et un fonctionnement efficace des processus de nitrification.

La turbidité constitue le principal paramètre présentant une variabilité saisonnière, notamment à Boutheldja, en lien avec les épisodes pluvieux et le ruissellement. Toutefois, les valeurs enregistrées restent faibles et conformes aux normes, sans impact significatif sur la qualité globale de l'eau.

La comparaison avec les normes algériennes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine met en évidence une situation contrastée. Les eaux de Boutheldja respectent l'ensemble des normes étudiées et peuvent être considérées comme aptes à la consommation directe. En revanche, les eaux de Deran présentent des dépassements pour certains paramètres liés à la minéralisation (conductivité, TDS, dureté totale et calcium). Bien que d'origine naturelle, ces niveaux élevés peuvent limiter leur utilisation pour l'alimentation humaine sans traitement préalable.

Ainsi, cette étude met en évidence l'existence de deux systèmes hydrogéochimiques distincts :

- un système fortement minéralisé, contrôlé par les interactions eau-roche (Deran),
- un système faiblement minéralisé, dominé par les apports pluviaux (Boutheldja).

Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer les facteurs géologiques et hydrologiques dans l'évaluation de la qualité des eaux et dans la mise en place de stratégies de gestion adaptées. Les eaux de Boutheldja peuvent être valorisées directement pour l'alimentation en eau potable, tandis que celles de Deran nécessitent des traitements appropriés, notamment pour réduire la dureté et la salinité.

Enfin, ce travail constitue une base de référence pour la compréhension du fonctionnement hydrogéochimique des eaux de source dans la région d'El Tarf. Il ouvre des perspectives de recherche futures, telles que l'étude des éléments traces, les analyses isotopiques et le suivi à long terme, afin d'anticiper les effets des changements climatiques et des pressions anthropiques.

En conclusion, les eaux étudiées présentent globalement une bonne qualité du point de vue de la pollution, mais des différences significatives liées à leur origine géologique. Leur préservation repose sur une gestion durable et un suivi régulier, garantissant leur qualité et leur disponibilité à long terme.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

A

Allan, J. D., & Castillo, M. M. (2007). *Stream ecology: Structure and function of running waters* (2nd ed.). Springer.

Alouane H., 2012. *Evaluation des teneurs en nitrates dans les sols et dans les eaux captées et émergentes en zones à vocation agricole, Impact des nitrates sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 49p.*

Angulo FJ, Tippen S, Sharp DJ, Payne BJ, Collier C, Hill JE, Barret TJ, Clark RM, Geldreich EE, Donnel HD, Swerdlow DL. 1997. A community waterborne outbreak of salmonellosis and effectiveness of a boil water order. *American Journal of Public Health*, 87(4): 580-584.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). A. A. Balkema.

Appelo, C.A.J. and Postma, D. (2005) *Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition*, Balkema, Rotterdam. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439833544>

Aschmann, H. (1973). *Distribution and peculiarity of Mediterranean ecosystems. In F. di Castri H. A. Mooney (Eds.), Mediterranean Type Ecosystems (Ecological Studies).* Springer

Ashbolt, N. J. (2004). *Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. Toxicology*, 198(1-3), 229-238.

Aubert, C. (2002). *Les eaux de boisson : eau du robinet, eaux de source et eaux minérales.* Paris : Éditions Sang de la Terre.

B

Bahrour. S, (2020). *Évaluation de l'indice de pollution organique dans les eaux du barrage Cheffia, région d'El Tarf. Université d'El Tارف.*42p.

Balbus JM, Embrey MA. 2002. Risk factors for waterborne enteric infections. *Current Opinion in Gastroenterology*, 18 (1): 46- 50.

Ballouki, K. (2012). *Etude de la Qualité Physico-chimique et Biologique de trois Sources dans la Région de Midelt (Haut Moulouya). Mémoire de Master Sciences et Techniques, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, 102 page.*

Belkhiri, L., Boudoukha, A., & Mouni, L. (2011). *Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater—A case study: Ain Azel plain (Algeria). Geoderma, 159(3–4), 390–398.*

Benkaddour, A., & Taleb, A. (2006). *Qualité physico-chimique des eaux souterraines dans la région de Tlemcen (Algérie). Afrique Science, 2(1), 37–52.*

Benyacoub, S. (1993). *Ecologie de l'avifaune Forestière Nicheuse de La Région d'El-Kala (Nord-Est Algérien) [Doctoral dissertation, Université de Bourgogne].*

Berradia N., Serisserr H., 2019. *Effet de la lumière sur l'évolution de qualité physico-chimique et bactériologique des eaux minérales embouteillées. Mémoire de master. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem. 61p.*

Bliefret C., Perraud., (2001). *Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. Bruxelles : De Boeck, pp285-286-326.*

Bligny, R., & Hartemann, P. (2005). *Eaux de source et eaux minérales: qualité, réglementation et contrôle sanitaire. Paris: Éditions Tec & Doc.*

Bosca C., 2002: *Ground water law and administration of sustainable development Mediterranean Magazine, Science Training and Technology, N° 2, Pp: 13-17.*

Boukhallat, K., Benaabidate, L., El Khalki, Y., & Lahrach, A. (2025). *Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in southeastern Algeria. Carbonates and Evaporites, 40(1), 1–15.*

Bounab, S., Bousnoubra, H., & Saou, A. (2017). *Typologie hydrogéochimique des eaux souterraines de l'extrême Nord-Est algérien (Annaba–El Tarf). Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, 35, 166–177.*

Bounab, S., Bousnoubra, H., & Saou, A. (2017). *Typologie hydrogéochimique des eaux souterraines de l'extrême Nord-Est algérien (Annaba–El Tarf). Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, 35(1), 166–177.*

Bousseboua., (2005) : *Eléments de microbiologie. 2ème édition, Campus-Club, Algérie.*

Bouteraa, O., Bousnoubra, H., Saou, A., & Bounab, S. (2019). *Hydrogéochimie et variations spatio-temporelles de la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de Boumerzoug (Nord-Est algérien).* *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(2), 123–135.

Brasilia, 2013. *Manuel pratique d'analyse de l'eau. 4^{ème} édition.* 54, 57, 63 p.

Brown R.M., McClelland N.I., Deininger R.A., O'Connor M.F. (1972). *A Water Quality Index -Crashing the Psychological Barrier.* In: Thomas W.A. (eds) *Indicators of Environmental Quality.* *Environmental Science Research*, vol 1, 173-182. Springer, Boston, MA.
https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., Tozer, R. G. (1970). *A Water Quality Index- Do We Dare?* *Water and Sewage Works*, 117, 339–343.

C

C.I.E. (2005). *Centre d'information sur l'eau* disponible sur internet: www.Cieau.com.

Carrega, P., & Garcia, E. (2000). *Les fortes précipitations quotidiennes en Toscane et leur cartographie.* *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, *13*.

Centre d'Expertise En Analyse Environnementale Du Québec., 2015. *Détermination de la conductivité : méthode électrométrique*, MA. 115 – Cond. 1.1, rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 9p.

Chapelle, F. H. (2025). *Hydrogeology and Geochemistry of Bottled Spring Water in the United States.* *The Groundwater Project.* <https://doi.org/10.62592/DWMH1044>

Chettibi ,A. (2020). *Utilisation des habitats et facteurs de distribution de certaines espèces aviennes dans les zones humides du Nord-Est Algérie.* [Thèse doctorat Université de M'sila] <https://repository.univ-msila.dz/handle/123456789/20666>

Coulibaly K. (2005). *Etude De La Qualité Physico-chimique Et Bactériologique De L'eau Des Puits De Certains Quartiers Du District De Bamako.* Thèse de Doctorat, Université de Bamako. 69p.

Custodio, E. (2002). *Groundwater Quality : Genesis and Contamination.* Taylor & Francis

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hydrogeology (Vol. 1).* Omega.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Groundwater hydrology* (2nd ed.). London: Balkema.

D

Dahel Zanat, 2009 : *Mémoire de Magistère, Analyse de la qualité bactériologique des eaux du littoral Nord-Est algérien à travers un bioindicateur la moule Perna perna, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2009, p: 69.*

Dassargues, A. (2012). *Groundwater issues create challenges for engineers [Paper presentation]. Ceremony Doctor Honoris Causa at the Technical University of Civil Engineering in Bucharest (TUCEB), Bucharest, Romania.*

Dassargues, A. (2020). *Hydrogéologie appliquée : science et ingénierie des eaux souterraines.* Dunod.

de l'eau de la source Thala Ouguellidh au niveau de la commune de Mechtras dans la région de Tizi – Ouzou. Mémoire de master en écologie et environnement, Université de Mouloud

Debabza, 2005 : *Mémoire de Magister en Microbiologie appliquée : Analyse microbiologique des eaux des plages de la ville d'Annaba Evaluation de la résistance aux antibiotiques des microorganismes pathogènes, Université des sciences de Badji-Mokhtar, Annaba(Algérie), 2005.*

Derdour, A., Benslama, M., & Kherici, N. (2023). *Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines dans la région de Naâma (Algérie). Larhyss Journal, 53, 45–60.*

Derdour, A., Benslama, M., & Kherici, N. (2023). *Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines dans la région de Naâma (Algérie). Larhyss Journal, 53, 45–60.*

Derwich E., Beziane Z., Benaabidate L et Belghyti D. (2008) - *Evaluation de la qualité des eaux de surface des oueds Fès et Sebou utilisées en agriculture maraichère au Maroc. Larhyss Journal. (7). 59-77*

Diallo M., (2010). *Evolution des paramètres physico-chimique et bactériologique des eaux de puits en fonction du traitement à l'hypochlorite de sodium. Thèse de doctorat, Université du Mali, p 16.*

Dreux, P. (1980). *Precis d'ecologie. Presse Universitaire de France.*

Drever, J. I. (1997). *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments (3rd ed.).* Prentice Hall.

Driscoll Charles T., Gregory B. Lawrence, Arthur J. Bulger, Thomas J. Butler, Christopher S. Cronan, Christopher Eagar, Kathleen F. Lambert, Gene E. Likens, John L. Stoddard, Kathleen C. Weathers, *Acidic Deposition in the Northeastern United States: Sources and Inputs, Ecosystem Effects, and Management Strategies: The effects of acidic deposition in the northeastern United States include the acidification of soil and water, which stresses terrestrial and aquatic biota*, *BioScience*, Volume 51, Issue 3, March 2001, Pages 180–198, [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0180:ADITNU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0180:ADITNU]2.0.CO;2)

E

El Kettani, Azzouzi EM. 2006. *Prévalence des helminthes au sein d'une population rurale utilisant les eaux usées à des fins agricoles à Settat (Maroc).* *Environnement Risques et Santé*, 2 : 99- 106.

El Ouali Lalami , A. Merzouki , M. El Hillali, O. Maniar , S. Ibnsou Da Koraichi, S. 2011. *Pollution des eaux de surface de la ville de Fès au Maroc : Typologie, Origine et conséquence.* *Larhyss Journal*, 9, 55-72.

F

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater.* Prentice Hall.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater.* Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater.* Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

G

Gene E. Likens, F. Herbert Bormann , *Acid Rain: A Serious Regional Environmental Problem.* *Science* **184**,1176-1179(1974).DOI:[10.1126/science.184.4142.1176](https://doi.org/10.1126/science.184.4142.1176)

Gomela C., GUERREE H., (1978). *Le traitement des eaux publiques, industrielles et privées.* Edition Eyrolles, p262 Paris. France

Guiraud J.P. (1998). *Microbiologie alimentaire.* Dunod. 615p.

H

Hane M., Diagne I., Ndaye B., Dione T., Cisse D., Diop A., (2020). Etude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits et de forages consommées dans la commune de Sinthiou Maléme dans la région de Tambacounda(Sénégal).IJBCS.14(9). pp3400-2412.

Hani A. (2003) : Analyse méthodologique de la structure des processus anthropiques. Application aux ressources en eaux d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doctorat d'Etat, université d'Annaba, p 234.

Hazzab A. (2011) a. Eaux minérales naturelles et eaux de source en Algérie, Comptes Rendus Géoscience, 343, 20-31.

Hazzab A. (2011) b. Retrospective of natural mineral waters and spring waters in Algeria: Regulatory Framework and Technical Aspects. Desalination and Water Treatment. 36, 13–26.

Hélène, 2000.Thèse d'Ingénieurs du génie sanitaire Qualité microbiologique des eaux brutes distribuées par BRL, l'Ecole Nationale de la Santé Publique de LanguedocRoussillon(France), 2000, p: 81.

Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd ed.). U.S. Geological Survey.

Hem, J.D. (1985) Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd Edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, University of Virginia, Charlottesville, 263 p.

Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. Journal of Water Pollution Control Federation, 37(3), (pp.300- 306).

J

Joleaud L. (1936): Etude géologique de la région de Bône-la Calle, B.S.G.A (2), N°12, 199 p.

Joradp (2004). Décret Exécutif n° 04-196 du 15 juillet 2004, relatif à l'exploitation et la protection des eaux minérales naturelles et des eaux de sources, Journal officiel de la république algérienne

K

Khammar H. 2018. Hydrochimie et qualité des eaux, p2-4.

Khellili R., Lazali D. (2015). *Etude des propriétés physico-chimiques et bactériologiques de l'eau du barrage Harraza (Wilaya de Ain Defla) (2005).*

Khérici N. (1985) : *Aquifère sableux de bord de mer, hydrodynamique et hydrochimie ; exemple de la nappe de Bouteldja (Nord– Est Algérien), Doctorat de 3eme cycle, université de Montpellier, France, 202 p*

Kherici-Bousnoubra, H., Saou, A., & Bounab, S. (2011). *Hydrochimie des eaux souterraines en zones semi-arides : cas du Nord-Est algérien. Revue des Sciences de l'Eau, 24(3), 195–210.*

Kherici-Bousnoubra, H., Saou, A., & Bounab, S. (2011). *Hydrochimie des eaux souterraines en zones semi-arides : cas du Nord-Est algérien. Revue des Sciences de l'Eau, 24(3), 195–210.*

Kherifi W, Kherici-Bousnoubra H, (2012), *évolution saisonnière de la qualité microbiologique des eaux du lac mellah (nord-est algérien), Larhyss Journal, ISSN 1112- 3680, n° 11, pp : 110-114.*

Krause, S., et al. (2020). *Ecological role of springs in maintaining biodiversity in freshwater ecosystems. Freshwater Biology, 65(7), 1123–1139. <https://doi.org/10.1111/fwb.13412>*

L

Laferriere M, Minville JJ, Lavoie J, Payment P. 1996. *L'industrie porcine et les risques reliés à la santé humaine. Bull. Information Santé Environnem., Québec, 7(2): 1-4.*

Lazri, M., Ameer, Z., Ameer, S., Mohia, Y., Brucker, J. M., & Testud, J. (2013). *Rainfall estimation over a Mediterranean region using a method based on various spectral parameters of SEVIRI-MSG. Advances in Space Research, *52*, 1450–1466.*

Le Minor L, Veron M. 1989. *Bactériologie Médicale. Flammarion édn : Paris ; 1107p.*

Ledler, 1986. In Haoussa, N. 2013. *Etude de la qualité des eaux des mélanges eau d'oued Biskra – Eau de Droh. Mémoire de master 2. Hydraulique urbaine, Université Mohamed Khider – Biskra : Faculté des sciences et de technologie, 25 p.*

Lightfoot N.F. (2002) - *Analyses microbiologiques des aliments et de l'eau. Directives pour l'assurance qualité. 387 p.*

Livre bleu., (2002). *Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'eau potable et l'assainissement des eaux usées.*

Lottermoser, B.G. (2010) *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>

M

Maiga, 2005 : *Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.SA dans la ville de Bamako : évaluation saisonnière*, Thèse de Doctorat en Pharmacie, Université de Bamako, Bamako, Mali p77

Maiga, A-S., (2005). *Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.SA dans la ville de BAMAKO : évaluation saisonnière* .Thèse de Doctorat. Faculté de Médecine de pharmacie et D'odonto-stomatologie. P21.

Makhoukh M. 2011. *Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles del'oued Moulouya*. Maroc.

Manceur et Djaballah, (2016) : *Analyse microbiologique de l'eau distribuée dans la ville de Tébessa*,Mémoire de Master 2 en Microbiologie Appliquée, Université Labri Tébessi, Tébessa, Algérie.

Marsily G. (1995). *La protection des eaux minérales et des eaux de source : des zones de protection renforcées*. La Houille Blanche, N° 2/3. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1995018>

Menad, I. (2018). *Hydrogéologie et qualité des eaux des aquifères mio-pliocènes en milieu saharien (Algérie) (Thèse de doctorat)*. Université Kasdi Merbah Ouargla.

Menad. K, Metadjer 2012. *Traitement des eaux saumâtres par l'osmose inverse cas de l'eau de Khemis Miliana* .Université Khemis Miliana.

Merzoug, D et al. (2010) : *Faune aquatique et qualité de l'eau des puits et sources de la région d'Oum-El-Bouaghi (Nord-Est algérien)*, Hydroécol Applied, p77–97.

Meybeck, M. (1982). *Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers*. American Journal of Science, 282(4), 401–450.

Myrand, D. (2008) : *Guide technique : captage d'eau souterraine pour des résidences isolées*,Québec, p04.

N

Naimi M., Allaoua O., (2017). *Contrôle de qualité microbiologique et physico-chimique de l'eau de source Chiffa*.Mémoire de master, Université de Medea,p8-9.

O

OMS. 1986. *Directives de Qualité pour l'Eau de Boisson. Critères d'Hygiène et Documentation à l'Appui (Vol. 2, 1ière édn).* OMS : Genève ; 341 p.

OMS. 2002. *Emerging and epidemic-prone diseases. In Global Defence Against the Infectious Disease Threat.* World Health Organisation: Geneva; 205 p.

OMS., 2005: *Directives de qualité pour l'eau de boisson. 3ème édition, Vol 1. Directives, Ed. Organisation mondiale de la sante, Genève, P 110*

P

Patw El-Tarf phase1, plan d'aménagement du territoire wilaya d'El-Tarf phase 1.2011.
L'Evaluation territoriale et le diagnostic « Etat des lieux et analyse des tendances »

Payment, P., & Locas, A. (2011). *Pathogens in water: value and limits of correlation with microbial indicators. Groundwater, 49(1), 4-11.*

Philandras, C. M., Nastos, P. T., Kapsomenakis, J., Douvis, K. C., Tselioudis, G., Zerefos, C. S. (2011). *Long term precipitation trends and variability within the Mediterranean region. Natural Hazards and Earth System Sciences, *11*, 3235–3250.*

Prescott, L.M., Harley, J.P. and Klein, D.N. (1999) *Microbiology. 4th Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 685.*

R

Ramade F., 2011. *Introduction à l'écochimie, les substances chimique et l'écosphère a l'Homme. Edition. Lavoisire. Paris. 828p.*

Ramade, F. (2009). *Eléments d'écologie : Écologie Fondamentale (4^e éd.).* Dunod.

Ramdani A. (1996) : *Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mémoire de Magister. Université d'Annaba, 138 p.*

Rejsek F., 2002. *Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques. Sceren. Paris. 360p.*

Remini , B. 2010 : *La problématique de l'eau en Algérie du nord. Larhyss Journal , 8 : 27-46*

Rodier J., 2005. *L'analyse de l'eau: Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer. 8eme édition: Dunod, Paris.*

Rodier. J., 1997: *L'analyse De L'eau (eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer)*, 8ème edition, Dunod Paris, P 66.

Rodier., J. Legube., B. Merlet N. Coll., 2009. *L'Analyse de l'eau. 9eme édition. Du nod. Paris, France. 1526p.*

S

Sabrina S., (2004). *SMAIL. T. Analyse physico-chimique des eaux de consommation de la ville de Bejaia, mémoire de fin d'étude D. E. U.A*

Sahraoui N. 2015. *Etude de la cohérence entre la vulnérabilité à la pollution de la qualité des eaux souterraines plaine Khemis Miliana. Mémoire de Master en Eau et Bioclimatique. Université Khemis Miliana.*

Samraoui, B., De Belair, G. (1998). *Les zones humides de la Numidie orientale : bilan des connaissances et perspectives de gestion. Synthèse, *4*, 1–90.*

Seltzer, P. (1946). *Le Climat d'Algerie. Trav. Inst. Meteo et pyhs. Du Globe. Skinner, J., & Zalewski, S. (1995). Fonctions et valeurs des zones humides méditerranéennes. Tour du Valat.*

Soulis, G. (2010). *SPRINGS (CLASSIFICATION, FUNCTION, CAPTURING). Bulletin of the Geological Society of Greece, 43(1), 196–215. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11174>*

Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters (3rd ed.). Wiley.*

T

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D. (2003) *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th Edition, McGraw-Hill, Boston.*

U

UNESCO. (2012). *Groundwater resources and management. Paris : UNESCO Publishing.*

United States Geological Survey. (2019). *Springs and the water cycle. U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/springs-and-water-cycle>*

V

Vanschoenwinkel, B., Gielen, S., Seaman, M., Brendonck, L. (2009). *Wind mediated dispersal of freshwater invertebrates in a rock pool metacommunity: Differences in dispersal capacities and modes.* *Hydrobiologia*, *635*(1), 363–372.

Vila. J. M, (1978) : *La chaîne alpine d'Algérie orientale et ses confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat Es Science. Univ de Pierre et Marie Curie. Paris, 640 p*

Vilaginés, R., (2000). *Eau, environnement et santé publique, introduction à l'hydrologie.* Edition technique et documentation 5, 15, 166 p.

W

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

WHO (World Health Organization), FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2016). *Codex Alimentarius: standard for infant formula and formulas for special medical purposes intended for infants.* Rome: FAO (CXS 72-1981).

World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st addendum).* World Health Organization.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Y

Yahmi H., Zeroukhi D., (2022). *Analyse de la qualité physico-chimique et bactériologique Mammeri de Tizi –Ouzou ,p4-5.*