



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : SCIENCES

DEPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : M^{lle}. FERROUDJ Maroua

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE : SCIENCES ALIMENTAIRES

OPTION : AGROALIMENTAIRE ET CONTROLE DE QUALITE

Thème

Réévaluation de la qualité physicochimique de quelques paramètres des eaux de source embouteillées et analyse spatiale de l'indice de pollution en lien avec l'occupation des sols

Jury de soutenance:

Nom et Prénom	Grade	qualité
M. HATTAB Mourad	MCA	Président
Mme. MENASRA Amina	MCB	Examineur
M. MAKOUDI Mourad	MAA	Encadreur
M. BENCHETTOUH Ahmed	MCA	Co-encadreur

Promotion: Juin – 2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة عمار ثليجي- الاغواط

كلية: العلوم

قسم العلوم الفلاحية

مذكرة ماستر

من تقديم: الانسة فروج مروة

ميدان: علوم الطبيعية و الحياة

شعبة: علوم الغذاء

تخصص: علوم غذاء ومراقبة النوعية

موضوع البحث



Réévaluation de la qualité physicochimiques de quelques paramètres des eaux de source embouteillées et analyse spatiale de l'indice de pollution en lien avec l'occupation des sols

أعضاء لجنة المناقشة:

الاسم و اللقب	الدرجة العلمية	الصفة
السيد : خطاب مراد	استاذ محاضر أ	رئيسا
السيدة: مناصرة أمينة	أستاذ محاضر ب	ممتحنا
السيد: مكودي مرط	استاذ مساعد أ	مقرا
السيد: بن شتوح أحمد	أستاذ محاضر أ	مساعد مقرر

الدفعة: جوان – 2025

Résumé

Les valeurs des paramètres physicochimiques des eaux de source embouteillées comparées aux normes de l'OMS et NA 1362, révèle que la majorité des échantillons sont conformes, bien que certaines sources présentent des dépassements ponctuels. Notamment, la source Aurès dépasse la limite autorisée en sulfates, et plusieurs eaux présentent des concentrations élevées en Mg, Na, ou résidu sec, ce qui pourrait poser problème à certaines populations sensibles (nourrissons, personnes âgées, individus sous régime hyposodé). L'analyse en ACP a mis en évidence une grande variabilité entre les marques, reflétant des caractéristiques minérales influencées par la géologie locale. Des sources comme Medjana, Crista, Hirouche et Djurdjura présentent des concentrations relativement élevées en bicarbonates, nitrates ou sels dissous, révélant une minéralisation importante. Parallèlement, l'évaluation de IGP a permis de classer les bassins versants en fonction de IGP exercée sur leurs ressources hydriques. Deux zones se distinguent par une pression critique (Fezguia – O. Marzoug, et Taya – O. Rhumel Amont), principalement en raison d'activités agricoles ou urbaines intensives. À l'opposé, les bassins comme Soummam, Tadmit ou Taria présentent un IGP très faible, traduisant une meilleure préservation environnementale. Une cartographie synthétique des bassins versants confirme cette hétérogénéité spatiale. Les zones à forte couverture végétale offrent une meilleure protection naturelle, tandis que les zones dégradées (sols nus, urbanisation) sont plus exposées à la pollution. Enfin, l'analyse du comportement des consommateurs (via l'ANOVA et les tests post-hoc) montre des différences significatives dans les taux de vente entre les marques. Ain Boughez et Ichmoul se démarquent par une très forte demande, tandis que d'autres comme Noua, Aninos ou Ouwis affichent une demande marginale. Ces écarts semblent liés à la notoriété des marques, à la perception de qualité, ou à des critères comme le goût et l'étiquetage.

Mots clés: Qualité de l'eau, Paramètres physicochimiques, Sources embouteillées, ACP, IGP, taux de vente

Abstract

The values of the physicochemical parameters of bottled spring water, compared to WHO standards and Algerian standard NA 1362, reveal that most samples are compliant, although some sources show occasional exceedances. Notably, the Aurès source exceeds the permissible limit for sulfates, and several waters have high concentrations of Mg, Na, or dry residue, which could pose risks for sensitive populations (infants, the elderly, individuals on low-sodium diets). Principal Component Analysis (PCA) highlighted significant variability among brands, reflecting mineral characteristics influenced by local geology. Sources such as Medjana, Crista, Hirouche, and Djurdjura display relatively high levels of bicarbonates, nitrates, or dissolved salts, indicating strong mineralization. In parallel, the GPI assessment enabled the classification of watersheds based on the pressure exerted on their water resources. Two areas stand out for experiencing critical pressure (Fezguia – O. Marzoug, and Taya – Upper O. Rhumel), mainly due to intensive agricultural or urban activities. Conversely, basins such as Soummam, Tadmit, and Taria exhibit very low GPI values, reflecting better environmental preservation. A synthetic watershed mapping confirms this spatial heterogeneity. Areas with dense vegetation cover provide better natural protection, while degraded zones (bare soils, urbanization) are more exposed to pollution. Finally, consumer behavior analysis (through ANOVA and post-hoc tests) reveals significant differences in sales rates between brands. Ain Boughez and Ichmoul stand out with very high demand, while others like Noua, Aninos, or Ouwis show marginal demand. These disparities appear to be linked to brand awareness, perceived quality, or criteria such as taste and labeling.

Key words: Water quality, Physicochemical parameters, Bottled spring sources, PCA, GPI, Sales rate

ملخص:

تُظهر قيم المعايير الفيزيائية والكيميائية لمياه الينابيع المعبأة في زجاجات، مقارنة بمعايير منظمة الصحة العالمية والجمعية الوطنية 1362، أن غالبية العينات متوافقة مع هذه المعايير، على الرغم من أن بعض الينابيع لديها تجاوزات عرضية. على وجه الخصوص، يتجاوز نبع الأوراس الحد المسموح به من الكبريتات، كما أن العديد من المياه تحتوي على تركيزات عالية من المغنيسيوم أو الصوديوم أو البقايا الجافة، مما قد يشكل مشكلة لبعض الفئات السكانية الحساسة (الرضع وكبار السن والأشخاص الذين يتبعون أنظمة غذائية قليلة الملح. كشف تحليل عن درجة عالية من التباين بين العلامات، مما يعكس الخصائص المعدنية المتأثرة (ACP) المكونات الرئيسية بالجيولوجيا المحلية. تحتوي ينابيع مثل مجانة وكريستا وحبروش وجرجرة على تركيزات عالية نسبياً من البيكربونات والنترات والأملاح المذابة، مما يكشف عن تمعدن كبير. وفي الوقت نفسه، مكن تقييم مؤشر الضغط العالمي من تصنيف مناطق مستجمعات المياه وفقاً لمستوى الضغط البشري الممارس على مواردها المائية. تبرز منطقتان بسبب ضغطهما الحرج (فاسقية - وادي مرزوق، وطاية - وادي الرمل أمونت)، ويرجع ذلك أساساً إلى الأنشطة الزراعية أو الحضرية المكثفة. وعلى النقيض من ذلك، فإن أحواض مثل الصومام وتادميت وتاريا ذات ضغط منخفض للغاية، مما يعكس الحفاظ على البيئة بشكل أفضل. وتؤكد خريطة موجزة لمناطق مستجمعات المياه هذا التباين المكاني. فالمناطق ذات الغطاء النباتي المرتفع توفر حماية طبيعية أفضل، في حين أن المناطق المتدهورة (التربة الجرداء والتوسع العمراني) أكثر عرضة للتلوث. أخيراً، يُظهر تحليل سلوك المستهلك واختبارات ما بعد التخصيص اختلافات كبيرة في معدلات المبيعات بين العلامات ANOVA (باستخدام التجارية. حيث تبرز عين بوغلاز وإشمول بسبب الإقبال الكبير جداً على منتجات عين بوغلاز وإشمول بينما تظهر علامات أخرى مثل نوى وأينوس واويس طلباً هامشياً. يبدو أن هذه الاختلافات مرتبطة بالوعي بالعلامة التجارية أو الجودة المتصورة أو معايير مثل الطعم والعلامة التجارية.

الكلمات المفتاحية: جودة المياه، التحليل القيزيائي الكيميائي، مصادر الينابيع المعبأة، تحليل المك

ونات الرئيسي، مؤشر الضغط على الموارد المائية، معدل البيع

Liste des Abréviations

Bv :	Bassin versant
moy :	Moyenne
IGP :	Indice Global de Pression
Dd :	Degré décimale
m:	Mètre
SIG :	Systèmes d'Information Géographique
IQE :	Indice de qualité de l'eau
IGP :	Indice global de pression
O :	Oued
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
pH :	Potentiel en hydrogène
WHO :	World Health Organization
CE :	Conductivité Electrique
ACP :	Analyse en Composantes Principales
TH :	Titre hydrométrique
°F :	Degré français
% :	Pourcentage
°C :	Degré celsius
mg :	Milligramme
ml :	Millilitre
UFC :	formatrice de colonie
E.coli	Escherichia coli

Liste des figures

N	Titre	Page
Figure 1.	Localisation de la zone d'étude :.....	20
Figure 2.	Cercle des corrélations de l'ACP appliquée aux paramètres physico-chimiques des eaux de source embouteillées :.....	27
Figure 3.	Projection des eaux de source embouteillées sur le plan factoriel (ACP) selon leurs paramètres physico-chimiques :.....	28
Figure 4.	Classes d'occupation des sols de la zone d'étude :	30
Figure 5.	Classement des bassins versants selon leur IGP :	39
Figure 6.	Carte de synthèse géographique des bassins versants, codés par couleur selon leur niveau de pression sur la qualité des eaux de sources.....	39
Figure 7.	le taux de vente des marques des eaux de sources commercialisées dans la ville de Laghouat :	40

Liste des tableaux

N	Titre	Page
Tableau 1.	Comparaison entre différents types d'eaux	07
Tableau 2.	Caractéristiques des eaux de source embouteillées :.....	09
Tableau 3.	Normes OMS vs Algérie (NA 6361–2016)	11
Tableau 4.	Qualité physicochimique de certains paramètres des eaux de source commercialisées dans la ville de Laghouat	21
Tableau 5.	Caractéristiques géomorphologiques des sites de captage des eaux de source	22
Tableau 6.	Classification de l'utilisation des sols de la zone d'étude et son indice de pollution.....	23
Tableau 7.	Indice globale de pression et classement des basses versants :.....	37
Tableau 8.	Les résultats de l'examen des tailles d'effet	41

Remerciements

Avant tout je donne mes grands remerciements a ALLAH Tout Puissant de m'avoir fourni de patience et courage pour achever ce travail.

Je tiens à manifester ma profonde gratitude, reconnaissance au mes encadreur, Monsieur **MAKOUDI Mourad** et Monsieur **BENCHETTOUH Ahmed** pour avoir dirigé ce travail et pour la confiance qu'il m'a témoigné. Il a été un modèle de rigueur scientifique et m'a apporté un soutien fraternel et moral considérable. Je salue sa patience, sa rigueur, son implication édifiante et surtout sa disponibilité pour ce travail.

Je remercie également l'Université Ammar Theldiji et tous les professeurs dans la spécialité sciences alimentaire.

Enfin, il m'est agréable d'exprimer mes remerciements les plus sincères aux nombreuses personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

".Avant tout, je rends grâce à **Allah** pour m'avoir permis d'atteindre cet accomplissement".

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots justes, tous les mots ne sauraient exprimer ma gratitude, mon amour, mon respect et ma reconnaissance. C'est pourquoi je dédie humblement ce modeste travail à:

A ma chère mère et mon père, qui m'a encouragé et qui est ma source de force pour aller jusqu'au bout. m'a toujours soutenu et a cru en moi. Je ne saurais jamais le remercier assez pour tout ce qu'il a fait pour moi. qui m'a donné la vie, ma élevé, mais surtout, ma aimé. Il n'y a pas assez de mots pour décrire à quel point tu es importante pour moi.

mes cher frères Moustapha , Youcef , pour avoir été mon soutien dans la vie et les études.

mes sœurs qui m'a aidé et a été à mes côtés tout au long de ce travail et qui m'ont soutenue dans mon cheminement académique, je lui suis très reconnaissant.

À ma jumelle spirituelle et compagne, qui m'a aidé et a été à mes côtés tout au long de ce travail.

A tous ceux que ma plume a oublié mais que mon cœur n'a pas oublié.

Table des matières

N°	Titre	P
	Resume	i
	Abstract	ii
	ملخص	iii
	Liste des figures :	iv
	Liste des tableaux :	v
	Liste des abréviations :	vi
	Remerciements :	
	Dédicaces :	
	 Introduction	 01
 CHAPITRE I : Revue bibliographique		
1.1-	Introduction.....	04
1.2-	Définition de l'eau.....	05
1.3-	Structure de l'eau	05
1.4-	Importance de l'eau de consommation et spécificité des eaux de source	06
1.4.1-	Rôle de l'eau dans la santé humaine et les enjeux mondiaux de la qualité de l'eau.....	06
1.4.2-	Classification des eaux destinées à la consommation.....	06
1.4.2.1-	Eau du robinet.....	06
1.4.2.2-	Eaux embouteillées.....	07
1.3.2.3-	Définition et caractéristiques des eaux de source embouteillées.....	08
1.4.4-	Évolution de la consommation en Algérie et dans le monde.....	10
1.4.4.1-	Dans le monde.....	10
1.4.4.2-	En Algérie.....	10
1.5-	Qualité physico-chimique des eaux de source embouteillées.....	11
1.5.1-	Normes de potabilité d'eau.....	11
1.5.2-	Importance des paramètres physicochimiques dans l'eau embouteillée....	12
1.5.2.1-	La Température.....	12
1.5.2.2-	pH et Résidus secs.....	13
1.5.2.3-	Éléments minéraux de l'eau de source.....	13
1.5.2.4-	Les sels minéraux.....	13
1.5.2.5-	Les éléments indicateurs d'une pollution.....	14
1.4.3-	Indices de qualité de l'eau appliqués aux eaux de consommation.....	15
1.6-	Apports des outils géo spatiaux dans l'évaluation de la qualité des eaux..	15
1.6.1-	Les Systèmes d'Information Géographique (SIG).....	15
1.6.2-	Principes des SIG dans l'évaluation environnementale.....	16
1.6.2.1-	Collecte de données spatiales.....	16
1.6.2.2-	Analyse spatiale.....	16
1.6.2.3-	Cartographie thématique.....	16
1.6.2.4-	Modélisation prédictive.....	16

1.6.3-	Applications des SIG dans la cartographie environnementale.....	16
1.6.3.1-	Détection des zones critiques.....	16
1.6.3.2-	Suivi temporel.....	17
1.6.3.3-	Gestion intégrée.....	17
1.7-	Conclusion.....	17

CHAPITRE II : Matériel et Méthodes

2.1-	Objectif de l'étude.....	19
2.2-	Matériels.....	19
2.2.1-	Présentation de la région d'étude.....	19
2.2.2-	Données utilisées.....	21
2.2.3-	Outils d'aide utilisés.....	23
2.3-	Méthodologie.....	23
2.3.1-	Jeu d'étiquettes pour l'eau de source vendue à Laghouat.....	23
2.3.2-	Analyse de l'occupation du sol et du calcul de l'indice de pollution des bassins versants à partir des images Sentinel-2.....	24
2.3.2.1-	Acquisition et traitement de l'image Sentinel-2.....	24
2.3.2.2-	Délimitation des zones d'étude (mask par bassin versant).....	24
2.3.2.3-	Classification de l'occupation des sols.....	25
2.3.2.4-	Conversion du raster en Shape file.....	25
2.3.2.5-	Calcul des superficies et des pourcentages d'occupation du sol.....	25
2.3.2.6-	Attribution d'un indice de pollution à chaque type d'occupation du sol...	25
2.3.2.7-	Calcul de l'Indice Global de Pression (IGP) du bassin versant.....	25
2.3.3-	Analyses statistique	26

CHAPITRE III : Résultats et discussion

3.1-	Résultats	27
3.1.1-	Comparaison entre les valeurs des paramètres des eaux de source et les normes de l'OMS et NA	27
3.1.2-	L'évaluation de l'indice globale de pression (IGP)	30
3.1.3-	Cartographie synthétique des disparités régionales de qualité et de risques potentiels.....	39
3.1.4-	Taux de vente des marques des eaux de sources commercialisées dans la ville de Laghouat.....	40
3.1.4.1-	Tests post-hoc (Test de Tukey HSD).....	40
3.1.4.2-	Examen des "Tailles d'Effet"	41
3.1.4.3-	Comparaisons "Post-Hoc" Descriptives	42
3.2-	Discussion	42
3.2.1-	Conformité des eaux embouteillées avec les normes OMS et algériennes	42
3.2.2-	Dureté de l'eau et minéralisation élevée	43
3.2.3-	Nitrates	43
3.2.4-	Pressions anthropiques sur les bassins versants	43
3.2.5-	Comportement des consommateurs et perception de la qualité	44

4- Conclusion et perspectives	45
5- Références bibliographiques	47

INTRODUCTION

Introduction

L'eau est une ressource vitale pour les êtres vivants, et sa qualité constitue un enjeu sanitaire, environnemental et socio-économique de première importance (UNESCO, 2023). L'eau destinée à la consommation humaine doit répondre à des exigences strictes pour garantir la santé publique (Gomes et al., 2024). L'eau de source embouteillée, captée à partir de formations souterraines naturellement protégées, est souvent perçue comme une alternative sûre à l'eau du robinet, en raison de sa stabilité chimique et de l'absence de traitement chimique lourd (Bear et al., 2024).

En Algérie, pays marqué par un climat majoritairement aride à semi-aride et par des difficultés d'accès à une eau de distribution de qualité constante, l'eau de source embouteillée s'est imposée comme une solution largement adoptée par les consommateurs (Khamkhoum, 2024). Les Algériens, ces dernières décennies, consomment de plus en plus d'eau embouteillée. En 2008, la consommation moyenne était de 55,3 litres par habitant, elle est passée à 57,4 litres en 2011, pour dépasser aujourd'hui les 63 litres. Cette hausse s'explique par l'ouverture progressive du marché, la diversité croissante des marques disponibles, mais aussi par l'évolution des habitudes de consommation (Labadi & Hammache, 2016).

Toutefois, cette croissance rapide du marché soulève des préoccupations quant à la régularité et la conformité des eaux embouteillées. Des écarts notables ont été relevés dans les concentrations de plusieurs paramètres physico-chimiques – tels que le pH, les nitrates, les résidus secs, ou encore les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^-) – entre différentes marques ou régions, suscitant des doutes sur la fiabilité des informations affichées sur les étiquettes et sur la conformité des produits aux normes de potabilité.

Peu de travaux ont utilisé les outils spatiaux tel que les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection pour analyser spatialement la qualité physicochimique de l'eau de source en Algérie. Bien que leur importance en tant qu'outil

INTRODUCTION

efficace dans ce domaine, compte tenu de l'augmentation des activités agricoles et de la pression urbaine entraînant une dégradation importante des ressources en eau dans un contexte du changement climatique et de son impact accéléré sur la qualité de l'eau, il est devenu intéressant d'utiliser ces outils pour l'évaluation spatiotemporelle de la qualité de ces eaux.

Problématique

Malgré l'expansion du marché des eaux de source embouteillées en Algérie, les connaissances disponibles sur leur qualité physico-chimique restent fragmentées, souvent limitées à des enquêtes ponctuelles ou à des études locales difficilement extrapolables. Cette situation rend difficile une évaluation globale, rigoureuse et actualisée de la qualité de ces eaux à l'échelle nationale. De plus, la variabilité observée dans la composition chimique soulève des questions sur la conformité des produits disponibles avec les normes sanitaires en vigueur, notamment en lien avec leur origine géographique et le contexte environnemental local.

Objectif général

Réévaluer la qualité physico-chimique de quelques paramètres clés des eaux de source embouteillées commercialisées à la ville de Laghouat et analyser spatialement l'indice de pollution en lien avec l'utilisation des sols des zones de captage, à l'aide d'outils géospatiaux et cartographiques.

Objectifs spécifiques

☞ Collecter et analyser les données physicochimiques disponibles sur les étiquettes d'eaux de source embouteillées (pH, NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , résidus secs).

☞ Comparer les valeurs observées aux normes nationales et internationales (OMS) de potabilité.

INTRODUCTION

☞ Localiser géographiquement les points de captage des eaux de sources et les associer à leurs bassins versants.

☞ Estimer l'indice global de pression basé sur l'utilisation du sol et analyser ses relations avec la qualité chimique des eaux.

☞ Produire une cartographie synthétique des disparités régionales de qualité et de risques potentiels.

☞ Mener un inventaire sur le taux de vente de des 'eaux de source embouteillée dans les magasins locaux afin de déterminer l'importance de la demande de consommation pour chaque marque vendue localement.

Pour ce faire, notre travail est structuré en plusieurs sections bien hiérarchisées : une introduction présentant le contexte et les objectifs de l'étude, suivie d'une revue bibliographique mettant en lumière les recherches antérieures sur le sujet. La section Matériel et méthodes décrit les sites d'étude, les échantillons analysés ainsi que les protocoles expérimentaux utilisés. Les résultats obtenus sont ensuite présentés et discutés de manière détaillée afin d'en dégager les principales interprétations. Enfin, une conclusion synthétise les principaux enseignements de l'étude et propose quelques perspectives de recherche.

1.1. Introduction

L'eau, ressource vitale et stratégique, occupe une place centrale dans les enjeux de santé publique et de développement durable. Sa qualité, notamment lorsqu'elle est destinée à la consommation humaine, fait l'objet d'une attention croissante de la part des institutions internationales, des gouvernements, des chercheurs et des citoyens (WHO, 2017). Dans ce contexte, les eaux de source embouteillées représentent une alternative de plus en plus plébiscitée, notamment dans les régions où l'eau du robinet est perçue comme peu fiable ou de qualité variable.

En Algérie, pays marqué par un climat majoritairement aride à semi-aride, la consommation d'eau embouteillée a connu une croissance rapide au cours des dernières décennies (Benblidia, 2016). Cette tendance traduit un changement significatif dans les habitudes de consommation, mais elle soulève également des questions relatives à la qualité réelle de ces eaux, leur conformité aux normes nationales et internationales, ainsi qu'à la transparence des informations fournies au consommateur. La diversité des marques, la disparité géographique des sources et le manque de contrôle systématique rendent nécessaire une évaluation scientifique rigoureuse (Ketrouci et al., 2023).

Ce chapitre vise à fournir un cadre conceptuel, normatif et méthodologique solide pour appréhender la qualité physico-chimique des eaux de source embouteillées. Il [s'ouvre par une présentation générale](#) du rôle de l'eau dans la santé humaine et des caractéristiques spécifiques des eaux de source embouteillées, avant de détailler les paramètres physico-chimiques utilisés dans leur évaluation. Une attention particulière est ensuite portée aux indices de qualité de l'eau, outils synthétiques de plus en plus utilisés dans le monde pour juger de la potabilité des eaux.

La revue se focalise ensuite sur le contexte algérien, en soulignant l'évolution du secteur des eaux embouteillées, les études scientifiques existantes, et les limites identifiées en termes de couverture géographique et de méthodologie. Enfin, elle introduit les outils géospatiaux, en particulier les systèmes d'information géographique (SIG), comme

méthode innovante pour représenter, comparer et interpréter les données relatives à la qualité de l'eau à l'échelle nationale.

L'ensemble de cette revue bibliographique permet ainsi de positionner la présente étude dans le paysage scientifique actuel, de justifier son originalité et d'en définir les fondements théoriques et méthodologiques.

1.2. Définition de l'eau

D'après le dictionnaire Larousse, l'eau est un corps liquide à la température et à la pression ordinaires, incolore, inodore, insipide, dont les molécules sont composées d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/eau/27777>). Du latin aqua, devenu au 11^{ème} siècle egua et ewe, au 21^{ème} siècle aive, aigue, eve, puis eaue (8^{ème} siècle) dont le final a disparu au 16^{ème} siècle. En français, aqua se retrouve en composition, comme préfixe : aqu, aqui. L'eau est essentielle aux organismes vivants à la fois pour ses caractéristiques mécaniques et ses propriétés chimiques (<https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/eau/45222>).

Du point de vue chimique, l'eau, dissout la majorité des sels solides et facilite ainsi les réactions chimiques, l'organisme humain bénéficie de ses propriétés pour le bon fonctionnement de son métabolisme. L'eau est en effet un solvant essentiel, parfois, qualifié de solvant universel (Bernard, 2007).

1.3. Structure de l'eau

L'eau est un corps dont l'unité de base est une molécule, notée H₂O, formée d'un atome d'oxygène relié à deux atomes d'hydrogène par des liaisons covalentes: chaque atome d'hydrogène partage ainsi avec l'atome d'oxygène une paire d'électrons. L'assemblage d'atomes obtenu est non linéaire, formant un coude dans l'assemblage de H₂O : c'est la raison de la polarité de la molécule d'eau (Souchu, 2014).

1.4.Importance de l'eau de consommation et spécificité des eaux de source embouteillées**1.4.1. Rôle de l'eau dans la santé humaine et les enjeux mondiaux de la qualité de l'eau**

L'eau est un élément essentiel à la vie et joue un rôle central dans le maintien des fonctions biologiques de l'organisme. Jouant un rôle crucial dans la régulation de la température corporelle, le transport des nutriments et l'élimination des déchets. Une hydratation adéquate est associée à une meilleure digestion, une fonction rénale optimale et une peau (Verywell Health, 2023, 15 septembre).

Sur le plan mondial, les problèmes liés à la qualité de l'eau restent critiques. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime que des millions de personnes souffrent encore de maladies hydriques telles que le choléra et la dysenterie, principalement dans les régions où l'accès à une eau potable sûre est limité. De plus, l'Objectif de Développement Durable (ODD) n°6, qui vise à garantir l'accès à l'eau potable pour tous, demeure un défi majeur dans de nombreuses parties du monde (WHO, 2023).

1.4.2. Classification des eaux destinées à la consommation

Les eaux destinées à la consommation humaine peuvent être classées comme suit :

1.4.2.1. Eau du robinet

L'eau du robinet est une eau potable produite à partir de l'eau prélevée par un captage dans une nappe souterraine (puits, forages, sources) ou dans une ressource superficielle (rivières, lacs, barrages, ruisseaux).

Elle est distribuée directement chez le consommateur. Selon la qualité de l'eau prélevée, après divers traitements, elle est maintenue potable grâce à l'ajout de chlore qui rend l'eau potable. La qualité de l'eau du robinet est très règlementée et soumise à de nombreux contrôles sanitaires. Sa consommation est donc sûre (ARSA 2015).

1.4.2.2. Eaux embouteillées

Il existe une très grande diversité de qualités d’eaux qui sont commercialisées en bouteille. Cependant, sur le plan réglementaire, il n’en existe que deux catégories. Les eaux de source font partie de cette catégorie. Il s’agit d’eau de source présentant une efficacité thérapeutique reconnue par l’Académie Nationale de Médecine (Chocat, B.,et all 2015).

Les eaux de source (ES)

Une eau d’origine exclusivement souterraine, apte à la consommation humaine microbiologiquement saine et protégée contre les risques de pollution, sans traitement ni adjonction autres que ceux autorisés pour cette eau Journal officiel de la République Algérienne (2016).

Elle répond aux mêmes exigences de qualité physicochimique et radiologique que l’eau de robinet. Les seules traitements autorisés par la réglementation (séparation des constituants naturellement présents, la désinfection de l’eau est interdite) (OMS, 2015).

L’eau de source se distingue de l’eau minérale naturelle par le fait qu’elle doit être conforme à la norme de l’eau potable, qu’elle n’a pas d’obligation d’avoir une composition minérale constante et caractéristique, et qu’elle ne prétend pas avoir d’effet bénéfique pour la santé (CREGG, 2020).

Les eaux minérales naturelles (EMN)

Les eaux minérales naturelles sont des eaux à l’état naturel d’origine souterraine, microbiologiquement saines.

Tableau 1 : Comparaison entre différents types d’eaux

L’eau	Eau de robinet	Eau de source	Eau minérale naturelle
Origine	Lacs, rivières, nappes phréatiques, forage ...etc.	Souterraine	Souterraine
Protection naturelle	/	Obligatoire	Obligatoire
Traitements chimiques	Traitements de potabilisation (plus désinfection chimique pour transport)	Aucun traitement de potabilisation	Aucun traitement de potabilisation
Composition minérale	Variable	Pas nécessairement Stable	Obligatoirement stable

Effet reconnu
sur la santé

/

/

Effet favorable à la santé,
reconnu par l'Académie de
médecine.

Source: (CSEM, 2008)

Elles se distinguent nettement des autres eaux destinées à la consommation humaine par leurs natures caractérisées par la pureté, et par la teneur spécifique en sels minéraux, oligoéléments ou autres constituants, et ces compositions physicochimiques stables (Tableau 1). Ces caractéristiques sont appréciées sur les plans géologique, hydrogéologique, physique, chimique, physicochimique, microbiologique et pharmacologique (Encyclopédie de l'environnement, 2021). Ces eaux minérales naturelles constituent un cas particulier car leurs qualités thérapeutiques favorables à la santé humaine ont été reconnues par l'Académie nationale de médecine; qui sont autorisées concernant la teneur parfois élevée en sels minéraux (Chocat et al., 2015).

1.4.2.3. Définition et caractéristiques des eaux de source embouteillées

C'est une eau d'origine exclusivement souterraine apte à la consommation humaine microbiologiquement saine et protégée contre les risques de pollution (Anonyme., 2012). Issues de nappes d'eaux souterraines non polluées, profondes ou protégées des rejets dus aux activités humaines, les eaux dites de source sont des eaux naturellement propres à la consommation humaine (CNRS., 2017).

L'eau de source est une eau naturelle qui ne subit pas de traitement. Sa composition physico-chimique n'est pas constante, elle peut provenir de sources différentes et elle est soumise à des normes de potabilité (Schoeller, 1974).

Les caractéristiques des eaux de source embouteillées varient en fonction de leur origine géographique, des formations géologiques qu'elles traversent, et des traitements qu'elles subissent avant la mise en bouteille (tableau 2).

❖ Par une origine souterraine (être également constituée à l'abri de tout risque de pollution en plus du caractère souterraine). Microbiologiquement saine dès l'origine, elle n'est perturbée par aucune contamination d'origine humaine car elle est protégée

❖ par les couches géologiques environnantes. La principale caractéristique de l'eau minérale naturelle réside dans sa pureté originelle qui est une exigence de la réglementation.

❖ Par une stabilité de leur composition minérale, les eaux minérales naturelles ont une composition physico-chimique stable qui peut leur permettre de se voir reconnaître des propriétés bénéfiques à la santé humaine.

❖ Par leur pureté originelle : elles ne peuvent pas contenir de composés d'origine anthropique (liées aux activités de l'homme).

❖ Par le fait qu'elles ne subissent aucun traitement chimique de désinfection, d'addition de produits chimiques : les seuls traitements qu'il est permis de leur appliquer afin d'éliminer les éléments instables que sont les gaz, le fer et le manganèse sont l'aération, la décantation et la filtration.

❖ Par leurs qualités thérapeutiques.

❖ Par le fait que leur exploitation et leur conditionnement nécessitent des autorisations administratives spécifiques (Oumou, 2012).

Tableau 2. Caractéristiques des eaux de source embouteillées

Paramètre	Unité	Valeur typique	Norme OMS	Remarques
Température	°C	8 – 20	-	Affecte le goût et la solubilité de l'O ₂
Ph	-	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	Mesure de l'acidité/alcalinité
CE	µS/cm	200 – 1000	< 2500	Reflète la minéralisation totale
Résidu sec à 180 °C	mg/L	100 – 1500	-	Teneur en sels minéraux
TH	°F ou mg/L CaCO ₃	10 – 50 °F (100 – 500 mg/L)	-	Dépend du Ca ²⁺ et Mg ²⁺
Ca ²⁺	mg/L	20 – 100	Pas de norme précise	Essentiel pour les os
Mg ²⁺	mg/L	5 – 50	Pas de norme précise	Essentiel pour les muscles
Na ⁺	mg/L	5 – 150	< 200	À surveiller pour les régimes hyposodés
K ⁺	mg/L	1 – 10	-	Généralement faible
HCO ₃ ⁻	mg/L	50 – 400	-	Liés à l'alcalinité
Cl ⁻	mg/L	5 – 250	< 250	Donne un goût salé à forte concentration

SO ₄ ²⁻	mg/L	10 – 250	< 250	Peut avoir un effet laxatif à haute dose
NO ₃ ⁻	mg/L	< 5 – 50	< 50	Toxique à forte dose, surtout pour nourrissons
NO ₂ ⁻	mg/L	< 0.1	< 0.1	Très toxique
Fe	mg/L	< 0.3	< 0.3	Peut causer coloration et goût métallique
F ⁻	mg/L	0.1 – 1.5	< 1.5	Bénéfique en petite quantité
Coliformes totaux	UFC/100 mL	Absents	Absents	Indicateur de contamination
E. coli	UFC/100 mL	Absents	Absents	Indique contamination fécale

Source : Bouzidi et al. (2020)

1.4.4. Évolution de la consommation en Algérie et dans le monde

1.4.4.1. Dans le monde

Le marché de l'eau en bouteille explose dans le monde. La consommation d'eau plate embouteillée est passée de 9 litres en moyenne par personne en 1999 à environ 27 litres en 2013, soit une hausse de 200 % en 14 ans. Les Etats-Unis, qui ne représentent que 5 % de la population mondiale, constituent le deuxième consommateur d'eau douce (1053 milliards de m³ par an), après la Chine qui est un pays beaucoup plus peuplé (1207 milliards de m³). Le taux de consommation en Afrique est de 22 litres par personne et par an. Ce taux s'élève à 116 litres en Europe de l'Est et à 102 litres aux États-Unis. L'Italie se place en premier avec 176 litres/habitant/an suivie par la Germany avec une consommation de 172 litre/habitant/an et en troisième place le Portugal avec 128 litre/habitant/an (Pimp My Bottle, 2021).

1.4.4.2 En Algérie

Dans les années 90, la consommation d'eau embouteillée en Algérie, ne dépassait pas les 20 litres/habitant/an. Une étude a été élaborée par l'Association des Producteurs Algériens de Boissons (APAB) sur la consommation des eaux embouteillées en 2012. Le niveau de consommation en Algérie a été estimé à 55,3 litres par habitant dans l'année 2008 et à 57,4 litres par habitant dans l'année 2011, la consommation devrait atteindre 63 litres/an/habitant pour l'année 2014, marquant ainsi un progrès considérable par rapport à

la dernière décennie. La raison qui a généré ce développement de la filière des eaux embouteillées, c'est l'évolution des habitudes de consommation des Algériens durant cette dernière décennie. Le niveau de vie et la culture de consommation d'eau minérale connaissent des progrès importants (APAB, 2012).

1.5. Qualité physico-chimique des eaux de source embouteillées

1.5.1. Normes de potabilité d'eau

L'eau doit répondre à des normes pré- établies qui fixent les concentrations « seuil » à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances dangereuses et pouvant y être présentes. Cependant, bien qu'une eau potable soit conforme aux normes, cela ne signifie pas pour autant qu'elle soit indemne de ces substances, mais que leur teneur est assez faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur.

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) publie, régulièrement, des Directives de qualité pour l'eau de boisson, dont de nombreux pays s'inspirent pour élaborer leurs propres normes nationales. Ces Directives représentent une appréciation scientifique des risques sanitaires associés aux substances biologiques et chimiques de l'eau de boisson et de l'efficacité des mesures déployées pour y remédier.

L'OMS recommande aux autorités nationales de prendre en considération les aspects sociaux, économiques et environnementaux en procédant à une évaluation comparative des risques et des avantages lorsqu'ils adaptent ces Directives aux Normes nationales (OMS, 2017) (tableau 3).

Tableau 3. Normes OMS vs Algérie (NA 6361–2016)

Paramètre	Unité	OMS (2017)	Algérie NA 6361–2016
pH	-	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
Résidus secs (TS)	mg/L	< 1000	≤ 1200
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/L	≤ 250 (goût)	≤ 250
Chlorures (Cl ⁻)	mg/L	≤ 250 (goût)	≤ 250
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/L	50 – 500*	100 – 500
Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/L	≤ 50	≤ 50
Nitrites (NO ₂ ⁻)	mg/L	≤ 0.2	≤ 0.2

Calcium (Ca ²⁺)	mg/L	≤ 200*	≤ 200
Magnésium (Mg ²⁺)	mg/L	≤ 50*	≤ 50
Sodium (Na ⁺)	mg/L	≤ 200	≤ 200
Potassium (K ⁺)	mg/L	< 12*	< 12

Note : Certains paramètres marqués d'un astérisque () n'ont pas de "valeur guide sanitaire" stricte de l'OMS, mais des seuils indicatifs recommandés pour des raisons gustatives, techniques ou de confort.*

Remarques supplémentaires

Les normes algériennes sont globalement alignées sur les recommandations OMS, parfois un peu plus tolérantes (ex. résidus secs ≤ 1200 mg/L vs OMS < 1000 mg/L).

Certaines valeurs (comme K⁺) sont non contraignantes selon l'OMS mais incluses dans la norme algérienne pour raison de contrôle qualité.

Le pH est identique dans les deux normes, essentiel pour la potabilité et la corrosion des canalisations

1.5.2. Importance des paramètres physicochimiques dans l'eau embouteillée

Les paramètres physicochimiques tels que le SO₄²⁻, le Cl, le HCO₃, le NO₂, le Ca²⁺, le Na⁺, le K⁺, le pH et les résidus secs ont un impact significatif sur la santé humaine par le biais de divers mécanismes. Ces paramètres peuvent influencer la qualité de l'eau, qui est cruciale pour prévenir les maladies d'origine hydrique et d'autres problèmes de santé.

1.5.2.1. La Température

La température d'une eau joue un rôle déterminant dans la modification des propriétés physiques et chimiques de l'eau. Elle influence, en effet, les réactions biologiques qui se produisent dans l'eau. Elle a une grande influence sur un certain nombre de contaminants chimiques et de constituants inorganiques susceptibles d'avoir des effets sur le goût de l'eau. À température élevée, le développement des micro-organismes est favorisé et les problèmes de goût, de couleur et d'odeur peuvent augmenter (Santé Canada, 2003).

1.5.2.2. pH et Résidus secs***Niveaux de pH***

L'eau à faible pH peut provoquer la corrosion des tuyaux, entraînant la lixiviation des métaux lourds, ce qui présente des risques pour la santé (Madan & Jain, 2022).

Résidus secs

Des niveaux élevés de résidus secs indiquent une contamination, qui peut entraîner divers problèmes de santé, notamment la toxicité due aux métaux lourds (Madan & Jain, 2022).

1.5.2.3. Éléments minéraux de l'eau de source

Il n'y a pas sur terre autant de ressources d'eau sur terre qu'on le pense directement utilisable pour le genre humain. L'eau forme 50 à 60% du poids de notre corps et joue un rôle dans tous les procédés vitaux de notre corps: il permet la digestion, l'élaboration de la nourriture et l'élimination des déchets. Chaque jour, nous buvons de l'eau ou mangeons de la nourriture aqueuse pour compléter le niveau de notre réserve métabolique.

L'eau de pluie, la neige, et la glace sont presque similaire à l'eau distillée. L'eau présente dans la nature contient, même s'ils sont à l'état de trace, des minéraux très importants pour notre santé: sels et oligoéléments dissous durant son chemin vers le sol ou son écoulement sur les cours d'eau rocheux

1.5.2.4. Les sels minéraux***Calcium (Ca^{2+})***

Le calcium est un élément très répandu dans la nature particulièrement retrouvé dans les eaux qui ont traversé des roches calcaires. Avec le magnésium, il est responsable de la dureté de l'eau (Hubert et al., 2002).

Les eaux calciques favorisent la minéralisation des os et lutte donc contre l'ostéoporose. (Thomas, 2014). Régulent l'équilibre acide-base et la coagulation sanguine. Elles peuvent jouer un rôle important dans le cadre de notre alimentation, en complément des produits laitiers (Toul et Boulenouar, 0000).

Magnésium (Mg^{2+})

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium. Son abondance géologique, sa grande solubilité et sa large utilisation industrielle (autre que la pétrochimie) font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes (Rodier et al., 1996).

Sodium (Na^+) et le Potassium (K^+)

Un déséquilibre, en particulier un taux élevé de sodium et un faible taux de potassium, peuvent exacerber les maladies cardiovasculaires (Frassetto et al. 2008).

Sulfates (SO_4^{2-})

Des taux élevés de cet élément peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux et une déshydratation (Ruma et al., 2014).

Bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates affecte l'équilibre acido-basique, de faibles niveaux peuvent entrainer une acidose métabolique (Frassetto et al. 2008).

Chlorures (Cl^-)

Un excès de chlorure peut contribuer à l'hypertension et à des problèmes cardiovasculaires, en particulier chez les populations qui suivent un régime riche en sodium (Frassetto et al. 2008).

1.5.2.5. Les éléments indicateurs d'une pollution***Nitrites NO_2^-***

Les ions des nitrites sont associés à un risque accru d'hypertension lorsqu'ils sont dérivés d'additifs alimentaires (Srour et al., 2022).

les indicateurs de la pollution. Elles proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammonium soit d'une réduction des nitrates (OMS, 2017).

Nitrates NO³

Les nitrates du fait de leur transformation en nitrites (NO₂) peuvent entraîner un certain nombre de conséquences : associés à l'hémoglobine, ils sont responsables de méthémoglobinémie ; associés aux amines (Hubert et al., 2002).

1.5.3- Indices de qualité de l'eau appliqués aux eaux de consommation

L'indice de qualité de l'eau IQE est considéré comme la méthode la plus efficace pour mesurer la qualité de l'eau. Un certain nombre de paramètres de qualité de l'eau sont inclus dans une équation mathématique pour évaluer la qualité de l'eau, en déterminant la pertinence de l'eau pour la consommation (Akter et al., 2016). Cet indice a été utilisé pour la première fois pour mettre en évidence les changements physico-chimiques susceptibles de se produire au cours de l'année et leur impact sur la qualité de l'eau d'alimentation (House et al., 1987 ; House, 1990).

L'IQE est facile et simple à utiliser ; ça dépend de la pesée des paramètres de l'eau, chacun selon leur importance, laissent l'utilisateur choisit les paramètres de qualité de l'eau incorporés dans processus (Iticescu et al., 2019).

Le IQE est calculé en utilisant l'équation suivante (Zotou et al., 2019) :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Ou :

n: nombre de paramètres analyses;

W_i: poids relatif attribue au paramètre i (selon son importance sur la qualité de l'eau);

Q_i: Score de qualité ou valeur normalisée du paramètre i base sur les valeurs mesurées et les normes (OMS, EPA, etc.).

1.6- Apports des outils géo spatiaux dans l'évaluation de la qualité des eaux

1.6.1- Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Les SIG sont des outils capables de rassembler des données provenant de diverses sources,

de gérer, d'analyser et de modéliser les données environnementales. L'analyse de ces données par des requêtes informatiques (attributaires ou spatiales) permet de présenter des informations localisées sous forme de cartographiques indispensables à la compréhension du projet dans son environnement. Enfin, grâce aux informations qu'il fournit, l'outil de géomatique permet de proposer des variantes et faciliter ainsi la prise de décisions par le Maître d'ouvrage. <https://core.ac.uk/download/pdf/236414948.pdf>

1.6.2- Principes des SIG dans l'évaluation environnementale

1.6.2.1- Collecte de données spatiales

Les SIG permettent d'intégrer des données géo référencées, telles que les relevés topographiques, les images satellites et les mesures sur le terrain.

1.6.2.2- Analyse spatiale

Les outils SIG offrent des fonctionnalités pour analyser les relations spatiales entre différents paramètres, tels que :

La distribution des contaminants dans les bassins versants.

Les interactions entre les activités humaines et la qualité des eaux.

1.6.2.3- Cartographie thématique

Les SIG facilitent la création de cartes thématiques, comme :

Les cartes de pollution des eaux (nitrates, phosphates, métaux lourds).

Les cartes de vulnérabilité des nappes phréatiques.

1.6.2.4- Modélisation prédictive

Les SIG intègrent des modèles mathématiques pour prédire l'évolution de la qualité de l'eau sous l'effet des pressions anthropiques et naturelles (Longley et Goodchild et al .2015).

1.6.3- Applications des SIG dans la cartographie environnementale

1.6.3.1- Détection des zones critiques

Identifier les zones où la qualité de l'eau est particulièrement dégradée.

1.6.3.2- Suivi temporel

Analyser l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux grâce à des séries chronologiques.

1.6.3.3- Gestion intégrée

Optimiser la gestion des ressources hydriques en tenant compte des facteurs spatiaux et environnementaux (Burrough et al .1998).

1.7- Conclusion

Cette revue de la littérature a permis de dresser un état des connaissances autour de la qualité physico-chimique des eaux de source embouteillées, en s'appuyant sur les normes de potabilité, les paramètres analytiques couramment utilisés, les indices de qualité de l'eau (IQE), ainsi que les méthodes modernes de traitement et de représentation des données, notamment les systèmes d'information géographique (SIG).

Il en ressort que les études internationales ont largement démontré la pertinence d'évaluer la qualité de l'eau à l'aide d'une combinaison d'analyses physico-chimiques et d'indices intégrateurs, tout en insistant sur l'importance de la spatialisation des résultats pour mieux orienter les décisions sanitaires et environnementales. Cependant, dans le contexte algérien, les recherches menées sur la qualité des eaux embouteillées restent parcellaires, localisées et souvent limitées à des comparaisons descriptives, sans réelle intégration à l'échelle nationale. Très peu d'études adoptent une approche croisée combinant données analytiques normalisées, traitement spatial et interprétation synthétique via des indices comme le WQI.

Face à ces lacunes, notre étude se propose d'apporter une contribution originale et méthodologiquement intégrée en évaluant la qualité des eaux de source embouteillées disponibles sur le marché algérien selon une triple approche complémentaire :

une analyse physico-chimique normative des principaux paramètres indicateurs de potabilité, le calcul d'un indice de qualité de l'eau (IQE) permettant une interprétation

synthétique et normalisée des résultats, et enfin, une représentation spatiale par SIG offrant une visualisation claire des disparités régionales et des éventuels risques liés à la consommation de certaines eaux.

Cette approche vise à pallier l'insuffisance actuelle de données intégrées, à renforcer la transparence dans le secteur de l'eau embouteillée et à fournir aux décideurs comme aux consommateurs des outils fiables d'aide à la décision.

Matériel et méthodes

2.1- Objectif de l'étude

Cette étude a pour objectif de réévaluer la qualité physicochimique de certains paramètres des eaux de source embouteillées distribuées dans la ville de Laghouat, en les croisant avec une analyse spatiale de l'indice de pollution associé à l'occupation des sols dans les bassins versants d'alimentation. Elle vise également à évaluer la préférence des consommateurs pour les différentes marques disponibles, à travers un questionnaire mené auprès de 29 points de vente (magasins et supérettes) commercialisant ces eaux.

2.2- Matériel

2.2.1- Présentation de la région d'étude

La présente étude porte sur l'analyse de la qualité des eaux de source issues de 17 bassins versants répartis dans différentes régions d'Algérie. Elles se localisent entre 34°00'N et 37°00'N de latitude nord, et entre 2°00'E et 8°00'E de longitude est, couvrant plusieurs zones du nord de l'Algérie (figure 1).

La zone d'étude présente une diversité notable sur les plans géographique, climatique et hydrologique. Les bassins versants étudiés abritent un ensemble de sources naturelles utilisées pour l'embouteillage de l'eau minérale ou de source, telles que Ain Bouglez, Aninos, Ariaf, Atlas, Ayris, Aures, Besbassa, Crista, El Ghadir, Fezguia, etc. Ces sources, bien que soumises à des conditions climatiques variées, partagent un rôle commun en tant que ressource vitale pour la consommation humaine en croissance. Leur altitude moyenne varie entre 350 m (bassin du Mefragh) et 1900 m (bassin de Biraz Atrous), traduisant une grande hétérogénéité topographique. Cette diversité altitudinale influence directement les paramètres climatiques, notamment la température, les précipitations et l'évapotranspiration.

Sur le plan pluviométrique, la majorité des bassins, notamment ceux de Soummam, Sahel Aval, Agrioûn, Sahel Amont et Rhummel Amont, reçoivent des précipitations supérieures à 600 mm/an, ce qui est favorable à l'alimentation des nappes et à la stabilité hydrique des sources. À l'inverse, certains bassins situés dans des zones plus arides, tels que Tadmit, Djelda Hadjia, El Abiod et Biraz Atrous, enregistrent des précipitations inférieures à 400 mm/an, avec une évapotranspiration plus marquée (jusqu'à 5 mm/jour pour Djedi Biskra).

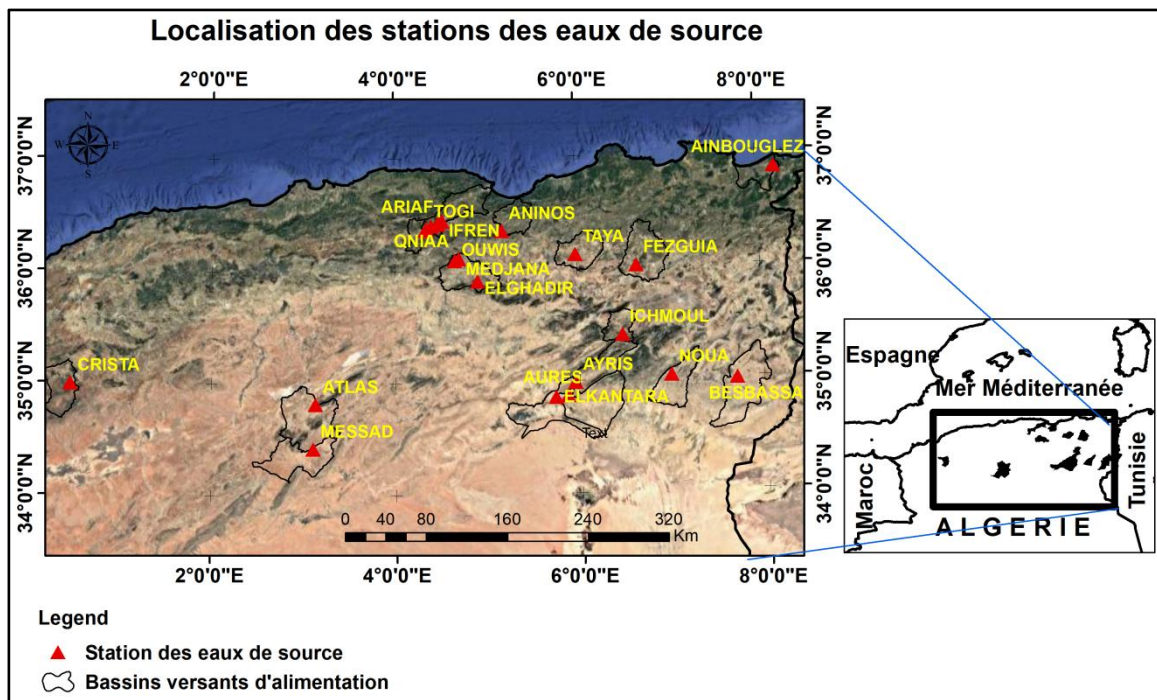


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

La température moyenne annuelle se situe généralement entre 15 °C et 17 °C, avec quelques variations selon l'altitude. Par exemple, les bassins de Biraz Atrous et El Abiod, à plus haute altitude, présentent des températures légèrement plus fraîches que les zones plus basses comme Mefragh.

L'évapotranspiration, facteur influençant fortement la disponibilité en eau, varie de moins de 2 mm/jour dans les zones humides (Soummam, Sahel Aval, etc.) à plus de 5 mm/jour dans les régions semi-arides ou arides, comme celle de Djedi Biskra.

2.2.2-Donnees utilisées

Les données utilisées dans cette étude comprennent :

a) Vingt-trois étiquettes de bouteilles d'eau de source ont été analysées afin d'extraire les caractéristiques physico-chimiques déclarées par les producteurs (tableau 4).

Tableau 4, Qualité physicochimique de certains paramètres des eaux de source commercialisées dans la ville de Laghouat

N	Eau de source	Mise en production	Concentration des anions					Concentration des cations				pH	Résidus secs
			SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		
1	AinBouglez	NS	10	30	NA	0,06	9	4,6	3,75	29	1	6,87	140
2	Aninos	2015	20	12,76	262,30	0,01	9,61	42,08	25,51	7	1	7,4	160
3	Ariaf	2019	163,12	197,97	202,1	0	6,17	94,4	32,07	96,3	1,5	7,25	750
4	Atlas	2024	85	31	NS	0,01	6,19	92	17	20	3	7,1	511
5	Ayris	2006	75	37	234,24	0,01	2,7	65,6	6,8	28,5	1,9	7,7	276
6	Aures	NS-	348	86	224	0,01	1,08	100	59	71	3	7,44	770
7	Besbassa	2013	4	10	164,7	0,01	9	54,16	2,64	5	2	7,29	206
8	Crista	2015	19	32	342	0,01	27	70	35	19	1,5	7,3	439
9	El ghadir	2015	106	37	317	0	25	111	28	25	3	7,5	700
10	El kantra	2014	162	59	247	0,01	9,6	90	37	36	3	7,32	636
11	Fezguia	2012	28	30	305	0	19	85,69	13,44	31	1	7,46	412
12	Ichmoul	2017	72	15	226	0,01	11	86	13	10	0,7	7,18	368
13	Ifren	2007	49,14	56,8	229,4	0,01	2,91	65,6	20,41	25	2	7,46	362
14	Medjana	2016	211	47	458	0,01	1,8	136	42	62	2	7,12	953
15	Messad	2017	156	40	275	0,01	2,3	79	27	50	2	7,13	611
16	Djurdjura	2007	56	97	357	0,01	30	103	28	54	1	7,67	700
17	Noua	NS	82	36	265	0,01	25,41	84	28	23	0,9	7,1	441
18	Ouwis	2015	177	48,59	261	0,01	18,3	106	25	60	2	7,42	724
19	Ovitale	2006	75	50	214	0	5,1	80	14	30	1	6,92	360
20	Qniaa	2007	66,66	92,12	259,2	0,01	12,39	111,66	26,97	48,22	2,48	7,24	602
21	Taya	2018	82	110	NS	0,01	17,37	47,25	12,48	55	1	7,3	400
22	Togi	2006	28,90	43,76	NS	0,01	5,93	73,41	19,25	36	1,8	7,46	366
23	Hirouche	2016	54	62,2	262,80	0,01	32,8	107,40	18,20	22,20	1,6	7,20	550,8

Source : Les étiquettes des eaux de source commercialisées dans la ville de Laghouat

b) La localisation géographique des eaux de source a été déterminée avec précision afin d'identifier les points de captage. Ces sources sont réparties dans dix-sept bassins versants,

intégrant les stations de production, qui ont été pris en compte dans l’analyse spatiale (Tableau 5). Les limites des bassins versants ont été obtenues à partir de la base de données *HydroBASINS*, accessible via le site : <https://www.hydrosheds.org/>

Tableau 5, Caractéristiques géomorphologiques des sites de captage des eaux de source

N	Eau de source	Coordonnées géographiques		Bassin versant d'alimentation	Centroïde du bassin versant		Altitude moy. (m)
		X (dd)	Y (dd)		X (dd)	Y (dd)	
1	Ain Bouglez	8,21°	36,85°	O.MAFRAGH	8,03°	36,78°	350
2	Aninos	5,20°	36,35°	O.AGRIOUN	5,32°	36,46°	1000
3	Ariaf	4,47°	36,41°	O.SAHEL AVAL	4,43°	36,41°	1025
4	Atlas	3,10°	34,81°	O.DJELFA HADJIA	3,05°	34,69°	1200
5	Ayris	5,95°	34,00°	O.EL ABIOD	6,22°	35,12°	1250
6	Aures	5,87°	34,87°	O.BIRAZ ATROUS	6,16°	34,80°	1900
7	Besbassa	7,71°	34,99°	O,MECHRA	7,76°	34,90°	925
8	Crista	0,47°	34,99°	O.TARIA	0,34°	34,96°	875
9	El Ghadir	4,91°	35,90°	O.K'SOB	4,8°	35,96°	1225
10	El Kantra	5,74°	34,86°	O.DJEDI BISKRA	5,64°	34,72°	625
11	Fezguia	6,65°	36,01°	O.MERZOUG	6,74°	36,11°	1075
12	Ichmoul	6,48°	35,40°	O,CHEMORAH	6,45°	35,47°	1600
13	Ifren	4,53°	36,44°	O.SAHEL AVAL	4,43°	36,41°	1025
14	Medjana	4,71°	36,10°	O.K'SOB	4,8°	35,96°	1225
15	Messad	3,11°	34,42°	O.TADMIT	2,94°	34,34°	1200
16	Djurdjura	4,34°	36,36°	O.SAHEL AMONT	4,23°	36,33°	1200
17	Noua	7,00°	36,03°	O.DERRADJ	7,03°	34,96°	975
18	Ouwis	4,66°	36,09°	O.K'SOB	4,8°	35,96°	1225
19	Ovitale	4,53°	36,44°	O,SOUMMAM	4,78°	36,60°	825
20	Qniaa	4,48°	36,42°	O.SAHEL AVAL	4,43°	36,41°	1025
21	Taya	5,99°	36,12°	O.RHUMEL AMONT	6,03°	36,15°	975
22	Togi	4,35°	36,37°	O.SAHEL AVAL	4,43°	36,41°	1025
23	Hirouche	4,41°	36,40°	O.SAHEL AVAL	4,43°	36,41°	1025

Sources: Google earth et HydroBASINS

c) Une série d’images satellites Sentinel-2, acquises en mars 2024, a été utilisée pour la cartographie de l’occupation du sol. Ces images ont été téléchargées en format Geotiff depuis le site web <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer>, consulté le 27 avril 2025. Sept types d’occupation du sol ont été utilisés pour estimer l’indice de pollution et évaluer l’impact des usages du sol sur la qualité de l’eau de source (tableau 6).

Tableau 6. Classification de l'utilisation des sols de la zone d'étude et son indice de pollution

Utilisation des sols	Classification	Indice de pollution	Références
Activite agricoles	L'utilisation d'engrais et de pesticides, entraînent un ruissellement important et une eutrophisation des plans d'eau	1	Pericherla & Vara (2023)
Surfaces bâties	Les zones urbaines contribuent largement à la pollution de l'eau par le ruissellement contenant divers polluants, notamment des métaux lourds et des éléments nutritif	0,8	Chen et al. (2020)
Sol nu	Le sol exposé peut entraîner une sédimentation et un ruissellement de nutriments, en particulier lors de pluies	0,6	Kowalska et al. (2018)
Pâturage	Les prairies/paturage ont généralement un impact modéré, agissant comme des zones tampons mais restent sensibles au ruissellement des terres agricoles adjacentes	0,4	Yang et al, 2020
Maquis et matorral	Les zones arbustives contribuent peu à la pollution, offrant certains avantages en termes de filtration	0,3	Tufan Çetin (2019)
Forets	Les zones boisées sont associées à une amélioration de la qualité de l'eau en raison de leur capacité à filtrer les polluants	0,2	Sun et al. (2016)
Plan d'eau	Les lacs eux-mêmes sont souvent affectés par l'utilisation des terres environnantes mais ne sont pas des sources directes de pollution	0,1	Syeed et al. (2023)

2.2.3- Outils d'aide utilises

Plusieurs outils ont été mobilisés afin de soutenir les différentes étapes de l'étude : ArcGIS Map pour l'analyse spatiale et la cartographie des données, Google Earth Pro pour la localisation et la visualisation des sites sur imagerie satellite, et le logiciel R pour le traitement statistique, l'analyse exploratoire et la modélisation des données.

2.3- Méthodologie

2.3.1- Jeu d'étiquettes pour l'eau de source vendue à Laghouat

Dans le cadre de cette étude, une collecte rigoureuse des étiquettes de bouteilles d'eaux de source a été effectuée afin de réévaluer la qualité physico-chimique des eaux à partir des

données fournies par les producteurs. Vingt-trois étiquettes ont été collectées, mettant en évidence les concentrations de plusieurs paramètres essentiels, notamment les anions (sulfates SO_4^{2-} , chlorures Cl^- , bicarbonates HCO_3^- , nitrites NO_2^- et nitrates NO_3^-) ainsi que les cations (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+). Le pH et les résidus secs à 180 °C, indicateurs de la minéralisation totale, ont également été pris en compte (tableau 4),

2.3.2- Analyse de l'occupation du sol et du calcul de l'indice de pollution des bassins versants à partir des images Sentinel-2

L'analyse de l'occupation des sols et l'évaluation de l'indice de pollution des bassins versants ont été réalisées selon les étapes méthodologiques suivantes :

2.3.2.1- Acquisition et traitement de l'image Sentinel-2

L'image satellitaire Sentinel-2, à haute résolution spatiale (10 m), a été téléchargée depuis la plateforme *Copernicus Open Access Hub*. Elle couvre l'ensemble des bassins versants étudiés.

L'image a été introduite dans le logiciel *ArcGIS map* à l'aide de l'outil "*Add Data*". Les bandes spectrales pertinentes (p. ex. B2, B3, B4, B8) ont été sélectionnées pour le traitement de classification.

2.3.2.2- Délimitation des zones d'étude (mask par bassin versant)

Pour limiter l'analyse uniquement aux zones d'intérêt, une opération de masquage (*masking*) a été appliquée :

Les limites des bassins versants, obtenues à partir de la base *HydroBASINS*, ont été utilisées pour extraire la portion de l'image Sentinel-2 correspondant à chaque bassin. L'outil "*Extract by Mask*" a été utilisé pour isoler les pixels à l'intérieur des limites de chaque bassin.

2.3.2.3- Classification de l'occupation des sols

Une classification supervisée a été réalisée afin d'identifier les sept principaux types d'occupation du sol : terres agricoles, forêts, surface bâties, sols nus, plans d'eau, pâturage/prairies et les terrains arbustifs.

La classification a été effectuée via l'outil "digitalisation polygonale" dans ArcGIS Spatial Analyst. Le résultat obtenu est un raster classifié représentant les différentes unités d'occupation du sol.

2.3.2.4- Conversion du raster en Shape file

Afin de faciliter le calcul des superficies et des pourcentages de l'utilisation des sols, le raster classifié a été converti en entités vectorielles :

L'outil "*Raster to Polygon*" a été utilisé pour convertir le raster en Shape file vectoriel, Chaque entité (polygone) représente une classe d'occupation du sol.

2.3.2.5- Calcul des superficies et des pourcentages d'occupation du sol

Pour chaque bassin versant :

La surface (en kilomètres carrés) de chaque type d'occupation du sol a été calculée à l'aide de l'outil "*Calculate Geometry*".

Le pourcentage d'occupation de chaque classe a été ensuite déterminé par rapport à la superficie totale du bassin.

2.3.2.6- Attribution d'un indice de pollution à chaque type d'occupation du sol

Chaque classe d'occupation du sol s'est vu attribuer un indice de pollution basé sur son impact potentiel sur la qualité des eaux (tableau 6).

2.3.2.7- Calcul de l'Indice Global de Pression (IGP) du bassin versant

L'indice global de pression (IGP) est une mesure synthétique (allant de 0 à 1) permettant d'estimer le niveau de pression anthropique et environnementale exercée sur un bassin versant. Plus il est élevé, plus le risque de dégradation de la qualité de l'eau de source est

importante. Il intègre généralement plusieurs facteurs : urbanisation, agriculture, érosion, pollution, vulnérabilité du sol, etc (Plan Bleu, 2009 ; Benmansour, 2013).

Les bassins versants qui alimentent les sources d'eau naturelle présentent des usages variés, qui influencent directement ou indirectement la qualité physicochimique des eaux. Ces usages peuvent être regroupés en plusieurs catégories principales (tableau 6).

Nous calculons pour chaque bassin un Indice Global de Pression (IGP) :

$$IGP = \frac{1}{100} \times \sum (\% \text{ Occupation des sols} \times \text{Indice de pollution})$$

Le résultat donne un indice de pollution pondéré, représentatif de l'ensemble du bassin versant.

2.3.3- Analyses statistique

Pour répondre aux objectifs notre étude nous avons analyse et traite les donnes collectée a l'aide du logiciel R.

3.1- Résultats

3.1.1- Comparaison entre les valeurs des paramètres des eaux de source et les normes de l’OMS et les NA.

Les résultats de la comparaison entre les valeurs des paramètres physico-chimiques indiqués sur les étiquettes des eaux de source et les normes de l’OMS et de la réglementation algérienne (NA 1362) sont indiqués dans les figures 2 et 3.

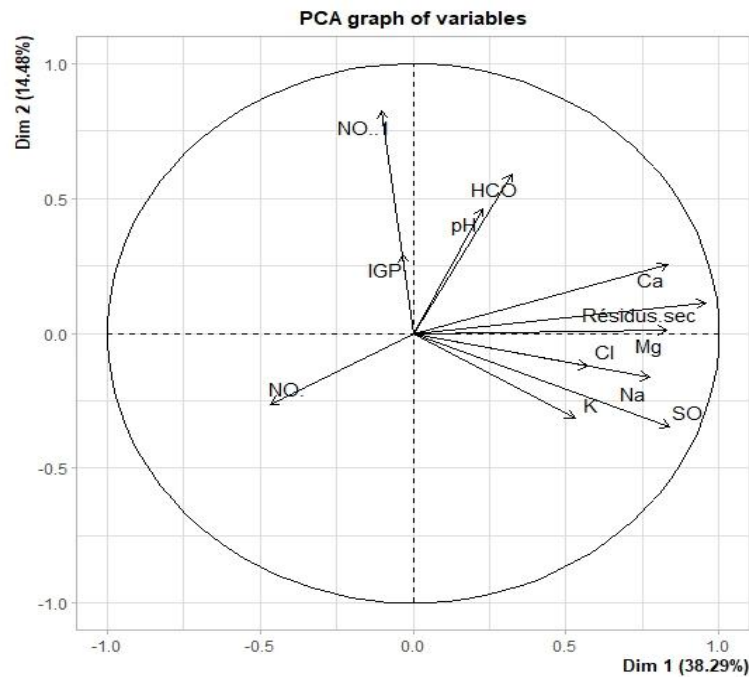


Figure 2. Cercle des corrélations de l’ACP appliquée aux paramètres physico-chimiques des eaux de source embouteillées

D’après le résultat de l’ACP dans la figure 00 et la figure 00 et ceux mentionnés dans le tableau 00 (section matériels et méthodes), on déduit que, les résultats de la comparaison détaillée des valeurs des paramètres physicochimiques indiqués sur les étiquettes de différentes marques d’eaux embouteillées vendues dans la ville de Laghouat, par rapport aux normes fixées par OMS et la norme NA 1362.

Un seul cas de dépassement des concentrations en sulfates (SO₄²⁻) a été enregistré. La source Aures, située dans le bassin versant de Biraz Atrous, présente une concentration supérieure à la limite de 250 mg/L, au-delà de laquelle apparaissent des effets gustatifs indésirables et des propriétés laxatives.

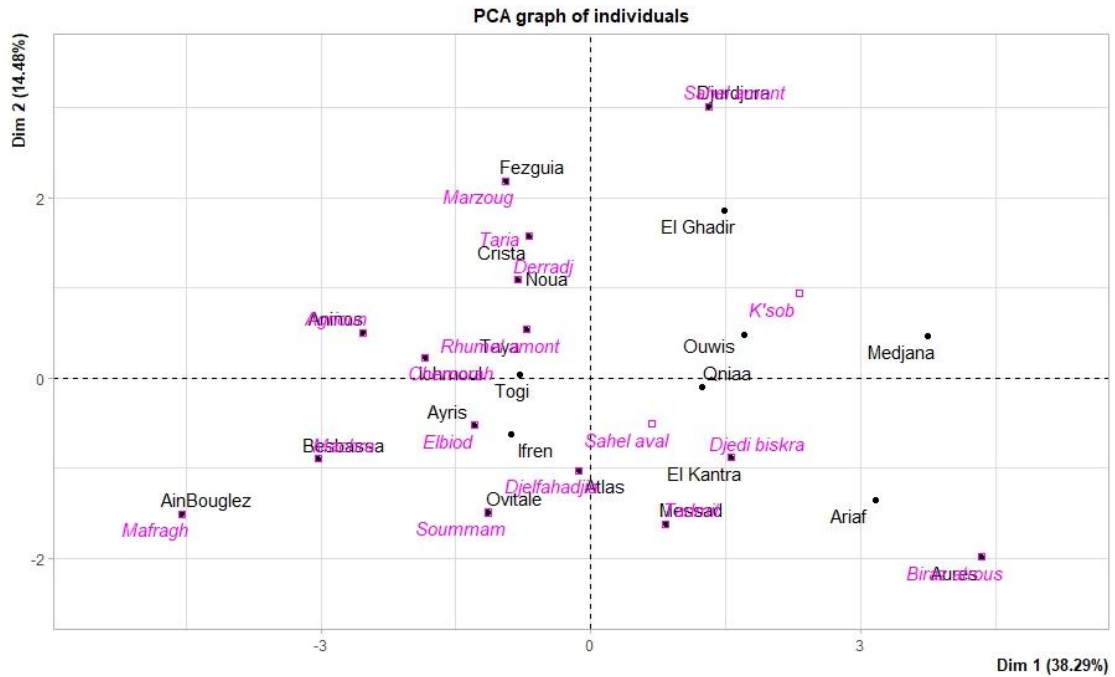


Figure 3 .Projection des eaux de source embouteillées sur le plan factoriel (ACP) selon leurs paramètres physico-chimiques

Concernant les chlorures (Cl^-), aucun dépassement officiel n'a été signalé. Néanmoins, certaines sources, comme celles d'Ariaf et de Taya, situées respectivement dans les bassins versants de Sahel aval et de Rhumel amont, enregistrent des valeurs supérieures à 100 mg/L, révélant une minéralisation acceptable.

Concernant les bicarbonates (HCO_3^-), toutes les valeurs se situent dans la fourchette autorisée de 100 à 500 mg/L. On trouve cependant des valeurs relativement élevées dans certaines sources, comme Medjana (458 mg/L) et Crista (342 mg/L), qui appartiennent respectivement aux bassins versants de K'sob et de Taria, ce qui témoigne de la source géologiquement carbonatée.

Les niveaux de nitrate (NO_3^-) sont tous inférieurs à la concentration maximale autorisée de 50 mg/L. Cependant, certaines sources signalent des concentrations supérieures à 25 mg/L, parmi les plus notables étant celles de Hirouche et de Djurdjura, qui sont situées dans les bassins versants du Sahel amont et du Sahel aval, respectivement. Ce niveau peut présenter un risque pour les nourrissons, même en cas de consommation fréquente.

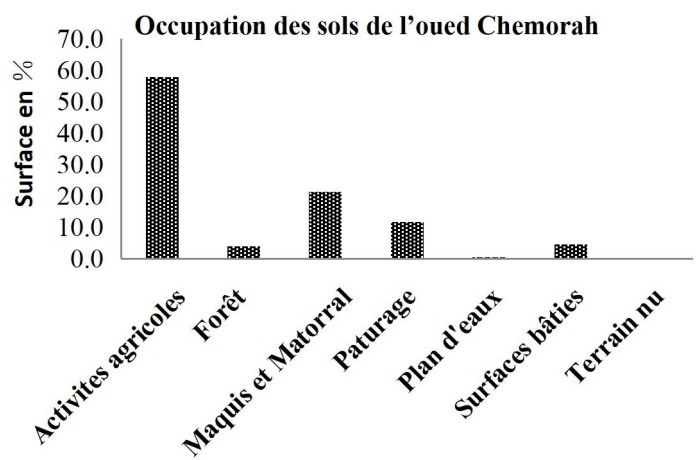
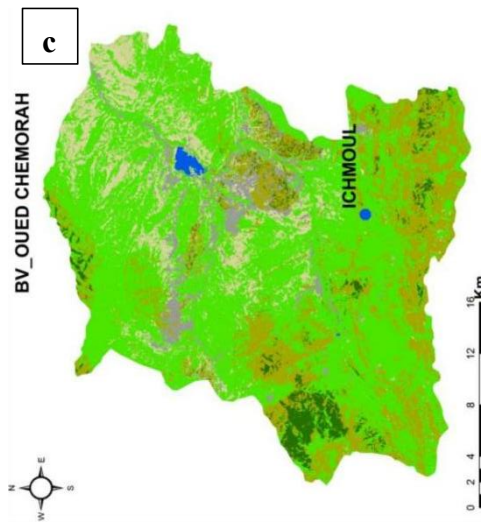
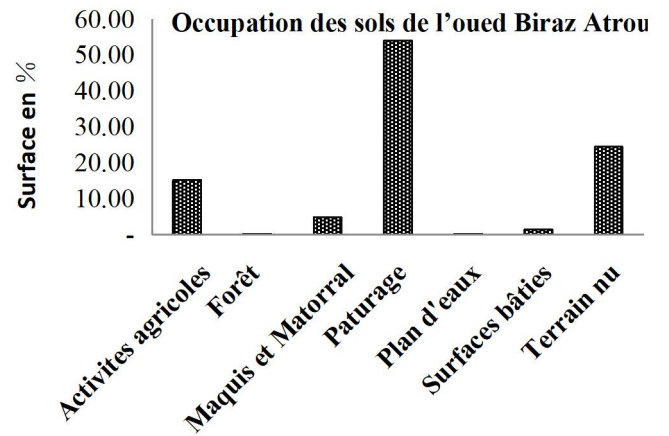
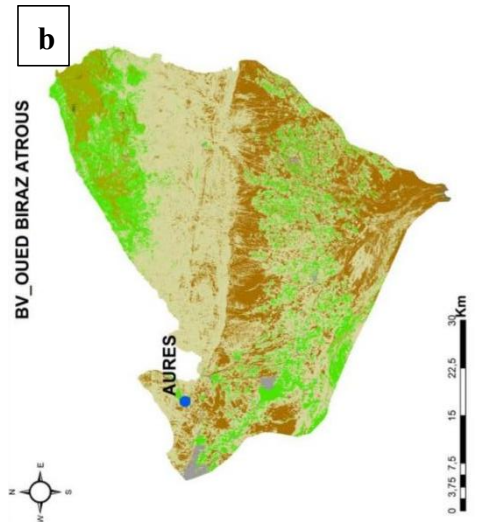
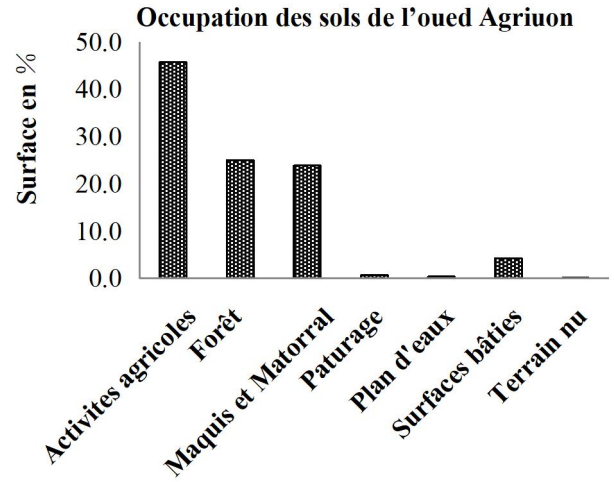
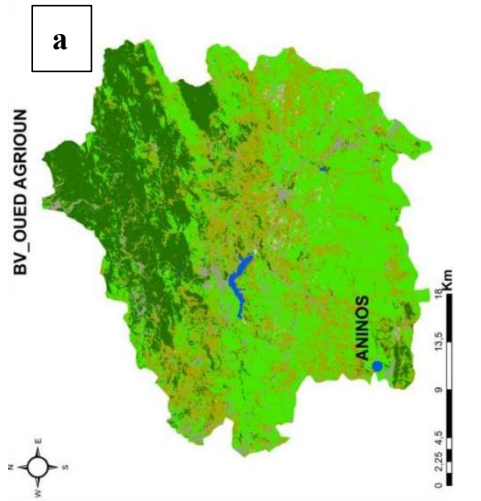
Concernant les facteurs influençant la dureté de l'eau, le magnésium (Mg^{2+}) présente un taux élevé dans l'eau de la source des Aurès (Mg^{2+} : 59 mg/L), qui fait partie du bassin versant de Biraz Atrous. Cette mesure dépasse la limite de 50 mg/L recommandée. Cette richesse minérale indique une dureté importante, susceptible de former des dépôts dans les équipements ménagers et d'altérer le goût de l'eau.

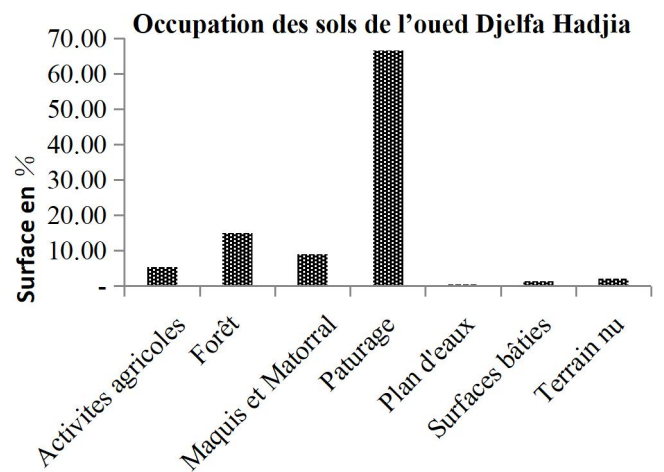
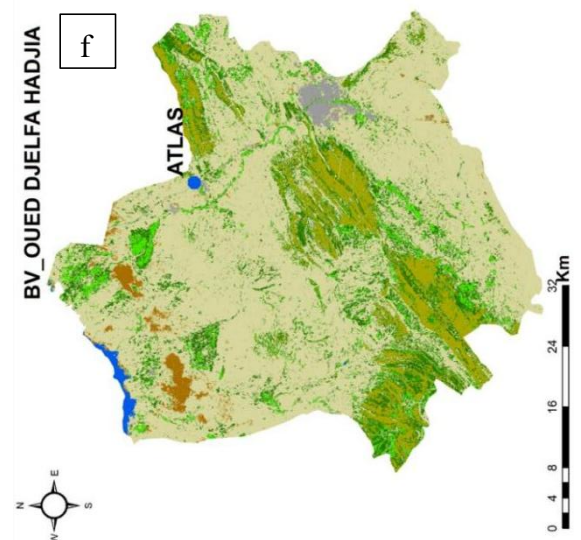
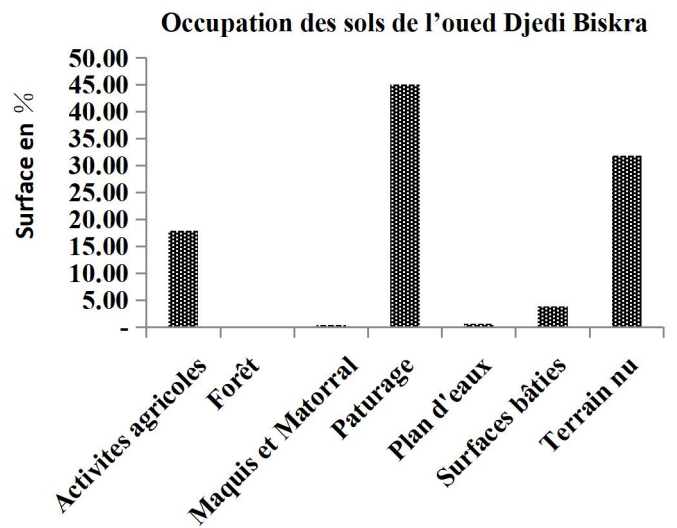
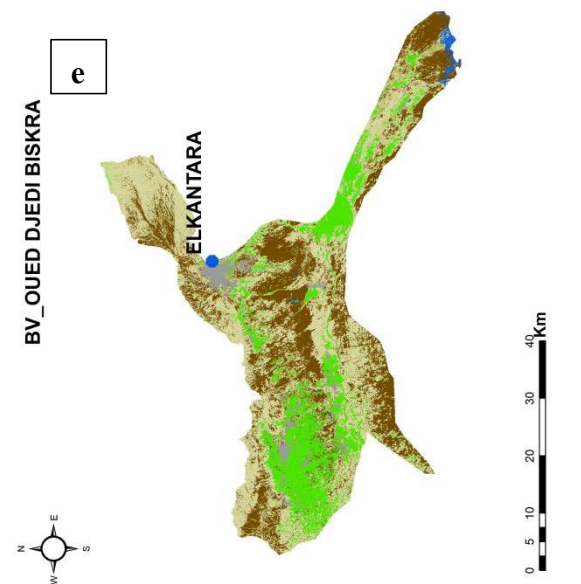
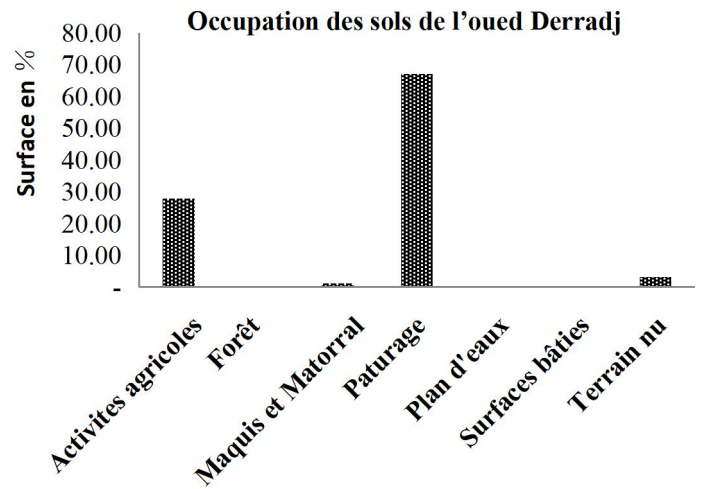
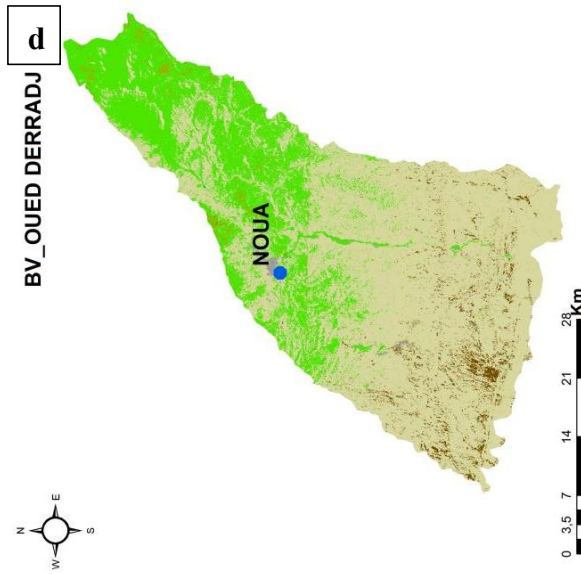
Les teneurs en sodium (Na^+) restent inférieures à 200 mg/L. Néanmoins, certaines sources présentent des teneurs relativement élevées, comme celles d'Ariaf, du Djurdjura, de Medjana, d'Ouwis et de Qniaa, situées respectivement dans les bassins versants du Sahel aval, du Sahel amont, de K'sob, de K'sob et du Sahel aval. De telles teneurs peuvent être nocives pour les personnes suivant un régime hypo sodique.

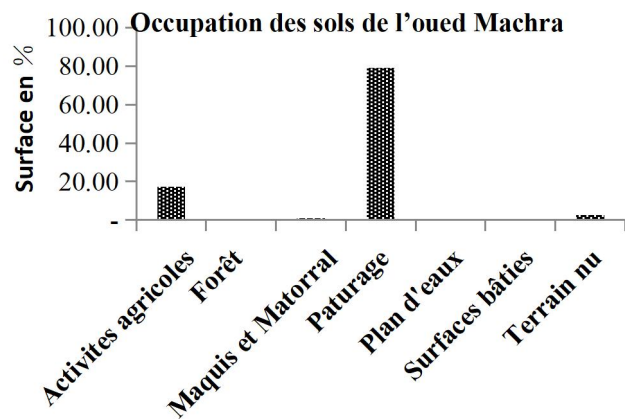
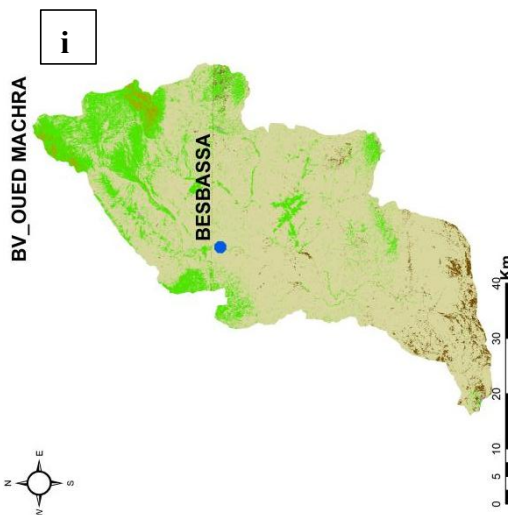
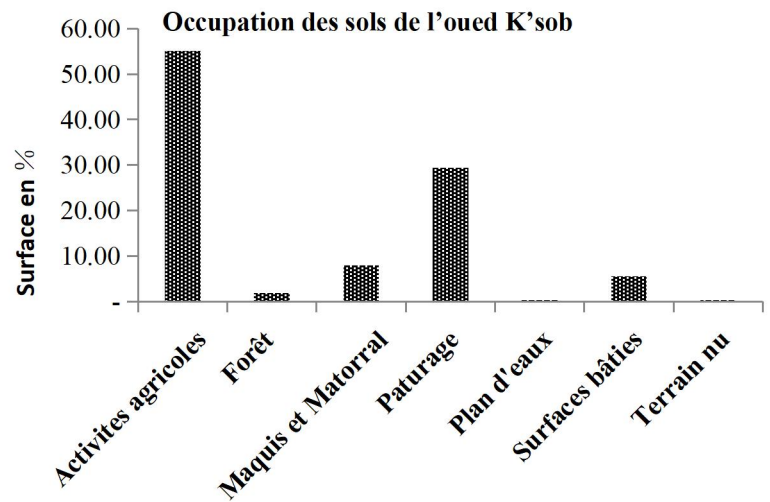
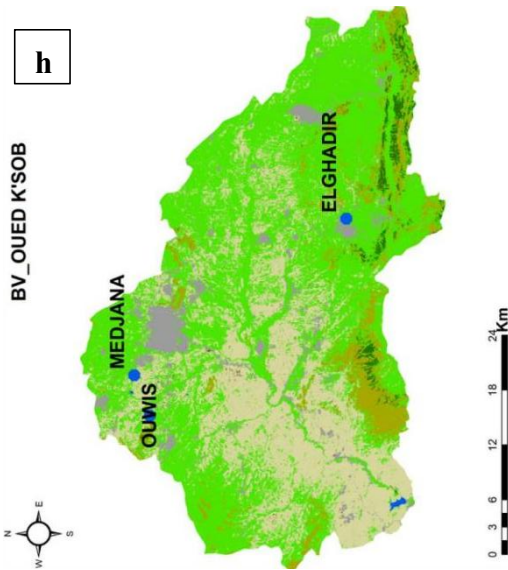
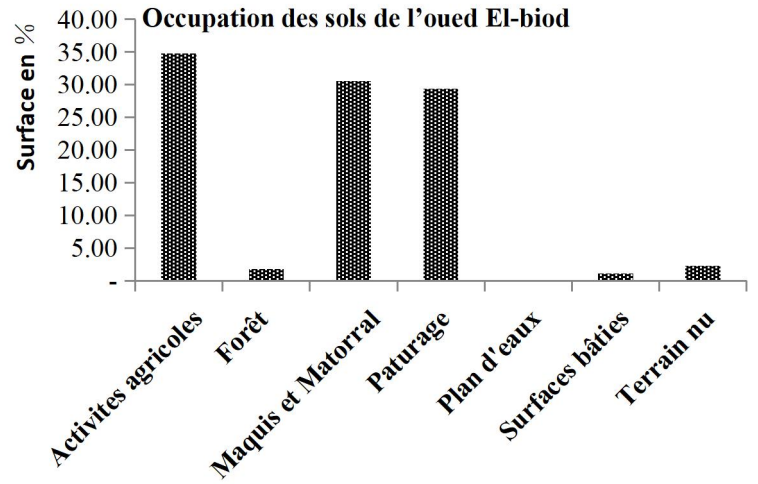
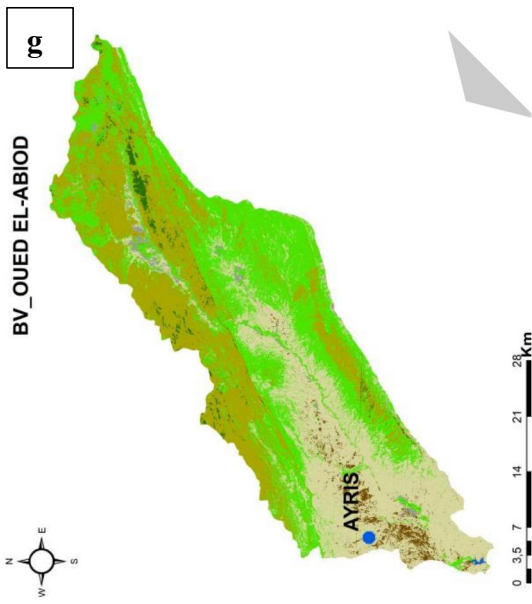
En revanche, les concentrations en potassium (K^+), le pH et les concentrations en nitrites (NO_2^-) respectent toutes les réglementations en vigueur. En résumé, bien que le résidu sec à 180 °C soit inférieur à la norme algérienne (1 200 mg/L), il dépasse les 500 mg/L dans plusieurs sources, comme on le constate dans l'eau de la source Hirouche, située dans le bassin versant du Sahel aval. Ces valeurs indiquent une forte minéralisation, classant ces eaux parmi les eaux à forte minéralisation.

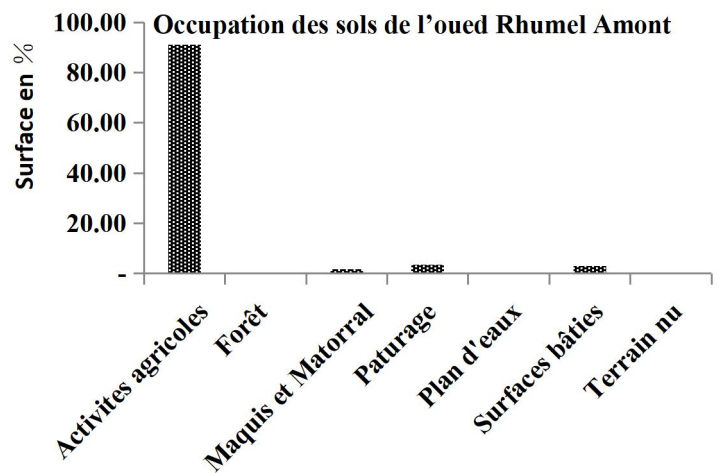
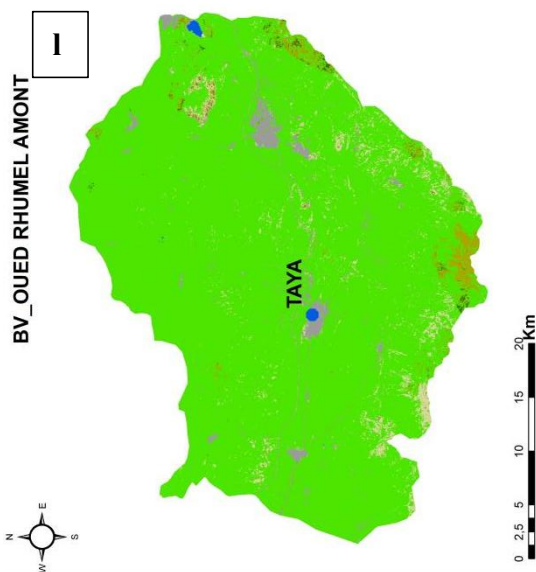
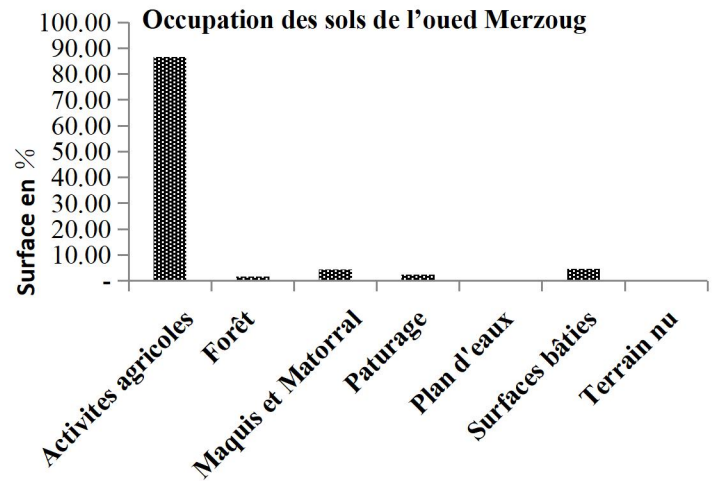
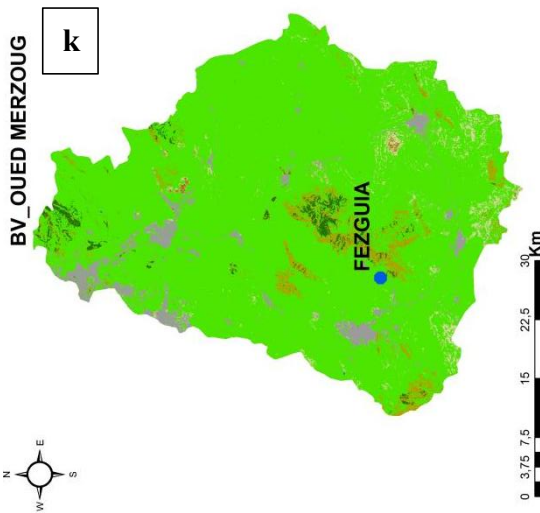
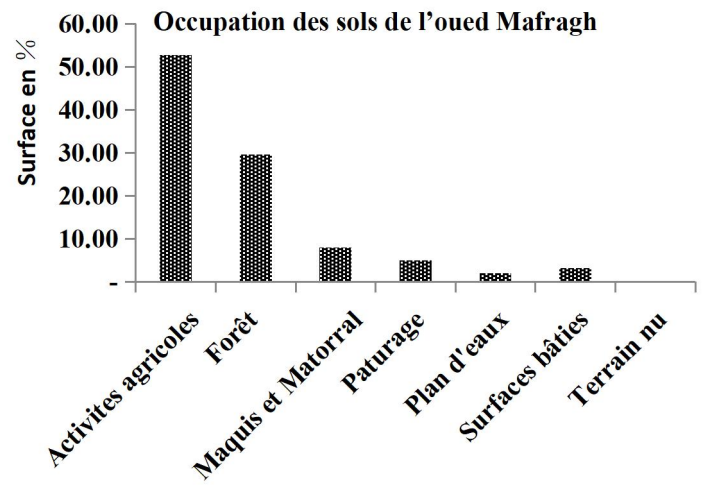
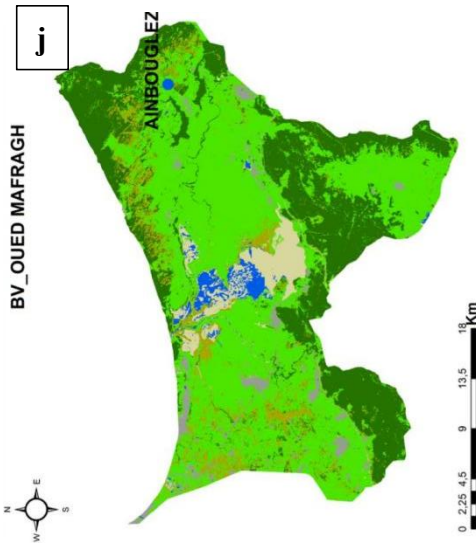
En général, la plupart des eaux embouteillées sont conformes aux normes, mais notre analyse souligne également une énorme variabilité entre les marques, ce qui souligne l'importance d'une surveillance continue et transparente de la qualité. Cela souligne également l'importance pour les consommateurs de lire attentivement les étiquettes, en particulier pour ceux qui sont sensibles comme les nourrissons, les personnes âgées ou les personnes souffrant de problèmes rénaux ou cardiaques.

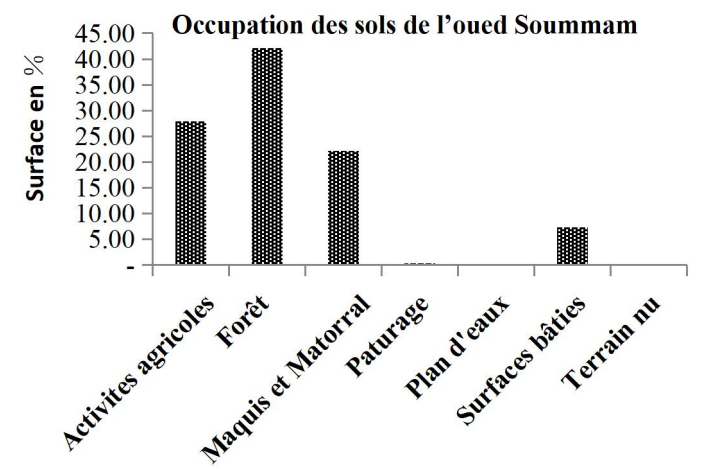
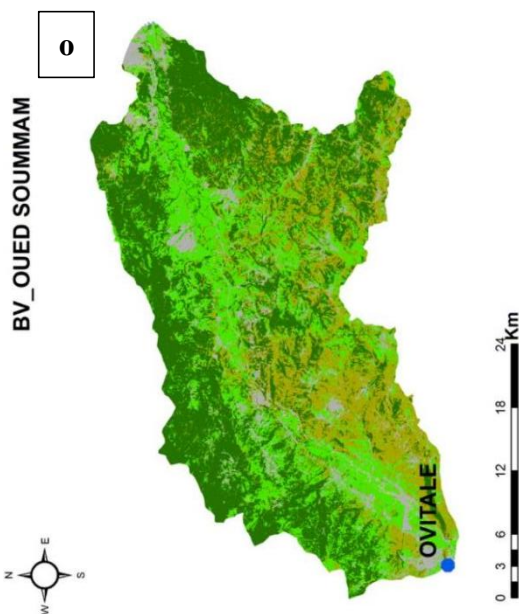
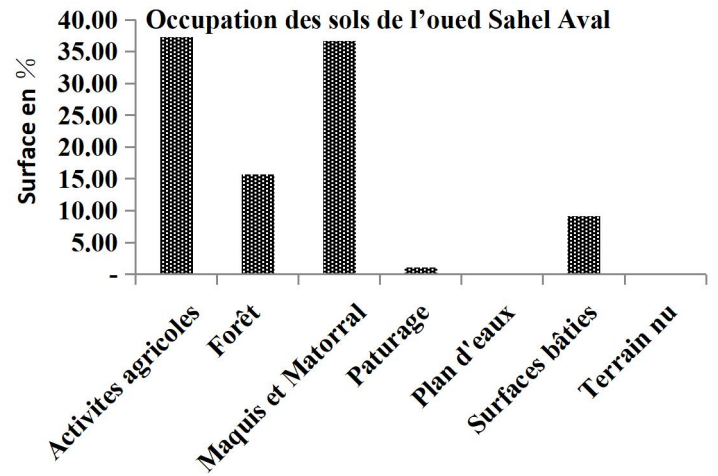
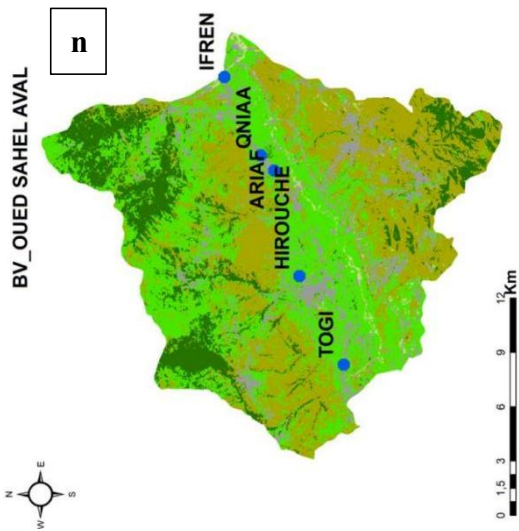
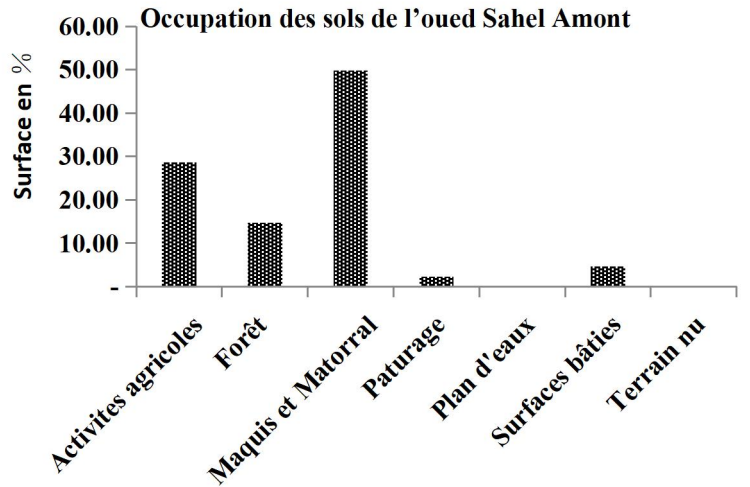
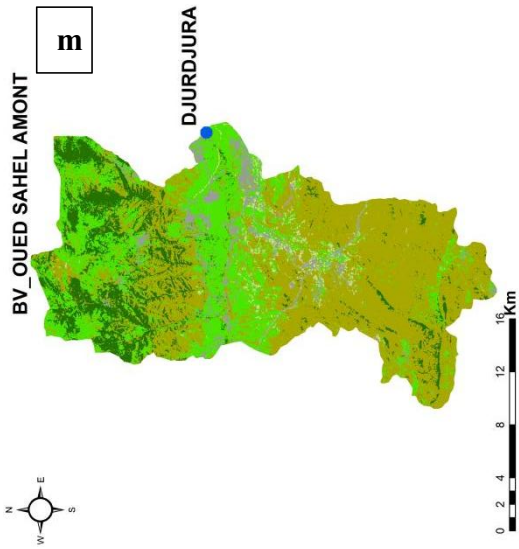
3.1.2- L'évaluation de l'indice globale de pression (IGP)











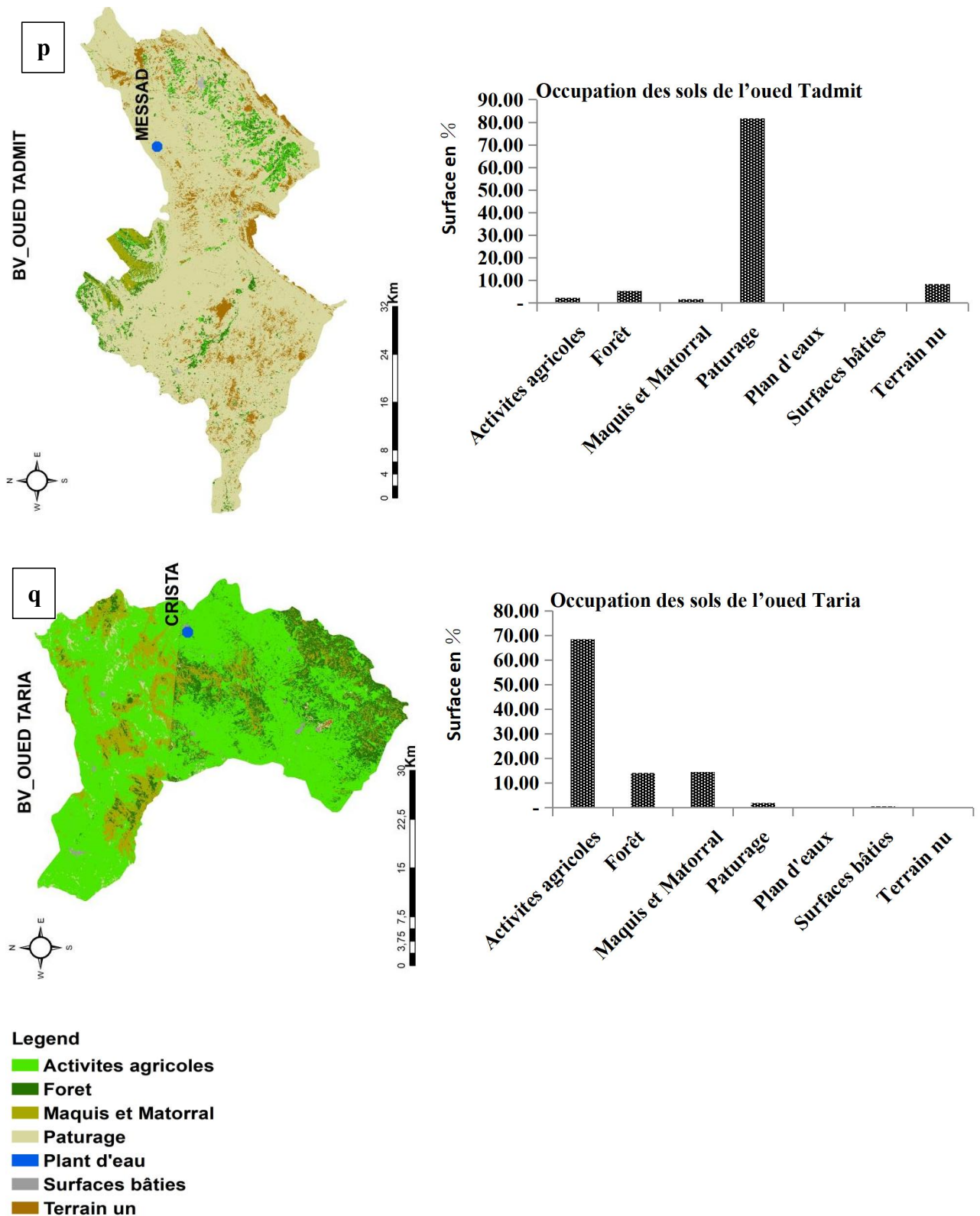


Figure 4. Classes d'occupation des sols de la zone d'étude : (a: bv_O.Agrioun; b: bv_O. Biraz Atrous; c: bv_O.Chemorah; d: bv_O.Derradj; e: bv_O.Djedi biskra ; f: bv_O. Djelfa hadjia; g: bv_O. El abiod ; h: bv_O.K'sob ; i: bv_O.Machra; j: bv_O.Mafragh; k: bv_O. Merzoug ; l: bv_O.Rhumel amont ; m: bv_O.Sahel amont ; n: bv_O.Sahel aval ; o: bv_O.soummam ; p: bv_O.Tadmit ; q: bv_O.Taria)

Tableau 7. Indice globale de pression et classement des bassins versants

Bassin versant	Eau de source	IGP	Pression estimée	Plage IGP (*)	Remarques principales
O.MARZOUG	Fezguia	0.876			
O.RHUMEL AMONT	Taya	0.852	Très forte	> 0.85	Pression critique, sources très menacées
O.AGRIOUN	Aninos	0.765			
O.CHEMORAH	Ichmoul	0.758	Forte	0.75 – 0.85	Vulnérabilité importante
O.MAFRAGH	Ain Bouglez	0.746			
O.BIRAZ ATROUS	Aures	0.719			
	Medjana,		Moyennement forte	0.70 – 0.75	Risques modérés mais à surveiller
O.K'SOB	Ouwis, El ghadir	0.698			
O.SAHEL AVAL	Hirouche, togi, Ariaif, Qniaa, Ifren	0.690			
O.DERRADJ	Noua	0.686	Moyenne	0.65 – 0.70	Situation relativement stable
O.SAHEL AMONT	Djurdjura	0.665			
O.MACHRA	Besbassa	0.625			
O.DJEDI BISKRA	El kantra	0.610			
O.DJELFA HADJIA	Atlas	0.585	Faible	0.55 – 0.65	Bonne situation environnementale
O.ELABIOD	Ayris	0.567			
O.SOUMMAM	Ovitale	0.489			
O.TADMIT	Messad	0.449	Très faible	< 0.55	Sources bien protégées, pression minimale
O.TARIA	Crista	0.425			

(*) : Cette logique de classification s’inspire des travaux de plusieurs chercheurs, notamment Wischmeier et Smith (1978), Lorz et al. (2001), ainsi que Giri et Qiu (2016)

D’après le tableau 7. on remarque que les valeurs de l’indice global de pression exercée sur les eaux de source et leurs bassins versants révèle des disparités notables selon les zones étudiées. Deux sources présentent une pression très forte (IGP > 0.85) : Fezguia (O. Marzoug, 0.876) et Taya (O. Rhumel Amont, 0.852), reflétant une pression extrême, peut-être due à l'agriculture intensive, à l'urbanisation croissante, aux activités industrielles, à la

déforestation massive ou à des phénomènes naturels causés par l'érosion hydrique. Ces zones exigent en priorité des mesures urgentes de protection et de surveillance.

Les sources à savoir; Aninos (O. Agrioun, 0.765), Ichmoul (O. Chemorah, 0.758) et Ain Bouglez (O. Mafragh, 0.746), subissent une pression forte (0.75–0.85), signalant des perturbations environnementales notables qui nécessitent une réduction des pratiques agricoles intensives et une lutte contre les apports polluants.

Les bassins versants; Aures (O. Biraz Atrous, 0.719) et Medjana-Ouwis-El Ghadir (O. K'Sob, 0.698), enregistrent une pression moyennement forte (0.70–0.75) ; la situation y est préoccupante mais encore maîtrisable grâce à des mesures préventives et une surveillance accrue.

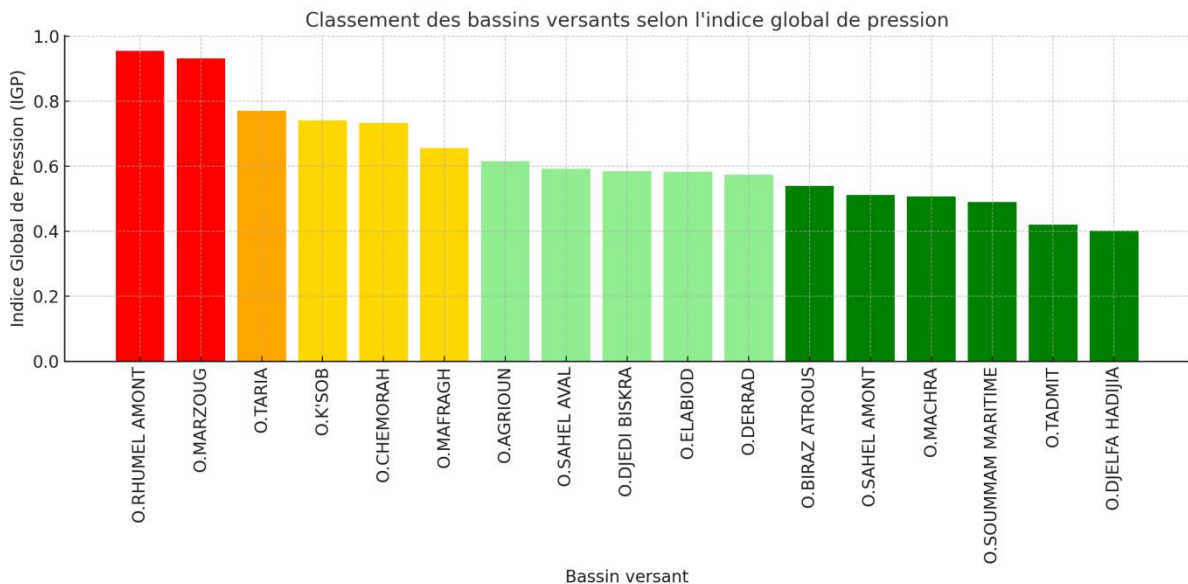
Les sources d'Hirouche, de Togi, de Ariaf, de Qniaa et d'Ifren (O. Sahel Aval, 0.690), Noua (O. Derradj, 0.686), Djurdjura (O. Sahel Amont, 0.665) et Besbassa (O. Machra, 0.625) présentent des pressions moyennes (0.65–0.70), où l'environnement reste relativement stable, bien que la qualité des eaux puisse se détériorer en l'absence d'une gestion adaptée.

Ensuite, les eaux de source d'El Kantra (O. Djedi Biskra, 0.610), d'Atlas (O. Djelfa Hadijia, 0.585) et d'Ayris (O. El Abiod, 0.567) se situent dans une situation de pression faible (0.55–0.65). Leurs bassins versants demeurent globalement préservés, mais leur équilibre reste fragile face à de potentielles pressions futures.

Enfin, les eaux de source d'Ovitale (O. Soummam, 0.489), Messad (O. Tadmit, 0.449) et Crista (O. Taria, 0.425) se caractérisent par une pression très faible (< 0.55), indiquant un excellent état de conservation des milieux, un environnement peu perturbé et une qualité d'eau probablement élevée.

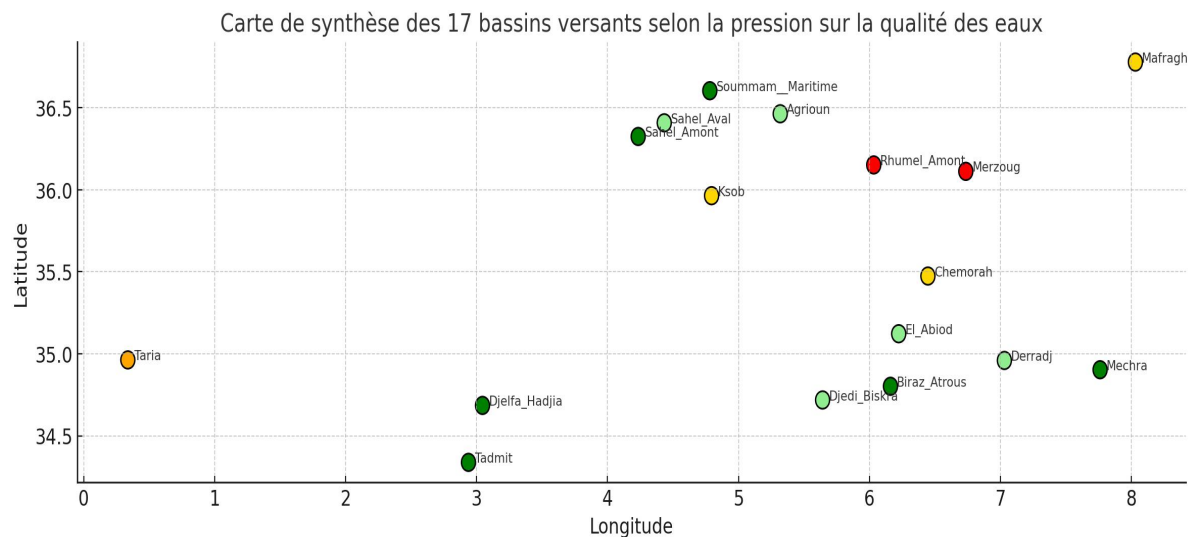
3.1.3- Cartographie synthétique des disparités régionales de qualité et de risques potentiels

Le graphique de classement des bassins versants selon leur IGP sur la qualité des eaux.



Rouge : Très forte pression; Orange : Forte pression; Jaune : Pression modérée; Vert clair : Pression faible; Vert : Pression très faible

Figure 5. Classement des bassins versants selon leur IGP



Rouge : Très forte pression (ex. : Rhumel Amont, Merzoug); Orange : Forte; pression (ex. : Taria), Jaune : Pression modérée (ex. : Chemorah, Ksob, Mafragh); Vert clair : Pression faible (ex. : Agrioun, Sahel Aval, Derradj); Vert : Pression très faible (ex. : Tadmit, Djelfa Hadjia, Soummam Maritime)

Figure 6. Carte de synthèse géographique des bassins versants, codés par couleur selon leur niveau de pression sur la qualité des eaux de sources

L'indice global de pression varie fortement de 0.425 à 0.876 selon les bassins, ce qui montre une grande variabilité spatiale de la pression anthropique sur les eaux de sources.

Les bassins dominés par l'agriculture intensive, les surfaces bâties ou les sols nus sont ceux où la qualité des eaux est le plus menacée.

En revanche, les bassins riches en forêts, maquis et matorral et pâturages bien gérés présentent une protection naturelle efficace de la ressource hydrique.

3.1.4- Taux de vente des marques des eaux de sources commercialisées dans la ville de Laghouat

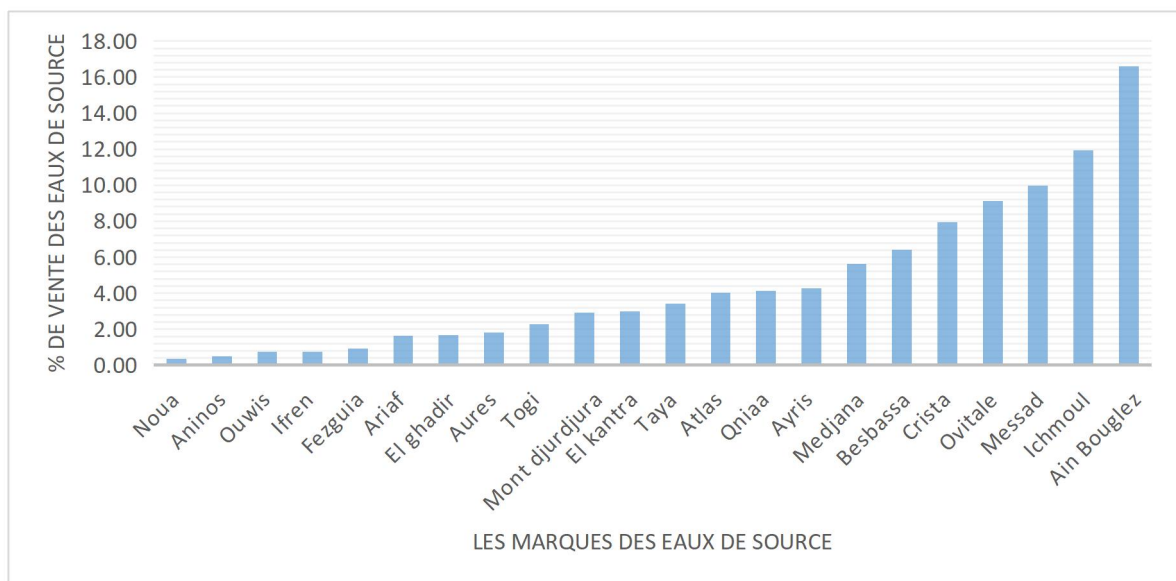


Figure 7. le taux de vente des marques des eaux de sources commercialisées dans la ville de Laghouat

D'après la figure 7, on déduit que l'analyse de variance (ANOVA) a révélé une différence statistiquement très significative dans le taux de vente des différentes marques d'eau de source embouteillée dans les magasins locaux ($p < 0.05$). Cela indique que la demande de consommation n'est pas la même pour toutes les marques et qu'il existe des variations réelles et non dues au hasard entre leurs performances de vente.

3.1.4.1- Tests post-hoc (Test de Tukey HSD)

Les résultats du test de Tukey HSD révèlent (l'annexe 1) montre que **Ain Boughlez** semble avoir des taux de vente significativement plus élevés que toutes les autres marques (Aninos, Ariaaf, Atlas, Aures, Besbassa, Cristal, El Ghadir, El Kantra, Fezguia, Ichmoul, Ifren, Medjana, Messad, Noua, Ouiws, Ovitale, Qniaa, Taya, Togi). Cela est indiqué par les différences de moyennes négatives pour Ain

Boughez lorsque comparée à ces marques, ce qui signifie que la moyenne de group2 est inférieur à celle de Ain Boughez. L’eaux de source de **Djurdjura** a des taux de vente significativement plus élevés que Aninos, Ifren, Crista, Noua et Ouwis.

Les comparaisons Aninos vs Djurdjura, Ariaaf vs Djurdjura, Crista vs Djurdjura montrent une différence de moyenne positive et significative, ce qui signifie que Djurdjura a des ventes moyennes plus élevées.

Les comparaisons Djurdjura vs Noua et Djurdjura vs Ouwis montrent une différence de moyenne négative et significative, ce qui signifie que Noua et Ouwis ont des ventes moyennes plus faibles que Djurdjura.

3.1.4.2- Examen des "Tailles d'Effet"

Tableau 8. les résultats de l’examen des tailles d’effet

Marques (Très Forte Demande >10 %)	Marques (à Forte Demande < 10 et > 5 %)	Marques (à Demande Modérée < 5 et > 3 %)	Marques (à Faible Demande < 3 %)
Ain Boughez : 16.61	Medjana : 5.64	Taya : 3.42	Noua 0.35
Ichmoul : 11.92	Besbassa : 6.41	Atlas : 4.03	Aninos 0.50
	Crista : 7.95	Qniaa : 4.13	Ouwis 0.73
	Ovitale : 9.12	Ayris : 4.26	Ifren 0.76
	Messad : 9.98		Fezguia 0.92
			Ariaaf 1.62
			El ghadir 1.66
			Aures 1.80
			Togi 2.29
			Mont djurdjura 2.91
			El kantra 2.98

D’apres le tableau 8, on remarque que les deux marques classées dans la catégorie très forte demande représentent à elles seules **28.53%** du marché, soulignant une concentration significative des ventes. Les cinq marques à forte demande capturent une part substantielle du marché, se positionnant juste derrière la categorie precedente. Les marques à demande modérée ont une présence notable mais n'atteignent pas les volumes de la categorie de tres forte demabde ou des marques fortes. Les marques à faible demande ont des parts de

marché très faibles, ce qui indique une demande de consommation très limitée et marginale dans la ville de Laghouat notamment les deux marques Noua et Aninos sont particulièrement en retrait.

3.1.4.3- Comparaisons "Post-Hoc" Descriptives

Le test de comparaison post-hoc, accompagné des statistiques descriptives, a révélé des différences significatives, tant absolues que relatives, entre les marques, mettant ainsi en évidence les écarts de performance observés. Cette analyse met en évidence que :

La marque AinBoughez est celle qui se distingue le plus, ayant une demande de consommation significativement plus élevée que la grande majorité des autres marques.

La marque Djurdjura est également un acteur important, avec une demande significativement plus élevée que certaines des marques à faible vente comme Aninos, Ariaif, Crista, Noua et Ouwis.

Les autres marques (celles non mentionnées dans les comparaisons significatives) ont des taux de vente qui ne sont pas statistiquement différents les uns des autres.

3.2- Discussion

3.2.1- Conformité des eaux embouteillées avec les normes OMS et algériennes

L'analyse des paramètres physicochimiques étiquetées sur les bouteilles des eaux de source vendues dans la ville de Laghouat révèle une conformité avec les normes de l'OMS et celles de NA. Cependant, plusieurs sources présentent des valeurs proches des seuils réglementaires, voire des dépassements ponctuels, notamment en sulfates, magnésium et résidu sec.

Ces résultats recordent ceux de Ben hamza et al. (2016), qui ont constaté que bien que la majorité des eaux embouteillées commercialisées en Algérie respectent les normes, certaines présentent une minéralisation excessive, attribuée à des conditions géologiques locales ou à un mauvais étiquetage. De même, Brahimi et al. (2020) ont montré que la température de stockage et de transport peut modifier les concentrations en certains ions,

notamment les nitrates et le calcium, suggérant que les valeurs affichées sur les étiquettes peuvent parfois sous-estimer la réalité.

3.2.2- Dureté de l'eau et minéralisation élevée

Les sources de Medjana, Aures et El Ghadir présentent une dureté importante, liée à des concentrations élevées en calcium et magnésium. Cette dureté peut affecter le goût de l'eau et favoriser l'entartrage des installations domestiques. La forte minéralisation (résidu sec > 500 mg/L) relevée dans plusieurs sources (notamment Medjana, Ariaef, Aures, Djurdjura) reflète un contact prolongé avec des terrains calcaires ou évaporitiques.

Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Aït-Messaoud et al. (2021), qui ont mis en évidence une corrélation entre la nature géologique des bassins (carbonatée, dolomitique) et la composition minérale des eaux de source, notamment pour les ions HCO_3^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} .

3.2.3- Nitrates

Les teneurs en nitrates, bien que toutes inférieures à 50 mg/L, dépassent les 25 mg/L dans certaines sources (Hirouche, Djurdjura, Crista), ce qui soulève des inquiétudes pour les nourrissons, chez qui une consommation prolongée peut entraîner une méthémoglobinémie. Ce constat est cohérent avec celui de Ben hamza et al. (2016), qui signalent que certaines eaux embouteillées présentent des niveaux de nitrates suspects, probablement en lien avec des contaminations d'origine agricole ou domestique des nappes phréatiques.

3.2.4- Pressions anthropiques sur les bassins versants

L'indice global de pression (IGP) développé dans cette étude permet de relier la qualité des eaux embouteillées à l'état environnemental des bassins versants qui les alimentent. Les zones de très forte pression (Fezguia, Taya) sont caractérisées par une intensité d'usage

agricole, urbain et pastoral élevée, traduisant une vulnérabilité accrue aux pollutions diffuses.

Cette approche complète les travaux d'Aït-Messaoud et al. (2021), qui ont souligné l'intérêt de l'analyse spatiale et cartographique pour hiérarchiser les sources selon leur vulnérabilité. Par ailleurs, l'intégration de l'usage des terres et de l'occupation du sol dans votre analyse rejoint les recommandations de Saidi et al. (2022), qui soulignent que la perception de la qualité de l'eau par les consommateurs dépend fortement du contexte environnemental des sources.

3.2.5- Comportement des consommateurs et perception de la qualité

Selon Saidi et al. (2022), les consommateurs algériens se fient principalement aux informations sur l'étiquette, au goût et à la notoriété de la marque pour choisir leur eau. Or, la présente étude montre que certaines eaux étiquetées comme « faiblement minéralisées » présentent en réalité des teneurs élevées en résidu sec ou en sodium, ce qui peut poser problème aux personnes suivant un régime hyposodé ou souffrant d'insuffisance rénale. Cela souligne la nécessité d'un étiquetage plus rigoureux, voire d'une régulation plus stricte des allégations commerciales.

4-1-Conclusion

Cette étude a permis de mieux comprendre la qualité physicochimique des paramètres étiquetés sur les bouteilles des eaux de source à ville de Laghouat, en établissant un lien entre leurs caractéristiques chimiques et les contextes géographiques ainsi que l'occupation du sol des zones de captage. L'analyse des données des étiquetages a mis en évidence une forte variabilité des concentrations en ions majeurs et en résidus secs, certains échantillons atteignant, voire dépassant, les seuils fixés par les normes nationales ou celles de l'OMS, notamment en ce qui concerne les nitrates et les sulfates.

La cartographie des points de captage, croisée avec les données d'occupation des sols issues de l'imagerie Sentinel-2, a mis en évidence une influence notable des activités anthropiques sur la qualité de l'eau : les sources situées dans des zones à usage agricole intensif ou proches de centres urbains présentent des indices de pollution plus élevés, confirmant une relation entre pression sur l'environnement et altération chimique de la ressource.

L'approche géospatiale adoptée a permis de dépasser le cadre descriptif classique des études sur les eaux embouteillées, en intégrant une dimension spatiale essentielle pour comprendre les disparités régionales de qualité. L'indice de pression environnementale (IGP), combiné à l'analyse des paramètres chimiques, s'est révélé être un outil pertinent pour identifier les zones de vulnérabilité et orienter les efforts de gestion et de contrôle qualité.

Il est essentiel d'adopter une stratégie de gestion différenciée, tenant compte des niveaux de pression exercés sur chaque bassin versant. Les bassins soumis à une pression forte ou très forte doivent faire l'objet d'un suivi rigoureux et de plans d'intervention urgents, tandis que les bassins à pression modérée ou faible doivent être protégés durablement pour préserver leurs fonctions hydrologiques et écologiques.

4-2-Perspectives

Ces résultats ouvrent plusieurs perspectives de recherche et d'action

☞ **Élargir le champ d'étude** à d'autres régions semi-arides d'Algérie afin de dresser un diagnostic plus complet à l'échelle nationale, en tenant compte de la diversité des contextes géologiques et d'occupation du sol.

☞ **Mettre en place un suivi spatio-temporel** de la qualité des eaux de source, en intégrant des séries de données mesurées sur le terrain et des observations satellitaires régulières, pour détecter les évolutions liées aux changements climatiques ou à l'urbanisation.

☞ **Renforcer la transparence et la traçabilité** des informations affichées sur les étiquettes, notamment par l'instauration d'un système de certification ou d'audit indépendant, en collaboration avec les autorités sanitaires.

☞ **Intégrer les outils SIG et l'indice de pression dans la gestion des ressources hydriques**, en vue d'identifier les captages à risque et d'orienter les politiques de protection des zones sensibles.

☞ Enfin, cette étude souligne l'intérêt d'une approche interdisciplinaire, combinant chimie de l'eau, géomatique et sciences environnementales, pour répondre aux enjeux croissants de **qualité, de sécurité et de durabilité** des ressources en eau dans les régions arides et semi-arides comme Laghouat.

Références bibliographiques

- Agence de l'eau RMC. (2013). Systèmes d'évaluation de la pression sur les masses d'eau superficielles.
- Agence Régionale de Santé d'Auvergne (ARSA). (2015). La qualité de l'eau destinée à la consommation humaine en auvergne.
- Aït-Messaoud N. et al. (2021). Approche géochimique et cartographique des eaux de sources minérales en Kabylie.
- Akter , T., Jhohura ,F.T., Akter , F. et al., 2016. Water Quality Index for measuring drinking water quality in rural Bangladesh: a cross-sectional study. J Health Popul Nutr. Volume 35,p 4.
- Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 35, 257–284.
- Anonyme. (2012): Communication : La gouvernance des eaux souterraine, cas de l'Algérie, Amman-Jordanie.
- Association des Producteurs Algériens de Boissons (APAB). (2012). Étude sur la consommation des eaux embouteillées en Algérie.
- Bear, S. E., Waxenberg, T., Schroeder, C. R., & Goddard, J. J. (2024). Bottled water, tap water and household-treated tap water—insight into potential health risks and aesthetic concerns in drinking water. PLOS Water, 3(9), e0000272. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000272>
- Benblidia, M. (2016). La consommation d'eau embouteillée en Algérie : Entre nécessité et choix de société. Revue des Sciences Sociales, (41), 105–115.
- Benhamza A. et al. (2016). Caractérisation physico-chimique de quelques eaux embouteillées vendues en Algérie.
- Benmansour, N., et al. (2013). "Indicateurs de pression sur les ressources en eau : approche intégrée pour l'évaluation de la durabilité." Revue des Sciences de l'Eau, vol. 26, no. 3.
- Bernard. C., (2007). Introduction à l'étude de la médecine expérimentale, Edition Bibliobazaar.
- Bouzidi, S; Meniai, M; Cheriti, A (2020). *Évaluation de la qualité physico-chimique de quelques eaux embouteillées commercialisées dans la région de Blida (Algérie)*. Revue **Nature & Technologie**, A – Sciences Fondamentales et Ingénierie, N°21.**
- Brahimi F. et al. (2020). Effet de la température sur la qualité des eaux embouteillées.
- Burrough, P.A., & McDonnell, R.A. (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press.
- Chen, D., Elhadj, A., Xu, H., Xu, X., & Qiao, Z. (2020). A study on the relationship between land use change and water quality of the Mitidja watershed in Algeria based on GIS and RS. Sustainability, 12(9), 3510.

-
- Chocat, B., Levi, Y., BreLOT, E. (2015). L'eau du robinet est-elle différente de l'eau en bouteille ? . Méli-Mélo. Démêlons les fils de l'eau.
- CREGG. (2020). Fiche de recommandations alimentaires : Eaux et santé. Consulté le 27 mai 2025, à partir de <https://www.cregg.org/wordpress/wp-content/uploads/2020/07/documents-n-eaux-et-sante.pdf>
- Encyclopédie de l'environnement. (2021). Les eaux minérales naturelles. Consulté le 27 mai 2025, à partir de <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/eaux-minerales-naturelles/> Environment 584–585 (2017), 131–144.
- Frassetto, L. A., Morris Jr, R. C., Sellmeyer, D. E., & Sebastian, A. (2008). Adverse effects of sodium chloride on bone in the aging human population resulting from habitual consumption of typical American diets. *The journal of nutrition*, 138(2), 419S-422S.
- Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century. *Journal of Environmental Management*, 173, 41-48.
- Gomes, R., Pereira, C., Galvão, J., & Ribeiro, V. (2024). Drinking Water: Strategies for Sustainable Management and Water for Everyone (pp. 709–715). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48532-9_66
- HAZZAB A. (2011). Eaux minérales naturelles et eaux de sources en Algérie. Article in Comptes rendus « Géosciences ».
- House, M. A., Ellis, J. B., 1987. The development of water quality indices for operational management, *Water Science and Technology*, p 145-154.
- Hubert, J., Hubert, C., Jungers, P., Daundo, M., Hartemann, P. (2002). Eaux de boisson et lithiase calcique urinaire idiopathique : Quelles eaux de boisson et quelle cure de diurèse ? N° 12. p692-699
- Ketrouci, K., Meddi, M., Bouregba, N., Zatout, I., & Rezki, A. (2023). Classification of bottled waters marketed and consumed in Algeria through statistical approaches. *Journal of Water and Health*, 21(10), 1489–1502.
- Khamkhoum, S (2024). *Study of the agronomic potentialities of some olive varieties facing water stress in Algerian arid regions* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER-BISKRA).
- Kowalska, J. B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(6), 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/S10653-018-0106-Z>
- Labadi, A., & Hammache, H. (2016). Etude comparative des eaux minérales et des eaux de sources produites en Algérie. *Larhyss Journal*, 13(4), 319-342.
- Larousse. (n.d.). Eau – Définition. Dictionnaire de français Larousse en ligne. Consulté le 27 mai 2025 à partir de <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/eau/27777>.

- Larousse. (n.d.). Eau – Étymologie et usage du mot. Encyclopédie Larousse. Consulté le 27 mai 2025, à partir de <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/eau/45222>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Systems and Science*. Wiley.
- Lorz, C., et al. (2001). GIS-based modeling of nutrient inputs from diffuse and point sources into a small river catchment. *Ecological Modelling*, 145(1), 61-74.
- Lticescu, C., Georgescu, LP., Murariu, G., Topa, C., Timofti, M., Pintilie, V., Arseni, M., 2019. Qualité de l'eau du Bas-Danube quantifiée par l'IQE et l'analyse multivariée, p10.
- Madan, Y., & Jain, S. (2022). Assessment of surface water from physicochemical parameters: A detailed study of a selected portion of the Jaipur district. *International Journal of Health Sciences*, (II), 8368-8397.
- Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2015). La qualité des eaux conditionnées en France.
- Oumou Samba Gassambe. 2012, Contribution a une meilleure connaissance de la réglementation et de la composition physico-chimique des différentes marques d'eau minérale vendues au MALI. Thèse de Doctorat d'état, Université. De Bamako, 156 p
- Pericherla, S., & Vara, S. (2023). Agricultural Activities and Their Environmental Impact on Surface Waters: A Review. <https://doi.org/10.52783/tjjpt.v44.i2.216>
- Pimp My Bottle. (2021). La croissance du marché de l'eau en bouteille. Consulté le 27 mai 2025, à partir de <https://www.pimp-my-bottle.com/actualite/croissance-du-marche-eau>
- Plan Bleu, 2009 "Indicateurs de développement durable en Méditerranée : rapport de suivi." PNUE/PAM - Plan Bleu, Sophia Antipolis, France.
- Rodier J., 1996, "L'analyse de l'eau eaux naturelles - eaux usées", troisième édition,
- Ruma, M. M., Badr, A. M. A., Khater, S. A., & El-Tantawi, A. M. (2014). Assessment of some physicochemical parameters levels in sachet drinking water and its effects on human health in katsina urban area, nigeria. *Science World Journal*, 9(1), 19–27. <https://doi.org/10.4314/SWJ.V9I1>
- Saidi H. et al. (2022). Étude des comportements des consommateurs algériens vis-à-vis de l'eau embouteillée.
- Santé Canada. (2003). La température de l'eau potable. Consulté le 27 mai 2025, à partir de <https://sante.canada.ca/publications/healthy-living-vie-saine/water-temperature-eau/alt/water-temperature-eau-fra.pdf>
- Schoeller. (1974). Propriétés physico-chimique de l'eau Le CNRS en ligne
- Şener Ş., Şener E., Davraz A., 2017, "Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey)", *Science of the Total Environment* 584–585 (2017), 131–144.
- Souchu P. (2014). <http://doc.lerm.fr/molecule-deau/>
- Srour, B., Chazelas, E., Debras, C., Druesne-Pecollo, N., Agaesse, C., Szabo de Edelenyi, F., Kesse-Guyot, E., Deschasaux-Tanguy, M., & Touvier, M. (2022). Nitrites and nitrates from additives and natural sources and risk of

-
- cardiovascular outcomes. *European Journal of Public Health*, 32(Supplement_3). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckac129.491>
- Sun, H., Gui, D., Yan, B., Liu, Y., Liao, W., Zhu, Y., ... & Zhao, N. (2016). Assessing the potential of random forest method for estimating solar radiation using air pollution index. *Energy Conversion and Management*, 119, 121-129.
- Syed, M. M., Hossain, M. S., Karim, M. R., Uddin, M. F., Hasan, M., & Khan, R. H. (2023). Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 18, 100247.
- Thomas, F.b. (2014). Les vertus des eaux minérales .Nutrition.
- Toul, O., Boulenouar, K. (2018). Etude physico-chimique et bactériologique des eaux embouteillées de source algérienne.
- Tufan Çetin, Ö. Z. G. E. (2019). Determination of lichen diversity variations in habitat type of Mediterranean maquis and arborescent matorral. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(4).
- Verywell Health. (2023, 15 septembre). Why Is Water So Important? Here's What You Need to Know. Consulté le 27 mai 2025, à partir de <https://www.verywellhealth.com/why-is-water-so-important-7642982>
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Handbook 537.
- World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth
- Yang, Y. O. N. G. J. U. N., Khan, Z. I., Ahmad, K. A. F. E. E. L., Arshad, N. I. M. R. A., Rehman, S. U., Ullah, M. F., ... & Ahmad, T. (2020). Does the chromium element in forages and fodders grown in contaminated pasture lands cause toxicity in livestock: assessing the potential risk. *Rev Chim*, 71(7), 397-405.
- Zotou, I., Tsihrintzis, VA, Gikas, GD .,2019. Performance de sept indices de qualité de l'eau (IQE) dans un fleuve méditerranéen Surveillance et évaluation environnementales,p 19-50.
- Site web :
- Sites web: <https://core.ac.uk/download/pdf/236414948.pdf>