



République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Abbes LAGHROUR – Khenchela -
Faculté des sciences de la nature et de la vie
Département de l'Ecologie et l'Environnement

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : Sciences de nature et de la vie

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème

**Analyse spatiale et cartographie de l'indice de qualité des eaux
souterraines à des fins de consommation dans l'aquifère alluviale
de Bouhmama (Nord-Est de l'Algérie)**

Présenté par

Nadjeh Islem Messai

Devant le jury composé de

**Président
Encadrant
Examineur**

**BERKANI Cherifa
BOULABEIZ Mahrez
DJOUDI Salima**

**MCA, Université de Khenchela
MCA, Université de Khenchela
MCB, Université de Khenchela**

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Nous remercions Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous donné durant toutes ces années d'étude.

Au terme de ce travail, nous tiens à remercier ceux qui nous ont aidé à le réaliser, et qu'ils trouvent ici le témoignage de nos profondes reconnaissances.

**Nos profondes gratitudes s'adressent avant tout au
Mr : Boulabeiz Mahrez**

**Notre encadreur, qui a accepté de diriger notre travail et
nos a accordé
Toute son attention et sa patience pour l'accomplir, nous le
remercie
Pour sa disponibilité, ses précieux conseils scientifiques,
son
Encouragement ainsi que sa gentillesse qui nous permis de
mener à bien ce travail.**

*Table des matières

Introduction Générale	8
Chapitre I :Présentation de la zone d'étude	11
1 Localisation de la zone d'étude :	11
1.1 Situation géographique :	11
1.2 Aperçu climatique :	12
1.3 Les précipitations :	13
1.4 Les températures :	1314
1.5 Type de climat : (Indice de Martonne (1923))	14
1.6 Couvert végétale :	14
1.7 Pédologie :	15
1.8 Géomorphologie:	16
Topographie de la commune :	16
Le relief de Bouhmama :	17
1.9 Géologie :	20
Le Quaternaire :	20
Les formations secondaires :	20
Le Crétacé :	20
CHAPITRE II :Revue de littérature	25
1 Introduction	25
2 Les sources naturelles de l'eau :	25
3 Les eaux souterraines :	26
4 Eaux de surfaces :	27
4.1 Définition et typologie	27
4.2 Caractéristiques physico-chimiques	28
4.3 Température	28
4.4 Composition	28
4.5 Propriétés de l'eau :	29
Propriétés Fondamentales de l'Eau :	29
Propriétés Physiques de l'Eau :	29
Point d'Ébullition Exceptionnellement Élevé :	29
Viscosité Différentielle :	29
Pouvoir Solvant Inégalé :	29
Tension Superficielle Remarquable :	30
Chaleur Spécifique Supérieure	30
Chaleurs Latentes Importantes	30
Capacité Thermique Exceptionnelle	30

Transparence Sélective	30
4.6 Propriétés Chimiques de l'Eau	30
4.7 Propriétés Biologiques de l'Eau	31
5 Pollution de l'eau :	31
5.1 Pollution causée par les activités agricoles	31
5.2 Pollution causée par les activités industrielles	32
Déchets de processus de production :.	32
Eaux de refroidissement :	32
Pollution causée par les déchets dans les zones résidentielles :	33
6 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) :	33
6.1 Une brève histoire des modèles WQI	34
6.2 Structure du modèle IQE:	36
6.3 Paramètres de sélection :	37
6.4 Sous-indication :	38
Concentrations des paramètres :.	38
6.5 Fonctions interpolées linéaires :	38
6.6 Fonctions de courbe de notation	39
6.7 Pondération des paramètres	39
6.8 Fonctions d'agrégation	40
Fonctions additives	40
Fonctions multiplicatives :	40
Fonctions d'agrégation combinées :	41
Fonction minimale de l'opérateur :	41
Fonctions d'agrégation linéaires/non linéaires uniques :	41
6.9 Sélection des paramètres	42
1 Introduction	44
2 Matériels et méthodes :	44
2.1 Collection des données :	44
3 Cartographie des éléments physico chimique 2014 et 2023	45
3.1 Calcium Ca^{2+}	46
3.2 Magnesium Mg^{2+}	47
3.3 Sodium Na^{+} :	48
3.4 Potassium K^{+} :	48
3.5 Chlorures Cl^{-} :	49
3.6 Sulfates SO_4^{-2} :	50

3.7	Bicarbonate HCO_3^- :	51
3.8	Nitrates NO_3^- :	52
3.9	Conductivité électrique CE :	53
4	<i>Indice de qualité des eaux souterraines (IQE) :</i>	54
5	<i>Résultat et discussion :</i>	56
5.1	Analyse de la Carte de 2014 :	57
5.2	Analyse de la Carte de 2023 :	58
5.3	Interprétation statistique des résultats :	59
6	<i>Comparaison des Paramètres Physico-Chimiques (2014 vs. 2023) (Tableau 10)</i>	60
6.1	Paramètres en Baisse (Amélioration) :	60
6.2	Paramètres en Hausse (Dégradation Potentielle) :	61
6.3	Paramètres Stables :	61
7	<i>.Statistiques Descriptives du IQE :</i>	61
8	<i>Justification des Évolutions Cartographiques :</i>	62
8.1	Disparition des Zones de Mauvaise Qualité :	62
8.2	Homogénéisation vers une Qualité Moyenne :	62
8.3	Apparition de Zones de Bonne Qualité :	62
9	<i>Conclusion :</i>	63
<i>Conclusion générale et recommandation</i>		63
1	<i>Identification des zones vulnérables :</i>	64
1.1	Suivi des tendances :	64
1.2	Adaptation des stratégies de gestion :	64
1.3	Planification des ressources :	65
2	<i>Recommandations pour une gestion durable :</i>	65

Résumer

La gestion durable des eaux souterraines est cruciale dans les régions semi-arides comme la plaine de Bouhmama (Khenchela, Algérie), où la ressource est soumise à une pression anthropique et climatique croissante. Cette étude évalue l'évolution spatio-temporelle de la qualité de la nappe alluviale de Mellagou entre 2014 et 2023. La méthodologie repose sur l'analyse physico-chimique d'échantillons prélevés lors de deux campagnes (20 échantillons en 2014, 15 en 2023), le calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) basé sur les normes de l'OMS (2017), et la cartographie des paramètres et de l'IQE via un Système d'Information Géographique (SIG) avec interpolation par pondération inverse de la distance (IDW). Les résultats révèlent des modifications significatives de la distribution spatiale et des concentrations des ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) entre les deux périodes, témoignant d'une hydrogéochimie dynamique. L'analyse de l'IQE indique une amélioration globale de la qualité de l'eau, marquée par la disparition des zones de mauvaise et très mauvaise qualité observées en 2014 et l'émergence de zones de bonne qualité en 2023. Cependant, une augmentation alarmante et une large diffusion des concentrations en nitrates (NO_3^-), dépassant souvent le seuil de potabilité, sont constatées en 2023, suggérant une contamination diffuse probablement liée aux activités agricoles. En conclusion, bien qu'une tendance générale à l'amélioration de la qualité de l'eau soit observée, la dégradation par les nitrates constitue une préoccupation majeure qui nécessite des stratégies de gestion et de protection adaptées pour assurer la durabilité de cette ressource essentielle.

Mots clés : Eaux souterraines, Indice de Qualité de l'Eau (IQE), Analyse spatio-temporelle, Plaine de Bouhmama, Algérie, Région semi-aride, SIG.

Abstract

Sustainable groundwater management is crucial in semi-arid regions such as the Bouhmama plain (Khenchela, Algeria), where the resource is subject to increasing anthropogenic and climatic pressure. This study assesses the spatio-temporal evolution of the quality of the Mellagou alluvial aquifer between 2014 and 2023. The methodology is based on the physico-chemical analysis of samples taken during two campaigns (20 samples in 2014, 15 in 2023), the calculation of the Water Quality Index (WQI) based on WHO standards (2017), and the mapping of parameters and WQI via a Geographic Information System (GIS) with inverse distance weighting (IDW) interpolation. The results reveal significant changes in the spatial

distribution and concentrations of major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) between the two periods, testifying to dynamic hydrogeochemistry. Analysis of the WQI indicates an overall improvement in water quality, marked by the disappearance of the poor and very poor quality zones observed in 2014 and the emergence of good quality zones in 2023. However, an alarming increase and widespread distribution of nitrate (NO_3^-) concentrations, often exceeding the potability threshold, are observed in 2023, suggesting diffuse contamination probably linked to agricultural activities. In conclusion, although a general trend towards improved water quality is observed, nitrate degradation is a major concern that requires appropriate management and protection strategies to ensure the sustainability of this essential resource.

Keywords: Groundwater, Water Quality Index (WQI), Spatio-temporal analysis, Bouhmama Plain, Algeria, Semi-arid region, GIS.

الملخص

الإدارة المستدامة للمياه الجوفية أمر بالغ الأهمية في المناطق شبه القاحلة مثل سهل بوحمامة (خنشلة، الجزائر)، حيث يتعرض المورد لضغوط بشرية ومناخية متزايدة. تقيم هذه الدراسة التطور المكاني والزمني لجودة طبقة المياه الجوفية الغربية في ميلاغو بين عامي 2014 و2023. وتعتمد المنهجية على التحليل الفيزيائي الكيميائي للعينات المأخوذة خلال استنادًا إلى معايير (WQI) حملتين (20 عينة في عام 2014، و15 عينة في عام 2023)، وحساب مؤشر جودة المياه (GIS) منظمة الصحة العالمية (2017)، ورسم خرائط المعلومات ومؤشر جودة المياه باستخدام نظام المعلومات الجغرافية كشفت النتائج عن تغيرات كبيرة في التوزيع المكاني (IDW) مع الاستيفاء عن طريق الترحيح العكسي للمسافة بين الفترتين، مما يدل على الكيمياء (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- و SO_4^{2-} , HCO_3^-) وتركيزات الأيونات الرئيسية المائية الديناميكية. يشير تحليل مؤشر جودة المياه إلى تحسن عام في جودة المياه، والذي يتميز باختفاء المناطق ذات الجودة الرديئة والرديئة جدًا التي لوحظت في عام 2014 وظهور مناطق ذات جودة جيدة في عام 2023 ومع ذلك، لوحظت زيادة ، والتي غالبًا ما تتجاوز عتبة الصلاحية للشرب، مما يشير إلى (NO_3^-) مقلقة وتوزيع واسع النطاق لتركيزات النترات تلوث منتشر ربما يكون مرتبطًا بالأنشطة الزراعية. في الختام، على الرغم من ملاحظة وجود اتجاه عام نحو تحسين جودة المياه، إلا أن تدهور النترات يشكل مصدر قلق كبير يتطلب استراتيجيات إدارة وحماية مناسبة لضمان استدامة هذا المورد الأساسي.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، مؤشر جودة المياه، التحليل المكاني والزمني، سهل بوحمامة، الجزائر، المنطقة شبه القاحلة، نظم المعلومات الجغرافية. 2023.

Introduction Générale

La gestion durable des ressources en eau souterraine représente un défi crucial, particulièrement dans les régions arides et semi-arides qui sont soumises à une pression anthropique croissante et aux impacts du changement climatique. Le Nord-Est algérien, caractérisé par un climat semi-aride (indice d'aridité de Martonne de 13,75 calculé pour la région), illustre parfaitement cette problématique. Au sein de cette région, la plaine de Bouhmama (Wilaya de Khenchela) constitue une zone agricole et économique stratégique où les eaux souterraines, principalement issues de la nappe alluviale de Mellagou (Berkani et al, 2023), sont intensément sollicitées pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable. Cette exploitation, couplée aux activités agricoles et aux variations climatiques, exerce une pression significative sur la qualité de cette ressource essentielle, soulevant des préoccupations quant à sa pérennité et sa potabilité.

L'évaluation de la qualité des eaux est donc primordiale pour assurer une utilisation sécurisée et durable. L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE), ou Water Quality Index (WQI), s'est imposé comme un outil synthétique efficace pour agréger diverses données physico-chimiques en une mesure unique et compréhensible de la qualité globale de l'eau (Abbasi & Abbasi, 2012; Horton, 1965). Son application permet non seulement de caractériser l'état de la ressource à un instant T, mais aussi, par une approche spatio-temporelle, de suivre son évolution, d'identifier les zones de dégradation ou d'amélioration et de comprendre les facteurs influençant ces dynamiques.

Face à ce constat, l'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer et d'analyser l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de Mellagou dans la plaine de Bouhmama. Plus spécifiquement, cette étude vise à :

1. Caractériser l'état physico-chimique des eaux souterraines lors de deux campagnes distinctes (2014 et 2023).
2. Calculer l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) pour chaque échantillon prélevé.
3. Cartographier la distribution spatiale des principaux paramètres physico-chimiques et de l'IQE pour les deux périodes.
4. Analyser et comparer les variations spatiales et temporelles de la qualité de l'eau entre 2014 et 2023.
5. Fournir des éléments d'aide à la décision pour une gestion plus durable des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Pour atteindre ces objectifs, une approche méthodologique rigoureuse a été mise en œuvre, sachant le :

Collecte de données : Deux campagnes d'échantillonnage ont été collectées en mars 2014 (20 échantillons) et juin 2023 (15 échantillons) sur des forages captant la nappe alluviale. Les paramètres physico-chimiques (pH, T°, CE) ont été mesurés in situ, tandis que les concentrations en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-) et la dureté totale (TH) ont été déterminées en laboratoire.

Calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) : L'IQE a été calculé pour chaque échantillon en suivant une méthode pondérée basée sur les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2017) pour l'eau potable.

Analyse Spatiale et Cartographie : Les données collectées ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) sous le logiciel ArcGIS. La distribution spatiale des différents paramètres physico-chimiques et de l'IQE a été cartographiée pour les deux années (2014 et 2023) en utilisant la méthode d'interpolation par pondération inverse de la distance (IDW). Cette technique, reconnue pour son efficacité dans des études similaires (Benjamin, 2007; Venkatramanan et al., 2016; Hamouche et al., 2021; Koussa & Berhail, 2021).

Ce mémoire est structuré en trois chapitres afin de présenter de manière claire et logique la démarche suivie et les résultats obtenus. Après cette introduction générale qui pose le contexte, la problématique, les objectifs et la méthodologie, le **Chapitre I** présente en détail la zone d'étude (localisation, climat, géologie, hydrogéologie, etc.). Le **Chapitre II** est consacré à une revue de la littérature sur les concepts clés, notamment les propriétés de l'eau, la pollution hydrique et les différentes approches d'évaluation de la qualité de l'eau, avec un focus sur l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE), son historique et sa méthodologie de calcul. Et le **chapitre III** présente et discute les résultats obtenus, notamment les cartes de distribution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et de l'IQE, ainsi que l'analyse de leur évolution entre 2014 et 2023. Enfin, une Conclusion Générale synthétise les principaux résultats, souligne les apports de l'étude, discute des implications pour la gestion de l'eau et propose des recommandations ainsi que des perspectives de recherche future.

Chapitre I :

Présentation de la zone d'étude

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

1 Localisation de la zone d'étude :

1.1 Situation géographique :

La commune de Bouhmama est localisée dans la partie nord-ouest de la wilaya de Khenchela et dans la section orientale du massif des Aurès. Ses coordonnées géographiques s'étendent de 39°06'25" à 39°30'25" de latitude Nord, et de 4°86'10" à 5°1'75" de longitude Est. Elle est presque entièrement ceinturée par une chaîne de montagnes (Ouldammam et Chouarfia, 2011, notamment les monts Géographiquement, elle est délimitée par (Fig. 1):

- Au nord-ouest : le massif de Chélia ;
- Au nord : les contreforts du massif de Chélia ;
- À l'est : le massif de Beni-Melloul ;
- Au sud-est : les gorges de Mellagou.

La commune de Bouhmama s'étale sur une superficie totale de 409 km², ce qui représente 4,20 % du territoire de la wilaya de Khenchela. Elle est également le siège d'une daïra qui regroupe les communes de Bouhmama, Yabous, Chélia et M'Sara. Sur le plan spatial, Bouhmama présente une configuration territoriale allongée, s'étirant du nord-ouest vers le sud-est. Elle est limitée par :

- Au nord-ouest : les communes d'Inoughissène (wilaya de Batna) et de Yabous ;
- Au nord-est : la commune de Chélia ;
- À l'est : la commune de Tamza ;
- À l'ouest : la commune de M'Sara ;
- Au sud : la commune de Kheirane.

Enfin, Bouhmama se trouve à environ 37 km à vol d'oiseau à l'ouest du chef-lieu de la wilaya de Khenchela (Bouali et al, 2015).

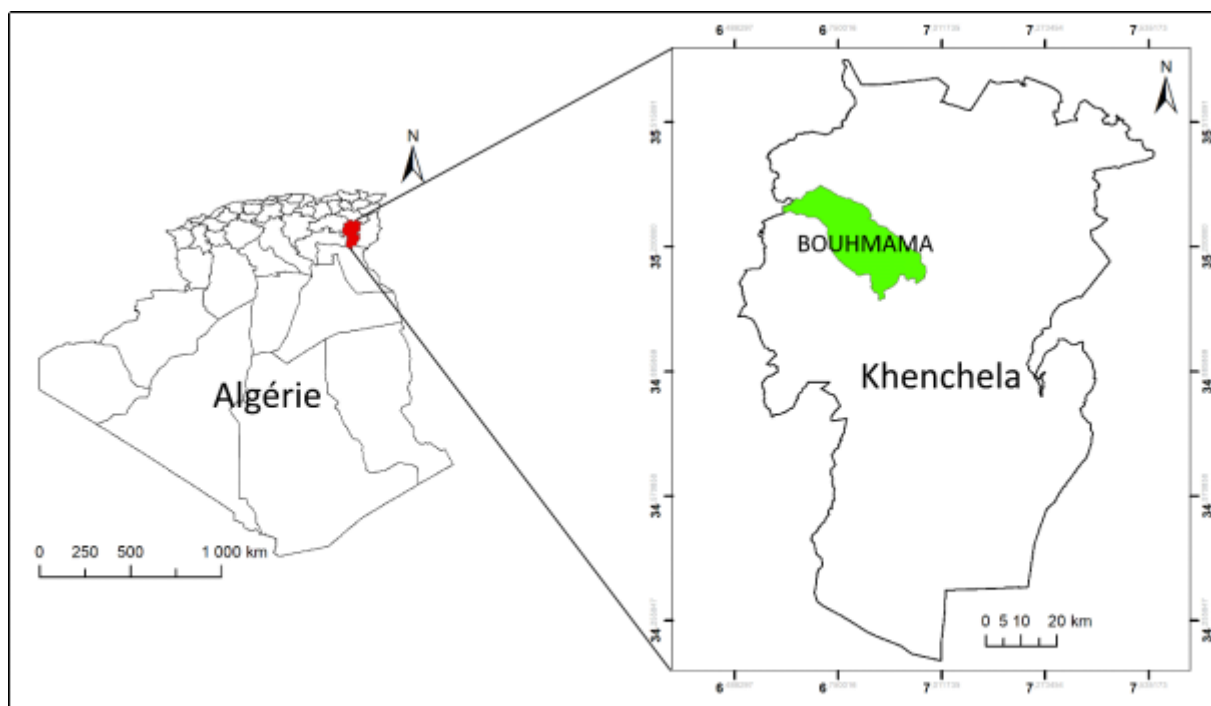


Fig. 1 Situation de la zone d'étude (Auteur, 2025)

1.2 Aperçu climatique :

Pour caractériser le climat de la zone d'étude de Bouhmama, celle-ci étant dépourvue de station météorologique propre, nous avons utilisé les données de la station d'El Hamma (SME) (Tableau 1). Cette station, administrée par l'Office National de la Météorologie, a fourni des relevés pour la période d'observation allant de 2009 à 2019. Ces informations ont été essentielles pour évaluer les facteurs constitutifs du bilan hydrique de la région de Bouhmama.

Tableau 1. Situation de la station météorologique d'El Hamma

Coordonnée	Latitude	Longitude	Altitude	Période d'observation
Station El Hamma	7°05'E	35°28'N	928.5 m	2009-2019

1.3 Les précipitations :

La répartition spatiale des pluies est conditionnée par deux paramètres principaux : la répartition hypsométrique et la disposition du relief, comme l'indique la carte des précipitations moyennes mensuelles de l'Est algérien établie par l'A.N.R.H. (1993). Selon cette carte, la région de

Khenchela s'inscrit dans un secteur sec, caractérisé par des précipitations moyennes mensuelles variant entre 8 et 37mm. Les valeurs les plus élevées sont généralement observées en septembre, janvier et avril, tandis que le mois de juillet est le moins arrosé, avec seulement 8 mm de précipitations.

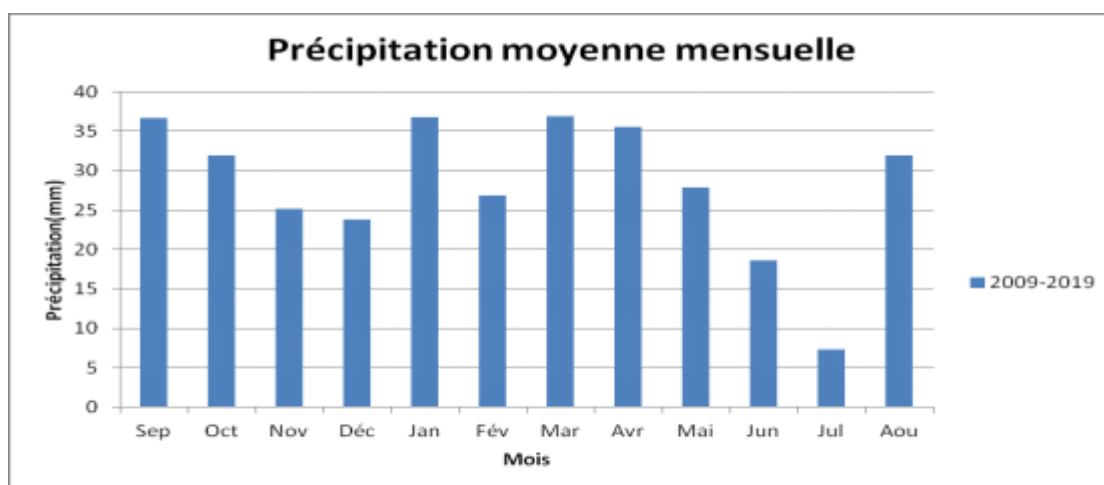


Fig 2. Variation des précipitations moyenne mensuelle de Khenchela , 2019

1.4 Les températures :

La température constitue un facteur limitant primordial, car elle régit l'ensemble des processus métaboliques et influence directement la répartition des espèces au sein des communautés vivantes dans la zone d'étude.

Les données climatiques recueillies sur une décennie (2009-2019) (Figure 3), révèlent que :

- Les mois les plus chauds (juin et juillet) atteignent des températures maximales avoisinant 30°C ;

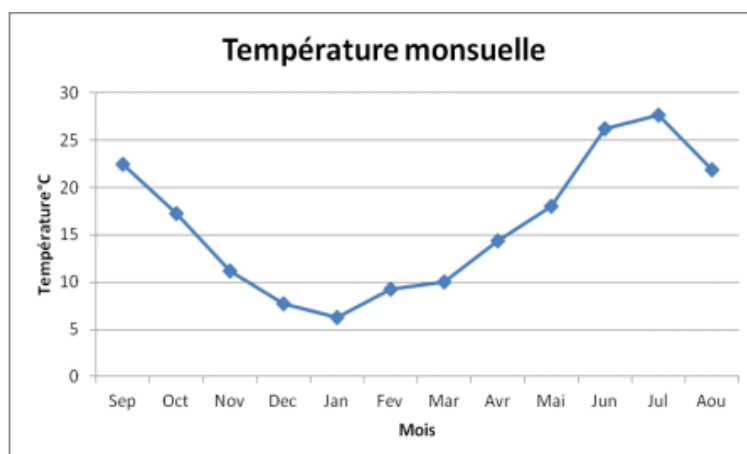


Fig 3. Variation des températures moyenne mensuelle de Khenchela , 2009-2019

- Les mois les plus froids (décembre et janvier) enregistrent des minimales ne dépassant pas 7°C.

1.5 Type de climat : (Indice de Martonne (1923))

Il définit l'indice de l'aridité (A) en se basant sur les températures et les précipitations selon la formule suivante : $A = P / (T + 10)$ avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ; T : températures moyennes mensuelles (°C).

De. Martonne a proposé la classification suivante :

- $A < 5$: climat hyper-aride ;
- $5 < A < 7.5$: climat désertique ;
- $7.5 < A < 10$: climat steppique ;
- $10 < A < 20$: climat semi-aride ;
- $20 < A < 30$: climat tempéré.

Application numérique : $A = P / (T + 10)$ avec $P = 354.79$, $T = 15.79$

Donc, $A = 354.79 / (15.79 + 10) = 13.75$

D'après les classifications précédentes, notre zone d'étude a un climat *semi-aride*

1.6 Couvert végétale :

La richesse du patrimoine forestier national confère à la commune une vocation sylvicole de premier plan. La formation végétale prédominante est constituée de forêts de Pin d'Alep, s'étendant sur plus de 20 000 hectares, répartis entre peuplements denses, forêts claires et jeunes futaies. Ce couvert forestier (Fig. 4) est complété par des cédraies et des maquis de chêne vert. On relève également la présence d'un maquis clair, où se mêlent genévriers et alfa, ainsi que 1 127 hectares de terres à vocation forestière actuellement exploitées comme parcours pastoral. En termes de classification, un quart (25 %) du patrimoine forestier de la commune de Bouhmama est répertorié en forêt de production, tandis qu'un autre quart (25 %) est désigné forêt mixte, remplissant à la fois des fonctions de protection et de production. Cette forêt contribue de manière significative à la production de bois de la wilaya de Khenchela, avec un volume estimé à 30 000 m³ pour l'année 2010. La production forestière est principalement destinée à l'unité de sciage de Bouhmama, qui emploie 75 personnes, ainsi qu'à la menuiserie de Khenchela (SAFA Aurès). Cette filière représente à elle seule une contribution significative à l'économie locale, constituant une source importante de revenus pour la commune et, plus largement, pour la wilaya.

Par ailleurs, le patrimoine forestier de Bouhmama se distingue par la richesse et la diversité biologique de son couvert végétal, comprenant à la fois des espaces forestiers et une grande variété de plantes aromatiques et médicinales.



Fig 4. Couvert végétale (Mamadou AAS, 2025)

1.7 Pédologie :

L'analyse de la carte pédologique (Figure, 5) révèle trois grandes catégories de sols qui structurent l'espace communal de Bouhmama, à savoir :

- Les sols calcaires humifères,
- Les sols calciques,
- Les sols insaturés humifères.

Les sols calcaires humifères occupent une part importante du territoire communal. Ils se rencontrent principalement sur les piémonts des reliefs longeant la vallée de l'Oued Mellagou. Ces sols se caractérisent par la présence de croûtes et d'encroutements calcaires, témoins de processus de calcification marqués.

Sur le plan agricole, ces sols sont principalement destinés à la culture céréalière. Toutefois, lorsque les ressources en eau le permettent, certaines superficies sont également valorisées par l'arboriculture fruitière, notamment la culture du pommier.

En seconde position viennent les sols calciques, localisés exclusivement dans la vallée de l'Oued Mellagou. Ils recouvrent principalement les terrasses qui bordent le cours d'eau. Bien que leur épaisseur soit généralement réduite, ces sols accueillent par endroits des plantations d'arbres fruitiers. Les sols insaturés humifères, quant à eux, correspondent à des sols minces développés en milieu montagneux, sous couvert forestier et sur des pentes marquées. Ils se rencontrent principalement dans les massifs du Chélia, du Djebel Taourirt et du Djebel M'Daouer.

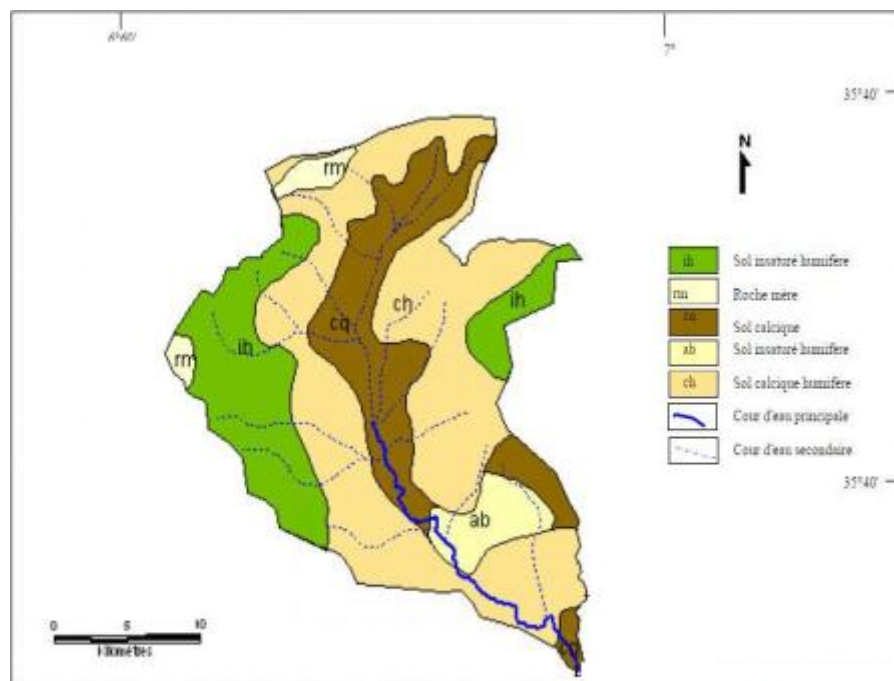


Fig 5. La répartition des unités de sols à travers la zone d'étude
(Extrait de Carte des sols d'Algérie Tebessa 1/500 000)

Enfin, de manière très limitée sur le plan spatial, on retrouve également des sols alluviaux le long de l'Oued Mellagou. Ces sols sont mis en valeur par l'arboriculture fruitière irriguée, notamment à travers la culture du pommier et du pêcher.

1.8 Géomorphologie:

Topographie de la commune :

La topographie de la commune se distingue par trois unités principales :

1.8.1.1 La zone montagneuse :

Selon la définition classique du Larousse, une montagne est une forme de relief (mont) qui se caractérise par une altitude relativement élevée et, généralement, par une forte dénivellation entre les sommets et les fonds de vallées (Agaguenia, 2010). Cette zone est dominée par une forêt de pins d'Alep (massif forestier). Malgré un terrain très accidenté, l'érosion y est limitée grâce à une bonne couverture végétale (Vila, 1977).

1.8.1.2 La zone de piémont :

Située au centre du territoire communal, la zone de piémont bénéficie de la protection contre l'érosion offerte par la couverture forestière en amont. Cependant, un ruissellement diffus peut se manifester par endroits en l'absence de végétation pérenne. Cette unité s'étend sur environ 7 774 hectares, ce qui représente 18,99 % de la superficie totale de la commune (Vila, 1977).

1.8.1.3 La zone de plaine :

Cette zone, à la morphologie globalement plate, s'étend le long de l'Oued Mellagou, dont elle tire son nom, depuis le chef-lieu jusqu'à la limite sud de la commune. Elle est imbriquée en aval de la zone de piémont. Couvrant une superficie de 2 148 hectares (soit 5,26 % du territoire communal), cette plaine est drainée par de nombreux "chaabets" (petits cours d'eau ou ravins) qui convergent tous vers l'Oued Mellagou. Elle constitue l'essentiel du potentiel agricole de la commune. Il est à noter que les sols de cette unité présentent une charge caillouteuse importante, constituée de colluvions issues des cônes de déjection (Vila, 1977).

Le relief de Bouhmama :

L'analyse de la carte topographique de Khenchela au 1/50 000 met clairement en évidence le caractère montagneux dominant de la commune de Bouhmama. À l'intérieur de ce domaine montagneux, la vallée de l'Oued Mellagou a été creusée perpendiculairement à l'axe principal des reliefs.

Le système morphologique dominant de la région, à forte composante montagneuse, se manifeste par plusieurs massifs remarquables. Au nord, le Djebel Chélia culmine à 2 328 mètres, tandis qu'à l'ouest s'élèvent le Djebel Tarzout (1 240 m) et le Djebel Tirhezza (plus de 1 220 m). À l'est, on retrouve Kef El Ahmeur (1 459 m), Guern El Kebch (1 411 m), le Djebel Taaïst (1 505 m) et le Djebel Tebak (1 308 m) (Vila, 1977 ; Figure. 6).

En contrebas de ces reliefs, le domaine déprimé est drainé par l'Oued Mellagou, formant une vallée orientée perpendiculairement à l'axe principal des montagnes. Dans cette dépression, les altitudes varient de 800 mètres au sud, au niveau de la confluence entre l'Oued Mellagou et l'Oued El Arabe, jusqu'à 1 200 mètres au nord, au pied du Djebel Chélia.

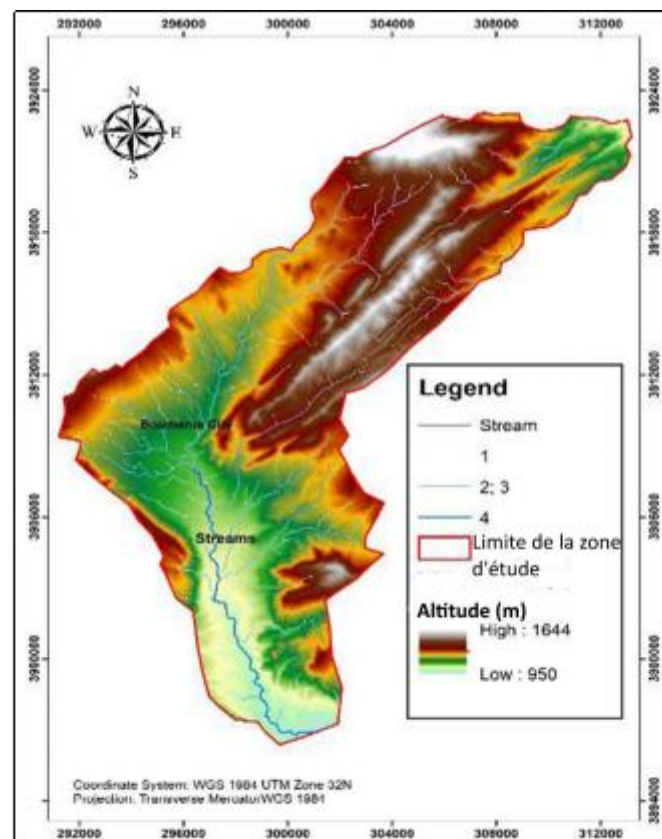


Fig 6. Carte de relief de la zone d'étude (Mamadou A AS, 2025)

1.8.1.4 Les pentes :

Les classes de pente de la plaine de Mellagou peuvent être résumées à partir de la figure 7, qui permet de visualiser l'agencement orographique de la commune. On distingue cinq classes topographiques :

1. Les deux premières classes (0-2% et 2-4%) concernent la partie de la vallée d'Oued Mellagou.
2. La classe intermédiaire (4-8%) correspond aux zones de piémont des reliefs montagneux entourant la vallée d'Oued Mellagou (Chélia au Nord, Djebel Taafist à l'Est, Ras Tirhezza à l'Ouest).

3. Les classes les plus élevées (8-16% et >16%) correspondent aux parties supérieures des principaux alignements de reliefs, incluant les points culminants de la commune.

Cette analyse révèle que plus de 85% de l'espace communal se situe à plus de 1000 m d'altitude, divisant l'orographie en deux grandes entités géomorphologiques : les monts et les dépressions. Ces caractéristiques classent la commune dans la catégorie des zones à caractère montagneux.

Du Nord au Sud de cet espace communal s'organise une succession d'alignements montagneux orientés Sud-Ouest/Nord-Est, alternant avec d'étroites zones déprimées, comme la dépression de Tamza.

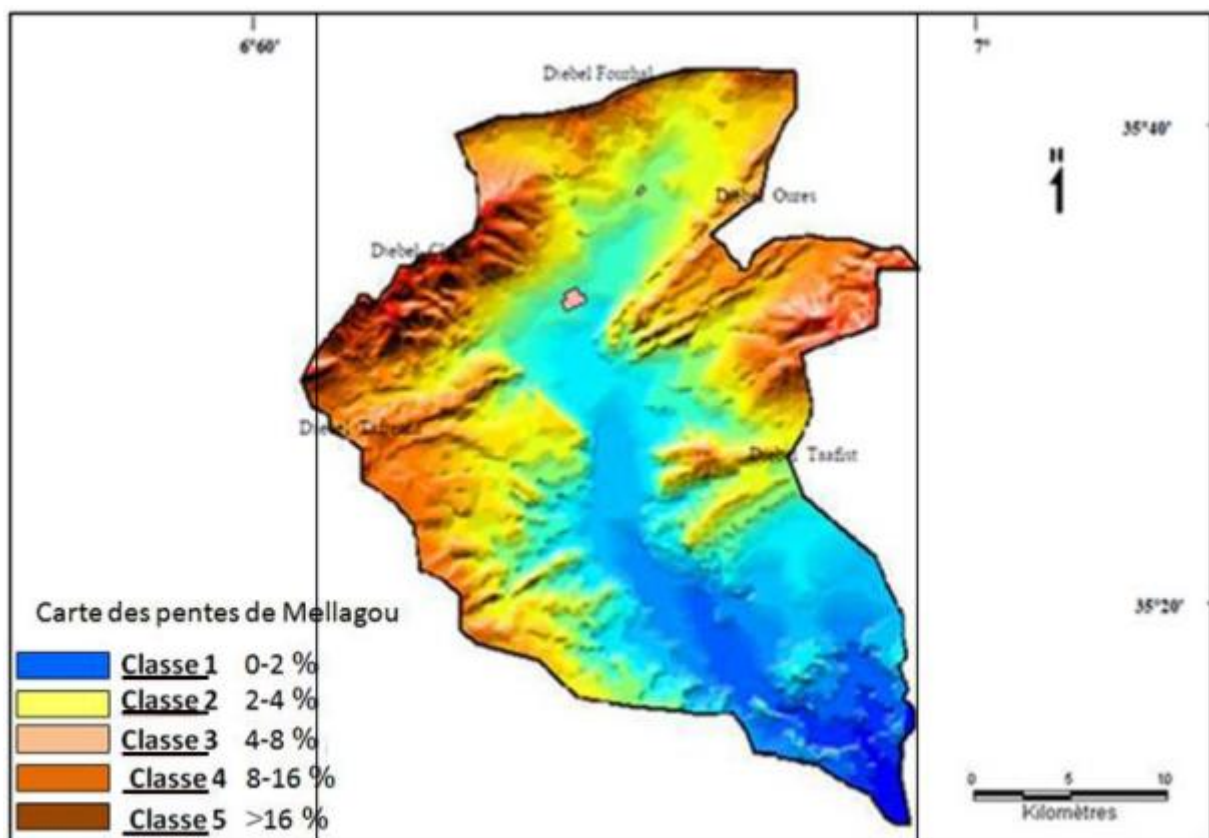


Fig. 7 Carte des pentes de la zone d'étude

1.9 Géologie :

Selon la carte géologique du bassin versant du Mellagou (Figure 8), le sous-bassin est principalement constitué de formations perméables à semi-perméables, qui couvrent la quasi-totalité de sa superficie, favorisant ainsi l'infiltration des eaux de surface.

La zone d'étude se caractérise par une série stratigraphique s'étendant du Trias, composée d'argiles, de gypse, de dolomie et de calcaire, jusqu'au Quaternaire, représenté essentiellement par des formations calcaires et marneuses (Lafitte, 1939 ; Lessard, 1952).

Le Quaternaire :

Les dépôts quaternaires représentés par des dépôts colluvion-alluvionnaires sont développés au débouché des zones de relief sous forme de cônes de déjections, par des éboulis de gravité sur les terrains accidentés et en contrebas des escarpements et des corniches tel que Kef El Ahmeur. À noter aussi, l'importance des dépôts alluvionnaires de l'Oued Mellagou et de ces principaux affluents qui recouvrent les formations crétacées situées dans la vallée due dit Oued Mellagou.

À noter également, la présence de formations alluvionnaires argilo-limono-sablo-conglomératiques, développées sur les terrasses de l'Oued Mellagou et de ses principaux affluents.

Les formations secondaires :

L'histoire géologique des terrains mésozoïques de cette région débute par les terrains triasiques et se termine par le Crétacé supérieur en passant par les formations crétacées inférieure et moyenne et le tous se terminent par le Quaternaire.

Le Crétacé :

Hormis, les sédiments quaternaires et les deux époinçements triasiques, l'ensemble des terrains composant le territoire communal de Bouhmama appartient à la période crétacée. Ainsi, la quasi-totalité des affleurements secondaires étudiés de la commune va du Crétacé inférieur au Crétacé supérieur avec des faciès très variés allant des marnes aux calcaires en passant par les marno-calcaires et les grès.

1.9.1.1 La crétacée supérieure (Le coniacien et santorien) :

Cet ensemble est composé de marnes avec, à la base et au sommet, quelques barres de marno-calcaires. Cette formation affleure dans la zone déprimée comprise entre les Djebels Tebak et Kanouf. C'est la partie qui joue le rôle de jonction entre l'Oued Mellagou. Cette formation est délimitée dans sa partie occidentale par une faille parcourant la rive droite de l'Oued Mellagou

avec une direction Nord-Ouest/Sud-Est. On retrouve aussi cet affleurement dans la zone localisée au Sud/ Sud-Est de Ktef Es Souda.

1.9.1.2 Le Crétacé moyen :

1.9.1.2.1 Le Turonien :

Cette formation est composée par une alternance de marnes grises et de calcaire zoogénique noduleux d'une épaisseur de 150 mètres et à sa base quelques mètres de marno- calcaires blanchâtres en plaquettes fines à cassures noirâtres bitumineuses. Elle représente plus de 50 % de la superficie du territoire communal.

1.9.1.2.2 Le Cénomaniens supérieur :

La partie supérieure de cet étage est constituée de calcaires sous la forme d'une barre avec cassures écailleuses et au sommet se retrouve un niveau de nodules de pyrite constituant un repère constant dans la région. L'épaisseur de cette formation est de 30 mètres.

1.9.1.2.3 Le Cénomaniens moyen :

C'est une puissante formation de 650 mètres de marnes grises à micrites gris blanchâtre à fins tests de lamellibranches.

1.9.1.2.4 Le Cénomaniens inférieur :

Il s'agit des marnes grises à biomicrites argileuses grises avec des niveaux de glauconies d'empreintes d'ammonites et ayant une épaisseur de 100 mètres. L'ensemble de la formation cénomaniens affleure entre les Djebels Tafrennt et Taourirt à l'Ouest et Kef El Ahmeur et Djebel Taafist à l'Est.

1.9.1.3 Le Crétacé inférieur :

1.9.1.3.1 L'Albien :

Cette formation affleure sur le versant Sud et Sud-Est du Chélia juste en contre bas des terrains aptiens. Elle entoure régulièrement le Djebel Chélia en formant une ceinture continue au-dessus de l'Aptien. Ayant une épaisseur de 160 mètres. Elle est composée, essentiellement, d'une alternance de grès et de marnes grises, de dolomies et d'argiles.

1.9.1.3.2 L'Aptien :

Cette formation affleure sur le versant Sud et Sud-Est du Chélia juste en contre bas des terrains barrémiens. Elle est composée, essentiellement, de bas en haut par :

Des calcaires marneux ;

Des grés blancs ;

De marnes grises.

Cet étage se distingue par des calcaires fortement minéralisés ayant une épaisseur totale de 330 mètres.

1.9.1.3.3 Le Barrémien :

Il affleure au Sud et Sud-Ouest du versant du Djebel Chélia sur une distance d'environ 11 km. Il est délimité dans sa partie supérieure par la ligne de crête entre Timchtaouine et le Nord-Ouest du lieu-dit ferme Moussa El Ayat en passant par Tala Bergés. Sa lithologie est constituée, essentiellement, des matériaux détritiques (gris, calcaires gréseux, conglomérat et marnes vertes ou rouges).

1.9.1.3.4 Le Trias :

Le Trias est représenté par des masses chaotiques sans stratification (Villa, 1977), dans lesquelles divers éléments sont reconnaissables tels que des cargneules jaunâtres, des dolomies noires, des calcaires, des gypses marneux et fibreux. Tous ces éléments sont englobés dans une masse argileuse de couleur verte. Ces roches triasiques forment, en général, des diapirs marqués par un contact anormal avec les formations les plus récentes.

Les seuls épointements triasiques du territoire communal de Bouhmama se localisent au Djebel El Kanouf plus précisément à 02 km à l'Est du Marabout de Sidi Mohamed et dans la partie sommitale de Ktef Es Souda soit à 4,5 km à l'Est-Sud-Est du lieu-dit Marabout.

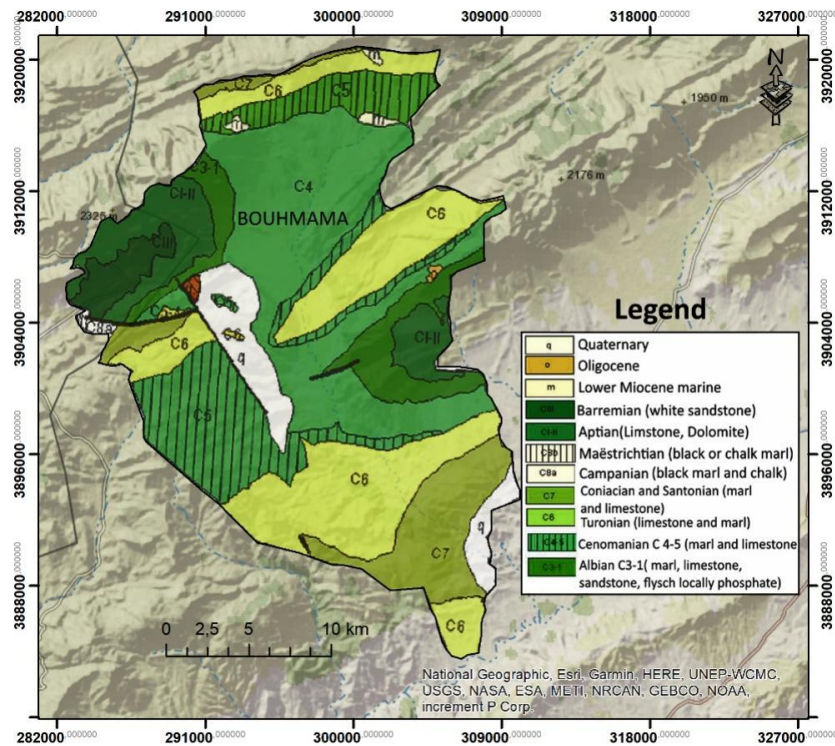


Fig 8. Carte géologique de la zone d'étude (Laffite, 1939; in Houbib, 2013; modified)

CHAPITRE

II :

Revue de littérature

CHAPITRE II : Revue de littérature

1 Introduction

La gestion durable des ressources en eau souterraine constitue un enjeu majeur pour les régions semi-arides à vocation agricole, particulièrement vulnérables aux changements climatiques et à la pression anthropique. Dans ce contexte, l'évaluation de la qualité des eaux souterraines s'avère primordiale pour garantir une utilisation sécuritaire de cette ressource précieuse, tant pour l'irrigation que pour la consommation humaine.

Cette revue de littérature vise à établir un cadre conceptuel et méthodologique pour l'étude de l'indice de qualité de l'eau souterraine dans la région de Bouhmama (Khenchela, Algérie), caractérisée par son climat semi-aride et son importante activité agricole. À travers une analyse critique des travaux scientifiques antérieurs, nous explorerons les différentes approches développées pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans des contextes similaires, les paramètres physico-chimiques déterminants, ainsi que les indices de qualité de l'eau les plus pertinents pour notre zone d'étude.

Nous examinerons également les spécificités hydrogéologiques des régions semi-arides méditerranéennes, les impacts des pratiques agricoles sur la qualité des eaux souterraines, et les défis méthodologiques liés à l'élaboration d'un indice de qualité adapté au contexte local. Cette synthèse permettra d'identifier les lacunes dans les connaissances actuelles et de justifier l'approche méthodologique adoptée dans notre étude.

2 Les sources naturelles de l'eau :

L'eau est une ressource indispensable à la vie et aux activités humaines. Les réserves naturelles d'eau constituent le fondement de l'approvisionnement en eau potable, de l'agriculture, de l'industrie et du maintien des écosystèmes. Face à la croissance démographique, au changement climatique et à la pollution, la gestion durable de ces réserves est devenue une préoccupation majeure à l'échelle globale (Global Water Forum, 2025).

Typologie des Réserves en Eau : Les réserves disponibles d'eaux naturelles se répartissent en plusieurs catégories distinctes. On distingue les eaux souterraines, issues de l'infiltration des précipitations et stockées dans les nappes phréatiques. Ces réserves souterraines représentent une source d'eau souvent plus stable et moins vulnérable aux variations climatiques de surface. Les eaux de surface comprennent quant à elles les eaux stagnantes, telles que les lacs et les retenues de barrages, et les eaux en écoulement, comme les rivières et les fleuves. Les barrages jouent un rôle crucial dans la régulation des débits et le stockage de l'eau pour divers usages (Endesa, s.d.). Enfin, l'eau de mer, bien que représentant une immense ressource, nécessite des technologies de dessalement coûteuses en énergie pour être rendue utilisable pour la consommation humaine et l'agriculture.

Caractéristiques et Composition : Les caractéristiques générales de chaque source d'eau sont étroitement liées à son interaction avec le milieu environnant. Les eaux souterraines, par exemple, acquièrent leur composition minérale en traversant les différentes couches géologiques. Les eaux naturelles contiennent des substances dissoutes, principalement des sels minéraux provenant des couches géologiques que l'eau a traversées. On y retrouve également, en faibles quantités, des éléments tels que le manganèse, le fer, le zinc, le cobalt et le plomb [5]. La qualité de l'eau est donc un facteur essentiel à considérer pour son utilisation.

Importance des Réserves en Eau : Les réserves en eau jouent un rôle fondamental dans de nombreux domaines. Leur fonction première est de fournir de l'eau potable à la population (Endesa, s.d.). Elles sont également cruciales pour l'irrigation des terres agricoles, assurant ainsi la production alimentaire (Endesa, s.d.). De plus, les retenues d'eau permettent la génération d'énergie renouvelable grâce aux centrales hydroélectriques (Endesa, s.d.). Les écosystèmes aquatiques dépendent également de ces réserves pour maintenir la biodiversité et les fonctions écologiques.

3 Les eaux souterraines :

Les eaux souterraines constituent une composante essentielle du cycle hydrologique et représentent une réserve d'eau douce stratégique à l'échelle mondiale. Leur présence dans la zone de saturation est déterminée par la perméabilité des formations géologiques et la topographie locale. Les aquifères, qui sont des formations géologiques perméables capables de stocker et de transmettre des quantités importantes d'eau, représentent les principaux réservoirs d'eaux souterraines. On distingue les aquifères libres, dont la surface supérieure (nappe

phréatique) est à pression atmosphérique, et les aquifères captifs, confinés entre deux couches imperméables et où l'eau est sous pression.

La filtration naturelle mentionnée dans le texte original est un processus complexe impliquant différents mécanismes physiques, chimiques et biologiques. Le passage de l'eau à travers les sédiments (sable, gravier) et les roches fracturées permet la décantation des matières en suspension et l'adsorption de certains contaminants. Des réactions chimiques peuvent également se produire, modifiant la composition de l'eau. Enfin, l'activité microbienne dans le sous-sol contribue à la dégradation de certaines substances organiques. L'efficacité de cette filtration dépend des caractéristiques hydrogéologiques du milieu traversé, telles que la taille des pores, la minéralogie et le temps de séjour de l'eau dans le sous-sol.

Bien que généralement protégées, les eaux souterraines ne sont pas totalement exemptes de risques de pollution. Des contaminants peuvent s'infiltrer lentement à travers le sol depuis des sources de pollution diffuses (agriculture, urbanisation) ou ponctuelles (sites industriels, décharges). La vulnérabilité des nappes phréatiques à la pollution dépend de la nature des sols sus-jacents, de la profondeur de la nappe et du type de contaminant. La gestion durable des eaux souterraines nécessite donc une protection rigoureuse des zones de captage et une surveillance régulière de leur qualité.

4 Eaux de surfaces :

Les Eaux de Surface :

Les eaux de surface constituent l'ensemble des masses d'eau qui se trouvent à la surface ou à proximité immédiate de la surface terrestre, en contact direct avec l'atmosphère. Cette catégorie hydrologique se définit par opposition aux eaux souterraines qui circulent dans les nappes phréatiques.

4.1 Définition et typologie

Les eaux de surface englobent une grande variété de formations hydriques naturelles et artificielles :

- Les cours d'eau (rivières et fleuves)
- Les étendues d'eau stagnante (mers et océans)
- Les plans d'eau intérieurs (lacs naturels)
- Les réservoirs artificiels (lacs de barrage et retenues collinaires)

- Les eaux de ruissellement qui s'écoulent après les précipitations

Cette classification s'étend également aux sources, puits et autres collecteurs d'eau qui subissent une influence directe des eaux superficielles environnantes.

4.2 Caractéristiques physico-chimiques

Les eaux de surface présentent des propriétés distinctives qui varient selon plusieurs facteurs environnementaux :

4.3 Température

Contrairement aux eaux souterraines qui maintiennent une température relativement constante, les eaux de surface connaissent des fluctuations thermiques importantes. Ces variations sont directement liées aux conditions climatiques saisonnières et aux changements météorologiques locaux.

4.4 Composition

La composition des eaux de surface se caractérise par :

- Une teneur en matières en suspension variable, fortement influencée par la pluviométrie, la nature géologique et le relief des terrains environnants
- Une concentration en sels minéraux qui dépend de la nature des sols traversés, du régime des précipitations et des rejets anthropiques
- Une richesse généralement élevée en oxygène dissous, due à leur contact permanent avec l'atmosphère
- Une faible concentration en dioxyde de carbone comparativement aux eaux souterraines

Ces caractéristiques font des eaux de surface un milieu dynamique dont les propriétés évoluent constamment sous l'influence des facteurs environnementaux et des activités humaines, contrairement aux eaux souterraines qui bénéficient d'une plus grande stabilité et protection naturelle.

Tableau 2 : principales différences entre eaux de la surface et eaux souterraines.

Caractéristiques	Eaux de surface	Eaux souterraines
Température	Variable suivant les saisons	Relativement constante
Turbidité	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle (sauf en terrain karstique)
Couleur	Liée surtout aux mes sauf dans les eaux très douces et acides (acides humiques)	Liée surtout aux matières en solution (acides humique...)
Minéralisation globale	Variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets...	Sensiblement constante en général nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région.

Fer et manganèse dissous	Généralement absents	Généralement présents
Nitrates	Peu abondants en général	Teneur parfois élevée
Micropolluants minéraux et organiques	Présents dans les eaux des pays développés, mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source.	Généralement absents mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps
Éléments vivants	Bactéries, virus	Virus, Fongus, bactéries fréquentes

4.5 Propriétés de l'eau :

Propriétés Fondamentales de l'Eau :

Propriétés Physiques de l'Eau :

L'eau, élément prédominant de notre planète, se distingue par sa phase liquide exceptionnellement abondante, conséquence directe de ses propriétés physiques remarquables

Point d'Ébullition Exceptionnellement Élevé :

Les molécules d'eau sont maintenues fermement ensemble par des liaisons hydrogène particulièrement robustes dans ses phases liquide et solide. Cette cohésion moléculaire confère à l'eau un point d'ébullition anormalement élevé pour une molécule de sa masse molaire (Ball, P. 2008). Cette caractéristique cruciale permet l'existence d'une phase liquide stable aux températures terrestres, condition sine qua non à l'émergence et au maintien de la vie telle que nous la connaissons (Finney, J. L. (2004)).

Viscosité Différentielle :

La viscosité de l'eau varie significativement selon sa composition chimique et sa température, créant parfois des interfaces entre masses d'eau non miscibles (Chen, S., & Guan, D. (2017)). Cette propriété joue un rôle fondamental dans la formation et le maintien des courants océaniques qui régulent les systèmes climatiques planétaires (Rahmstorf, S. (2006)).

Pouvoir Solvant Inégalé :

L'eau constitue le solvant universel par excellence à la surface terrestre (Chaplin, M. F. (2006)). Cette capacité exceptionnelle lui permet d'interagir avec les substrats minéraux et organiques qu'elle traverse, les dissolvant et les transportant, façonnant ainsi continuellement les paysages et les écosystèmes (Stumm, W., & Morgan, J. J. (2012)).

Tension Superficielle Remarquable :

La tension superficielle particulièrement élevée de l'eau permet la formation de gouttes distinctes et favorise le phénomène d'ascension capillaire (Vargaftik, N. B., Volkov, B. N., & Voljak, L. D. (1983)).

Cette propriété est essentielle à de nombreux processus biologiques et écologiques, notamment la circulation de la sève dans les plantes.

Chaleur Spécifique Supérieure

Avec une chaleur spécifique de $4185 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, l'eau possède la capacité thermique la plus élevée parmi tous les éléments naturels communs (Wagner, W., & Pruß, A. (2002)). Cette propriété remarquable implique qu'elle nécessite une quantité d'énergie considérable pour modifier sa température, conférant ainsi une stabilité thermique aux systèmes aqueux.

Chaleurs Latentes Importantes

Les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation de l'eau sont exceptionnellement élevées (Eisenberg, D., & Kauzmann, W. (2005)). Lors de l'évaporation, l'énergie est prélevée sur le substrat environnant, ce qui explique le refroidissement continu des océans par évaporation. Ces caractéristiques thermodynamiques font de l'hydrosphère un régulateur thermique essentiel pour la planète (Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2010)).

Capacité Thermique Exceptionnelle

Surpassant tous les autres fluides naturels en termes de capacité thermique, l'eau constitue un tampon thermique incomparable (Osterroth, S., et al. (2015)). Les grandes masses d'eau comme les océans et les lacs agissent comme des régulateurs qui atténuent les fluctuations de température, stabilisant ainsi les conditions climatiques locales et globales (Bigg, G. R. (2003)).

Transparence Sélective

L'eau présente une transparence remarquable dans le spectre de la lumière visible, permettant aux rayons solaires de pénétrer et de soutenir la photosynthèse dans les écosystèmes aquatiques. En revanche, elle absorbe efficacement le rayonnement infrarouge dès les premiers mètres de profondeur, ce qui explique pourquoi seules les couches superficielles des masses d'eau se réchauffent sous l'effet du rayonnement solaire (Pope, R. M., & Fry, E. S. (1997)).

4.6 Propriétés Chimiques de l'Eau

L'eau excelle comme solvant, dissolvant efficacement une multitude de sels, gaz et molécules organiques (Franks, F. (2000)). Cette capacité est fondamentale pour les processus biochimiques, car toutes les réactions métaboliques des organismes vivants se déroulent en milieu aqueux (Pohorille, A., & Pratt, L. R. (2012)). Contrairement à l'idée reçue d'un solvant neutre, l'eau est chimiquement réactive et peut interagir avec son environnement, notamment en dissolvant progressivement les parois des contenants comme le verre, dont les ions silicium migrent dans la solution (Bunker, B. C. (1994)).

D'un point de vue réglementaire, on peut définir une "eau pure" comme étant exempte de contaminants microbiens et chimiques. Cependant, d'un point de vue strictement chimique, l'eau absolument pure n'existe pas dans la nature ni même en laboratoire, car même l'eau distillée contient invariablement des traces infimes de substances provenant des surfaces avec lesquelles elle entre en contact (Zolotov, M. Y., & Shock, E. L. (2001)).

4.7 Propriétés Biologiques de l'Eau

L'eau, en synergie avec l'oxygène et le dioxyde de carbone, crée l'environnement optimal pour le développement et le maintien de la vie (Lynden-Bell, R. M., et al. (2010)). Elle constitue le composant volumétrique principal de tous les organismes vivants, formant l'essentiel du protoplasme cellulaire (Chaplin, M. (2006)). L'eau représente également la majeure partie de notre alimentation, constituant entre 70% et 95% de la composition des viandes, fruits et légumes que nous consommons (Jéquier, E., & Constant, F. (2010)).

Le cycle hydrologique biologique facilite une série d'échanges essentiels entre les organismes et leur environnement, soulignant la vérité fondamentale que "l'eau, c'est la vie" (Gleick, P. H. (1996)).

5 Pollution de l'eau :

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques ; elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu naturel. La pollution des eaux est provoquée par le rejet d'eau salie par nos activités domestiques (lavages et nettoyages divers, évacuation de nos urines et fèces, etc.) mais également par les diverses activités industrielles et agricoles, nécessaires pour fournir les aliments et biens dont nous avons besoin.

5.1 Pollution causée par les activités agricoles

Les pesticides (pesticides) et les herbicides (herbicides) utilisés dans les champs agricoles sont des composés naturellement difficiles à décomposer dans l'eau. Étant donné que les outils agricoles utilisés dans les terres cultivées intensivement sont généralement très durables, ils peuvent mettre des années à se décomposer. L'utilisation inconsciente d'engrais pollue les eaux souterraines et les eaux de surface, augmente la dureté de l'eau potable et cause la mort d'êtres vivants dans les lacs et les rivières. Ceux-ci provoquent à la fois une pollution des sols et une pollution des ressources en eau.

Un autre type de contamination est l'érosion. Une grande quantité de terres arables est perdue par l'érosion. La diminution de la production agricole due à la destruction des sols fertiles, la détérioration de la qualité, les carences de la chaîne alimentaire, ainsi que les sols portés par l'érosion affectent l'équilibre écologique sous-marin en créant de la turbidité dans les mers et les cours d'eau.

5.2 Pollution causée par les activités industrielles

Comme on le sait, l'eau industrielle est un facteur important de la consommation d'eau dans le monde, et à mesure que les pays se développent technologiquement, les besoins en eau des industries augmentent.

Chaque processus industriel (production) introduit des déchets qui peuvent être nocifs pour le système hydrique naturel. Etant donné que les eaux rejetées à usage industriel seront de qualités différentes selon les lieux d'utilisation, on peut les collecter en trois groupes principaux selon les types de polluants et les charges qu'elles véhiculent :

Déchets de processus de production : Chaque industrie a ses propres eaux usées spécifiques. Les eaux usées générées sur la base de la production sont qualifiées d'eaux usées de procédé. Eaux usées de traitement ; Il comprend diverses matières premières, des déchets intermédiaires et des déchets de produits finis. Les eaux de traitement contiennent des déchets inorganiques et organiques.

Eaux de refroidissement : Ces eaux sont propres et ne font qu'augmenter la température des eaux de surface. Avec la montée en température, deux problèmes se posent :

La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue.

L'augmentation de la température accélère l'activité biologique et provoque une diminution de l'oxygène dans les eaux usées.

Déchets liés au nettoyage et à l'utilisation sanitaire des lieux de travail et des employés : 10 % de cette eau provient du lavage des sols et des robinets, 90 % des salles de bains et des toilettes. Les eaux usées industrielles contenant divers produits chimiques ont des effets négatifs sur les eaux de surface. Il n'est donc pas possible pour ces eaux de se purifier biologiquement.

Il ne faut pas oublier que l'utilisation excessive de détergents, de savons et de produits de nettoyage dans les maisons, de matériaux tels que les déchets de médicaments, les piles, l'huile brûlée, ainsi que l'eau de pluie, provoque la pollution des eaux souterraines et des eaux de surface.

Pollution causée par les déchets dans les zones résidentielles :

La somme de l'eau fournie au système d'égout à partir de sources humaines (anthropiques) est appelée eaux usées. Ce sont des eaux très polluées où se rassemblent de nombreux rejets d'une colonie. Ils contiennent des acides solubles dans l'eau, ainsi que des solides insolubles dans l'eau, des liquides, des suspensions, des émulsions et une grande variété de bactéries nocives et

inoffensives. Cette eau était autrefois déversée dans une rivière ou un lac voisin qui passait à proximité par le réseau d'égouts.

Les bactéries, en particulier les bactéries coli, qui proviennent des intestins des humains et des animaux et se trouvent en grand nombre, se trouvent également dans les eaux usées domestiques, qui sont normalement inoffensives. Bien que les microbes pathogènes dans les stations d'épuration biologique soient rendus inoffensifs, ils ne peuvent pas être complètement éliminés.

6 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) :

La gestion de la qualité de l'eau nécessite la collecte et l'analyse de grandes bases de données sur la qualité de l'eau, ce qui peut être difficile à évaluer et à synthétiser. Divers outils ont été développés pour évaluer les données sur la qualité de l'eau ; le modèle de l'indice de qualité de l'eau (WQI) en est un exemple.

L'indice de qualité de l'eau (IQE), ou Water Quality Index (WQI) en anglais, est un outil qui permet de résumer la qualité globale de l'eau en un seul chiffre ou une seule note. Il est basé sur l'analyse de plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques (comme le pH, les nitrates, les phosphates, la turbidité, les matières dissoutes, etc.).

C'est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison de paramètres de qualité de l'eau avec des normes de qualité. L'IQE permet ainsi d'obtenir une indication simple (par exemple : excellente, bonne, mauvaise) de la qualité de l'eau, ce qui le rend facilement compréhensible pour les gestionnaires et les décideurs. Il peut être utilisé pour évaluer l'influence de facteurs naturels et humains sur la qualité des eaux.

6.1 Une brève histoire des modèles WQI

L'historique du développement du modèle WQI est présenté graphiquement dans la figure 9. Bien que les modèles WQI n'aient été développés qu'au cours des 50 dernières années, les indices de qualité de l'eau étaient utilisés pour la classification de la qualité de l'eau dès le milieu du XIXe siècle (Abbasi et Abassi, 2012).

Horton a développé le premier modèle WQI dans les années 1960, basé sur dix paramètres de qualité de l'eau jugés significatifs dans la plupart des plans d'eau (Horton, 1965).

Brown, avec le soutien de la Foundation National de Sanitation, a développé une version plus rigoureuse du modèle d'indice de qualité de l'eau (WQI) de Horton, appelée NSF-WQI, pour laquelle un panel de 142 experts en qualité de l'eau a contribué à la sélection et à la pondération des paramètres (Abbasi et Abbasi, 2012). Plusieurs autres modèles de WQI se sont ensuite inspirés du NSF-WQI. En 1973, le Scottish Research Development Department (SRDD) a développé son propre indice, le SRDD-WQI, qui s'appuyait également en partie sur le modèle de Brown et l'a utilisé pour évaluer la qualité des eaux fluviales. L'indice de Bascaron (1979), l'indice de House (1986) et l'indice de Dalmatie (Štambuk-Giljanović, 2003) sont tous des dérivés ultérieurs du SRDD-WQI. Steinhart et al. (1982) ont ensuite développé le modèle d'indice de qualité environnementale (Environmental Quality Index) pour évaluer la qualité de l'eau des écosystèmes des Grands Lacs.

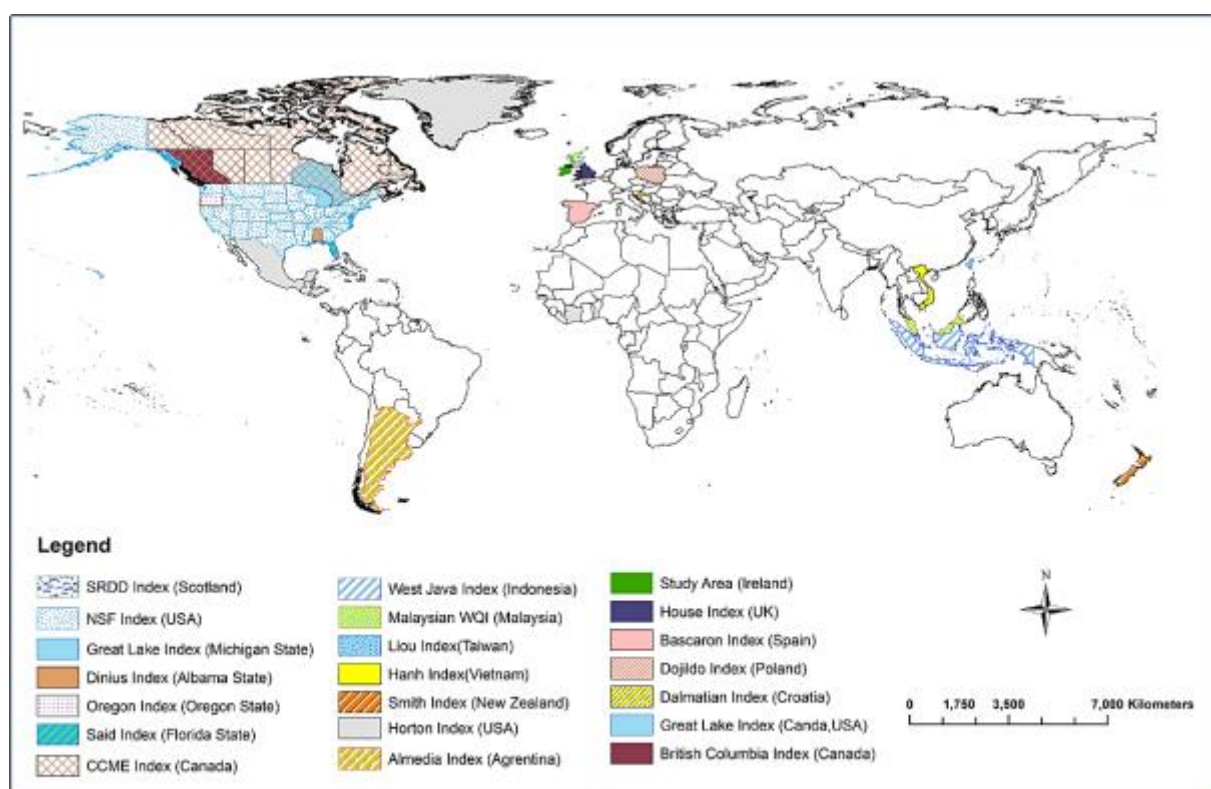


Fig. 9 Modèles WQI les plus couramment utilisés et régions d'utilisation (1960-2020)

Une autre avancée importante fut l'indice de qualité de l'eau de la Colombie-Britannique (British Columbia WQI, BCWQI), développé par le ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique au milieu des années 1990. Cet indice a été utilisé pour évaluer l'état de qualité de nombreux plans d'eau dans la province de Colombie-Britannique, au Canada (Saffran et al., 2001). Le modèle BCWQI a été reconnu dès 1990 par le CCME (Conseil canadien des ministres de l'environnement) (Dunn, 1995).

À ce jour, plus de 35 modèles d'indice de qualité de l'eau (WQI) ont été développés par différents pays et/ou agences pour évaluer la qualité des eaux de surface à travers le monde (Abbasi et Abbasi, 2012 ; Dadolahi-Sohrab et al., 2012 ; Kannel et al., 2007 ; Stoner, 1978). Ces modèles ont été utilisés dans la plupart des régions du monde.

Le Tableau 3 révèle que, bien que les WQI aient été appliqués à tous les types majeurs de masses d'eau, 82 % des études concernent l'évaluation de la qualité des eaux fluviales. Par ailleurs, ce tableau indique que les modèles CCME et NSF ont été utilisés dans 50 % des études examinées.

Tableau 3. Sommaire des modèles WQI appliquées (1960-2019)

WQI model	Nombre d'application	Type de la zone d'étude		
		Rivière	Lac	Marine/coastal/sea
CCME	36	28	5	3
NSF	18	17	1	–
FIS	12	10	1	1
MWQI	8	6	1	1
Horton	7	6	–	1
SRDD	6	6	–	–
Bascaron	4	3	–	1
EQI	2	1	1	–
Oregon	2	2	–	–
Smith	2	2	–	–
Almedia	1	1	–	–
BCWQI	1	1	–	–
Dalmatian	1	–	–	1
Dojildo	1	1	–	–
Dinius	1	1	–	–
Hanh index	1	1	–	–
House index	1	1	–	–
Liou index	1	1	–	–
Said	1	–	–	1
WJWQI	1	–	–	1

6.2 Structure du modèle IQE :

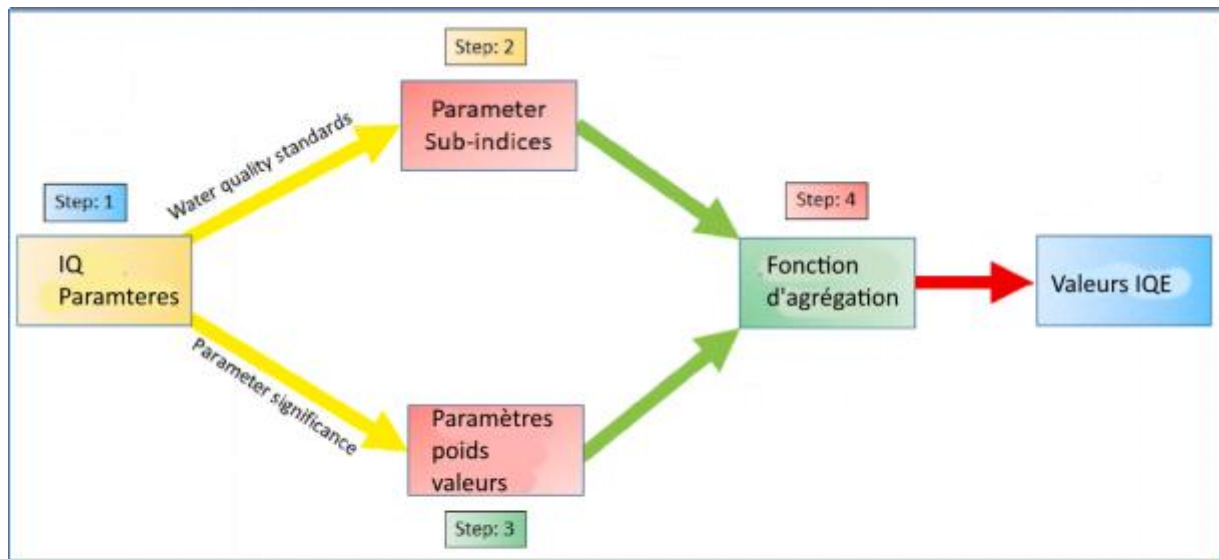


Fig. 10 Structure générale du modèle IQE

La structure générale des modèles d'IQE (Indice de Qualité de l'Eau) est illustrée dans la Fig. 10 et révèle que la plupart des IQE comportent quatre étapes principales (Abbasi et Abbasi, 2012 ; Abrahao et al., 2007 ; Lumb et al., 2011 ; Sutadian et al., 2018), à savoir :

- Sélection des paramètres de qualité de l'eau : un ou plusieurs paramètres de qualité de l'eau sont sélectionnés pour être inclus dans l'évaluation.
- Génération des sous-indices des paramètres : les concentrations des paramètres sont converties en sous-indices sans unité.
- Attribution des valeurs de pondération des paramètres : les paramètres sont pondérés en fonction de leur importance dans l'évaluation.
- Calcul de l'indice de qualité de l'eau à l'aide d'une fonction d'agrégation :
- Les sous-indices individuels des paramètres sont combinés à l'aide des pondérations pour obtenir un indice global unique.
- Une échelle de notation est généralement utilisée pour catégoriser/classer la qualité de l'eau en fonction de la valeur de l'indice global.

6.3 Paramètres de sélection :

La sélection des paramètres constitue la première étape du processus de calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI). Une variation considérable a été observée entre les différents modèles, tant en ce qui concerne le type et le nombre de paramètres sélectionnés que les raisons justifiant

leur choix. Les paramètres les plus couramment inclus étaient la température, la turbidité, le pH, les matières en suspension (SS), les solides dissous totaux (TDS), les coliformes fécaux (FC), l'oxygène dissous (DO), la demande biologique en oxygène (DBO) et l'azote nitrique ($\text{NH}_3\text{-N}$). La plupart des modèles utilisaient entre huit et onze paramètres de qualité de l'eau.

Les paramètres du modèle IQE étaient généralement sélectionnés en fonction de la disponibilité des données, de l'avis d'experts ou de l'importance environnementale d'un paramètre de qualité de l'eau.

6.4 Sous-indication :

L'objectif principal du processus de sous-indication est de convertir les concentrations des paramètres en valeurs sans unité, appelées sous-indices des paramètres (Abbasi et Abbasi, 2012). Plusieurs modèles d'indices de qualité de l'eau (WQI) ont utilisé les valeurs guides standard de la qualité de l'eau pour établir ces sous-indices (Liou et al., 2004 ; Abbasi et Abbasi, 2012 ; Sutadian et al., 2016).

Concentrations des paramètres :

Le processus de sous-indice le plus simple, utilisé par l'indice de Horton, l'indice de Dinius, l'indice de Dalmatien, l'indice de Liou et l'indice de Said, utilisait directement les concentrations des paramètres mesurés comme valeurs de sous-indice, sans aucun processus de conversion.

6.5 Fonctions interpolées linéaires :

*Le modèle NSF a calculé les valeurs des sous-indices de manière linéaire en se basant sur les plages de paramètres définies par les normes de qualité de l'eau (Effendi & Romanto Wardiatno, 2015 ; Lobato et al., 2015 ; Tomas et al., 2017). L'échelle des sous-indices s'étendait de 0 à 100 : lorsque les concentrations des paramètres étaient inférieures aux seuils recommandés, le sous-indice recevait la valeur maximale de 100 ; dans le cas contraire, il était automatiquement fixé à 0 (Hoseinzadeh et al., 2015 ; Lobato et al., 2015 ; Misaghi et al., 2017 ; Medeiros et al., 2017). Quant au modèle IQE de Java occidental, il employait une interpolation linéaire simple, calculant les sous-indices à l'aide des équations (1) et (2).

$$S_i = S_1 - \left[(S_1 - S_2) \left(\frac{X_i - X_1}{X_2 - X_1} \right) \right] \quad (1)$$

$$S_i = S_1 - \left[(S_1 - S_2) \left(\frac{X_1 - X_i}{X_1 - X_2} \right) \right] \quad (2)$$

S_i désigne le sous-indice associé au paramètre *i* de qualité de l'eau, déterminé en fonction de sa concentration mesurée (X_i). Les valeurs extrêmes du sous-indice (S_1 et S_2) correspondent aux seuils réglementaires (X_1 et X_2) établis pour ce paramètre. Si la mesure excède la valeur guide maximale, le calcul repose sur l'équation (1) ; dans le cas contraire, c'est l'équation (2) qui est employée (Dunnette, 1979 ; Sutadian et al., 2016).

Liou et al. (2004) ont recommandé l'équation (3) pour obtenir la valeur du sous-indice pour le paramètre i :

$$S_i = \frac{P_c}{M_{pl}} \quad (3)$$

Où P_c est la valeur mesurée et M_{pl} est la limite maximale admissible (mg/L) du paramètre de qualité de l'eau.

6.6 Fonctions de courbe de notation

Plusieurs indices, tels que l'Indice de Qualité Environnementale (IQE) ou le Great Lakes Nearshore Index (GLNI) (Schierow & Chesters, 1988) et le Malaysian River Water Quality Index (MRWQI) (Fulazzaky et al., 2010 ; Gazzaz et al., 2012 ; Hasan et al., 2015 ; Naubi et al., 2016 ; Othman & Alaa Eldin, 2012 ; Shuhaimi-Othman et al., 2007 ; Sim et al., 2015 ; Amneera et al., 2013), ont recours à des courbes de notation pour normaliser les mesures des paramètres physico-chimiques en scores sans dimension (Sutadian et al., 2017).

6.7 Pondération des paramètres

En règle générale, le poids attribué à chaque paramètre est déterminé selon sa contribution significative à l'évaluation de la qualité de l'eau, ainsi que des directives réglementaires applicables (Sarkar et Abbasi, 2006).

Les modèles d'IQE utilisent majoritairement une approche de pondération hétérogène, tout en normalisant la somme des poids attribués aux différents paramètres à la valeur 1. La fonction

d'agrégation (étape 4) joue un rôle clé dans le calcul de l'indice, car les poids attribués aux paramètres en affectent directement le résultat final. Pour renforcer la robustesse des modèles IQE, une pondération différentielle des paramètres – avec des valeurs soigneusement calibrées – s'avère essentielle. Cette méthode limite les incertitudes et garantit une meilleure cohérence du modèle.

De nombreux modèles IQE ont utilisé l'avis d'experts pour éclairer le processus de pondération des paramètres (Sarkar et Abbasi, 2006).

6.8 Fonctions d'agrégation

Le processus d'agrégation constitue l'étape finale du modèle WQI. Il permet d'agréger les sous-indices de paramètres en un seul indice de qualité de l'eau (Sutadian et al., 2016). La plupart des modèles utilisent des fonctions additives, des fonctions multiplicatives ou une combinaison des deux.

Fonctions additives

Plusieurs modèles IQE (par exemple, le modèle Horton, le modèle SRDD, l'indice NSF (version antérieure), l'indice House, les modèles malaisien et dalmatien) utilisaient une fonction d'agrégation additive simple exprimée comme suit :

$$WQI = \sum_{i=1}^n s_i w_i \quad (4)$$

Où s_i est la valeur du sous-indice du paramètre i , w_i (qui va de 0 à 1) est la valeur de pondération du paramètre correspondant et n est le nombre total de paramètres.

Fonctions multiplicatives :

Certains modèles (par exemple, le NSF, l'indice West Java et le modèle d'indice Liou) ont utilisé une fonction d'agrégation multiplicative exprimée comme suit :

$$WQI = \prod_{i=1}^n s_i^{w_i} \quad (5)$$

Fonctions d'agrégation combinées :

Des approches hybrides d'agrégation, intégrant à la fois des fonctions additives et multiplicatives, ont été développées pour le calcul des indices de qualité de l'eau (Abbasi & Abbasi, 2012 ; Swamee & Tyagi, 2000). Cette méthodologie combinée a notamment fait ses preuves dans les travaux de Liou et al. (2004), Ewaid et Abed (2017) et Alobaidy et al. (2010) concernant l'évaluation de la qualité des ressources hydriques taïwanaises. Le modèle NSF illustre parfaitement cette double approche mathématique.

La racine carrée de la moyenne harmonique (Éq.6), recommandée par Cude (2001) et l'indice Dojlido (1994), a servi de fonction d'agrégation. Dojlido et al. (1995) l'ont adaptée pour le modèle Oregon IQE, tandis que Pham et al. (2011) l'ont appliquée au modèle Hanh. Son expression formelle est :

$$WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i}}} \quad (6)$$

Fonction minimale de l'opérateur :

Dans son approche, Smith (1990) utilise un opérateur de minimum (Éq. 7) prenant comme valeur IQE finale le sous-indice paramétrique minimal. Conçu initialement pour les rivières de Nouvelle-Zélande, ce modèle se formalise ainsi :

$$WQI = \text{Min}(s_i, s_{i+1}, s_{i+2} \dots \dots \dots I_{mb_n}) \quad (7)$$

Fonctions d'agrégation linéaires/non linéaires uniques :

Certains modèles d'indice de qualité de l'eau se distinguent par l'application de fonctions d'agrégation originales, tantôt linéaires, tantôt non linéaires. C'est le cas notamment de l'indice Said (Éq. 8) qui, après avoir considéré les concentrations paramétriques comme valeurs de sous-indices, calcule l'IQE final grâce à une fonction logarithmique particulière, selon la formulation suivante (Said et al., 2004)

$$WQI = \log \left[\frac{(DO)^{1.5}}{(3.8)^{TP} (Turb)^{0.15} (15)^{\text{fecal}/10000} + 0.14(SC)^{0.5}} \right] \quad (8)$$

Les variables représentent les sous-indices des paramètres suivants :

DO : oxygène dissous (en % de saturation)

Turbi : turbidité (UNT - méthode néphélométrique)

TP : concentration en phosphates totaux (mg P/L)

Fecal : abondance des coliformes fécaux (UFC/100 mL)

SC : conductivité spécifique normalisée à 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

6.9 Sélection des paramètres

Les IQE présentent une variabilité importante dans le nombre de paramètres considérés. Si des modèles comme les indices CCME et Said se limitent à quatre paramètres (nombre insuffisant pour une évaluation complète intégrant tous les facteurs naturels et anthropiques), d'autres comme l'indice WJ en exigent 26 (nombre souvent prohibitif en pratique). La sélection des paramètres résulte généralement d'un consensus d'experts, pondéré par la faisabilité opérationnelle du monitoring.

L'accès limité aux données complique la sélection des paramètres dans les IQE. Certains modèles exigent des mesures complexes (physico-chimiques, biologiques, etc.), difficiles à obtenir dans les pays en développement faute de moyens financiers et techniques. Les erreurs de monitoring (mauvais échantillonnage, équipements mal calibrés, gestion défaillante des données) aggravent ces contraintes (Ongley & Booty, 1999 ; Department of Water, 2009). L'absence d'infrastructures adaptées et de gouvernance efficace restreint davantage les capacités analytiques (Debels et al., 2005).

Conclusion :

Du fait de leur simplicité d'utilisation et de la facilité d'interprétation de leurs résultats, les indices de qualité de l'eau (IQE) connaissent une utilisation répandue. Face à la multiplicité des versions existantes, cette étude propose une analyse critique des architectures et des approches mathématiques sous-jacentes à ces différents modèles.

CHAPITRE III :

Analyse spatiale et évaluation de l'indice de qualité de l'eau IQE

1 Introduction

L'eau souterraine constitue une ressource essentielle pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et l'industrie, en particulier dans les régions arides et semi-arides comme le Nord-Est algérien. Dans ce contexte, la plaine de Bouhmama, située dans la wilaya de Khenchela, représente une zone stratégique dont les ressources hydriques souterraines sont de plus en plus sollicitées. Cependant, la qualité de ces eaux subit une pression croissante due à divers facteurs, notamment les activités anthropiques, les pratiques agricoles intensives et les conditions climatiques variables.

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est un outil synthétique permettant d'évaluer globalement la potabilité des eaux souterraines à partir d'un ensemble de paramètres physico-chimiques. Il permet non seulement d'interpréter la qualité de l'eau à un moment donné, mais aussi de suivre son évolution dans le temps et l'espace. L'analyse spatio-temporelle de cet indice dans la plaine de Bouhmama vise ainsi à identifier les zones à risque, à détecter les tendances de dégradation ou d'amélioration de la qualité, et à fournir des indications précieuses pour une gestion durable de cette ressource vitale.

Ce chapitre se propose donc d'étudier l'évolution spatio-temporelle de l'indice de qualité de l'eau souterraine dans la plaine de Bouhmama, en s'appuyant sur des données de terrain collectées à différentes périodes et localisations. L'objectif est de mettre en évidence les variations spatio-temporelles significatives, de comprendre les facteurs qui les influencent, et d'orienter les actions de préservation et d'aménagement en matière de gestion des eaux souterraines.

2 Matériels et méthodes :

2.1 Collection des données :

Dans cette étude, nous avons utilisé les données issues des analyses physico-chimiques réalisées à partir d'échantillons prélevés dans des forages captant la nappe alluviale de Mellagou (Bouhmama), lors de deux campagnes distinctes : la première en mars 2014 et la seconde en juin 2023. La base de données comprend au total 35 échantillons, répartis comme suit : 20 échantillons collectés en 2014 et 15 en 2023 (Figure 11 a,b).

Les paramètres physico-chimiques mesurés in situ incluent le pH, la conductivité électrique (CE) et la température (T). Par ailleurs, les concentrations en ions majeurs ont été déterminées en laboratoire : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), bicarbonates (HCO_3^-), nitrates (NO_3^-), ainsi que la dureté totale (TH). L'erreur d'équilibre ionique observée reste dans la limite acceptable de $\pm 5\%$, ce qui atteste de la fiabilité des données analysées.

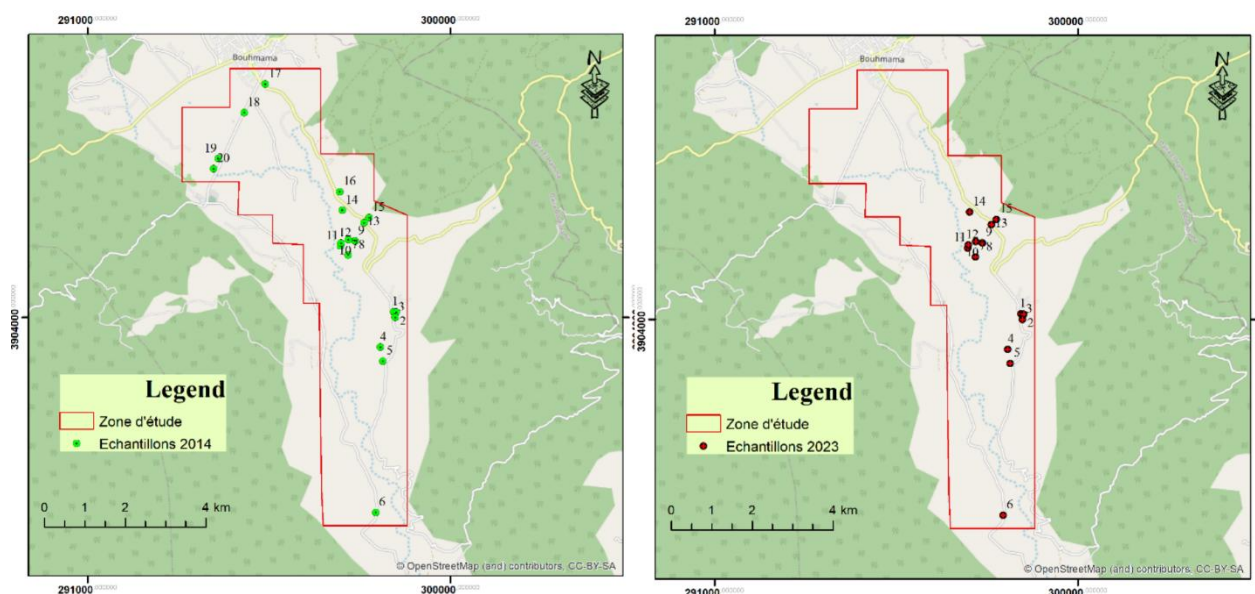


Fig. 11 a, b Inventaires des échantillons

Les résultats ont été traités, interprétés et présentés sous forme de tableaux et de cartes thématiques générées à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG), en l'occurrence le logiciel ArcGIS. Ces représentations permettent d'évaluer la qualité des eaux souterraines et son évolution spatio-temporelle dans la plaine de Bouhmama.

3 Cartographie des éléments physico chimique 2014 et 2023

Les cartes de distribution spatiale des paramètres physico-chimiques ainsi que de l'indice de qualité de l'eau ont été élaborées à l'aide de la méthode d'interpolation par pondération inverse de la distance (IDW). Cette technique déterministe d'interpolation multivariée repose sur le principe selon lequel l'influence d'un point d'observation diminue avec l'éloignement (Benjamin, 2007). La méthode IDW a démontré son efficacité dans de nombreuses études similaires (Madenea et al, 2022), et a été largement utilisée par plusieurs chercheurs pour

estimer la distribution spatiale de la qualité des eaux souterraines (Venkatramanan et al. 2016; Hamouche et al. 2021; Koussa & Berhail 2021).

3.1 Calcium Ca^{2+}

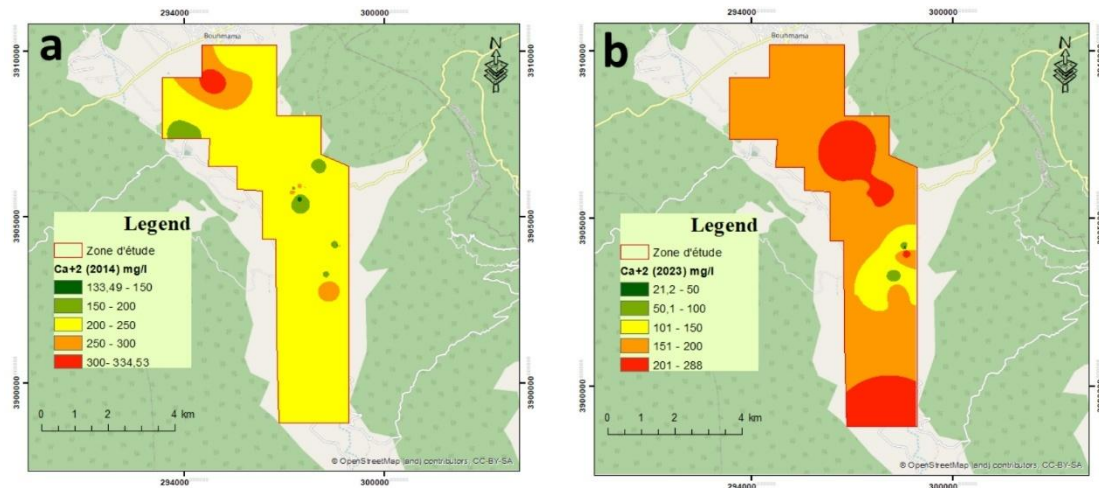


Fig. 12 a, b : Distribution spatiotemporelle de Calcium dans la plaine de Bouhmama

La distribution spatiale de calcium en 2023 révèle une distribution spatiale bipolaire du calcium avec deux zones de très fortes concentrations (>200 mg/L) situées aux extrémités nord et sud de la zone d'étude, reliées par un corridor central de concentrations modérées (50-150 mg/L). Cette organisation spatiale suggère un contrôle géologique différentiel, probablement lié à la présence de formations carbonatées aux extrémités et à des conditions d'écoulement souterrain qui favorisent le lessivage dans l'axe central.

La carte de 2014 présente une distribution spatiale du calcium radicalement différente de celle de 2023, avec une concentration généralisée dans les classes élevées (200-250 mg/L en jaune dominant) sur la majeure partie de la zone d'étude. La distribution est caractérisée par une anomalie ponctuelle de très forte concentration (300-334 mg/L en rouge) localisée dans la partie nord-ouest, entourée d'une auréole orange (250-300 mg/L). Contrairement au pattern bipolaire observé en 2023, l'organisation spatiale de 2014 montre une homogénéisation relative des concentrations à un niveau élevé, avec seulement quelques points isolés de concentrations plus modérées (133-200 mg/L en vert) dispersés dans la zone centrale.

3.2 Magnesium Mg^{2+}

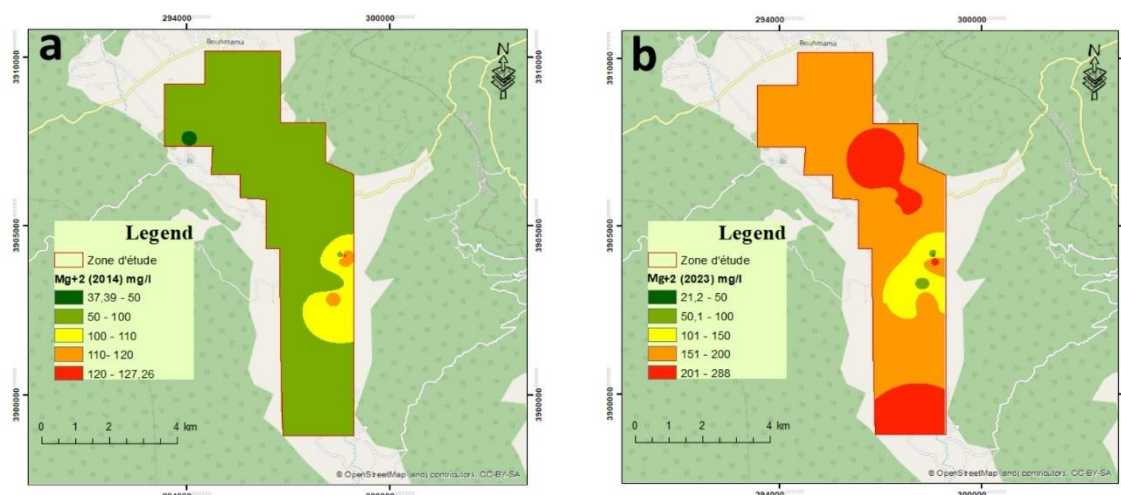


Fig. 13 a, b : Distribution spatiotemporelle de Magnésium dans la plaine de Bouhmama

La comparaison entre le magnésium en 2014 et en 2023 (Figure 13, a et b) révèle une évolution géochimique majeure avec une augmentation générale des concentrations et une redistribution spatiale significative. En 2014, le magnésium présentait un gradient nord-sud décroissant avec des concentrations maximales de 127 mg/L au nord et des valeurs minimales (37-50 mg/L) au sud, suggérant un écoulement unidirectionnel avec lessivage progressif. En 2023, la distribution devient bipolaire avec des concentrations maximales similaires (201-288 mg/L) aux extrémités nord et sud, une augmentation globale des teneurs d'un facteur 2 à 4, et l'apparition d'un corridor central de concentrations intermédiaires (101-200 mg/L). Cette transformation spatiale et quantitative indique une modification profonde du système hydrogéochimique sur la période 2014-2023, possiblement liée à des changements dans les conditions d'écoulement souterrain, l'évolution de la recharge, ou l'activation de nouvelles sources de minéralisation magnésienne, traduisant la dynamique temporelle complexe de cet aquifère.

3.3 Sodium Na⁺ :

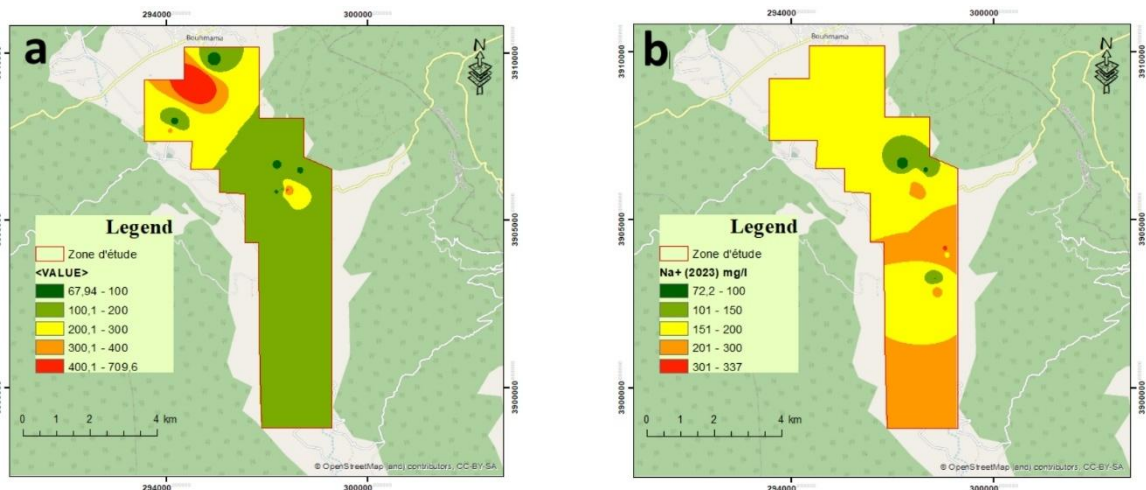


Fig. 14 a, b Distribution spatiotemporelle de Sodium dans la plaine de Bouhmama

L'analyse comparative des deux cartes (figure 14 a, b) révèle une évolution significative de la distribution du sodium dans les eaux souterraines de la région de Mellagou, caractérisée par une diminution globale des concentrations maximales de 709,6 mg/l à 337 mg/l (-52,5%) et une migration apparente des zones de forte concentration du nord vers le sud. Initialement, les concentrations les plus élevées (>400 mg/l) se localisaient au nord de la zone d'étude avec un gradient décroissant vers le sud, tandis qu'en 2023, cette distribution s'est inversée avec des concentrations moyennes au nord (151-200 mg/l) et une augmentation vers le sud (201-300 mg/l). Cette évolution spatio-temporelle suggère un système aquifère dynamique avec des processus de transport actifs, probablement liés à l'écoulement souterrain dirigé nord-sud et à une possible dilution par recharge d'eaux moins minéralisées au nord.

3.4 Potassium K⁺ :

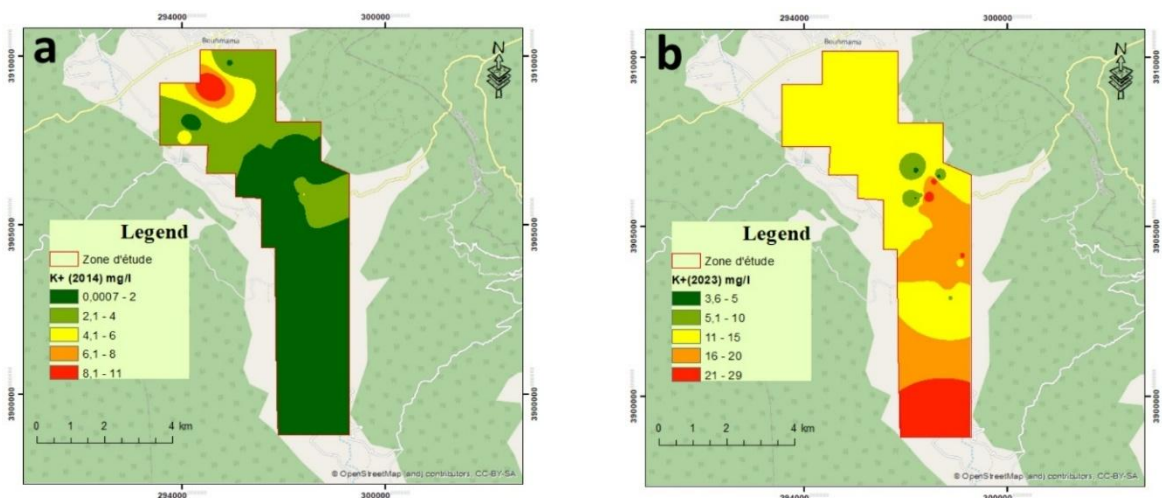


Fig. 15 a, b Distribution spatiotemporelle de Potassium dans la plaine de Bouhmama

L'analyse comparative des concentrations de potassium dans les eaux souterraines entre 2014 et 2023 (figure 15 a, b) révèle une transformation dramatique du système hydrogéologique, caractérisée par une augmentation massive des concentrations et une inversion complète du gradient spatial où les zones de forte concentration ont migré du nord (hotspot localisé de 8,1-11 mg/l en 2014) vers le sud (zone étendue de 21-29 mg/l en 2023). Cette évolution spatio-temporelle suggère soit une intensification des apports anthropiques liés aux pratiques agricoles (fertilisation potassique), soit une modification des processus géochimiques naturels (altération minérale, échanges ioniques), accompagnée d'un probable transport advectif nord-sud des eaux souterraines.

3.5 Chlorures Cl⁻ :

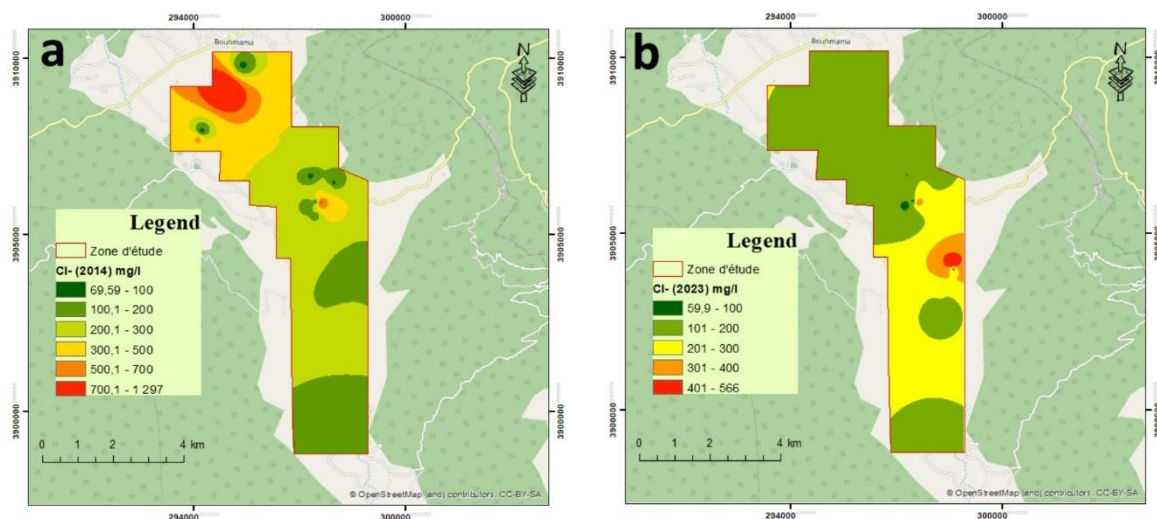


Fig. 16 a, b Distribution spatiotemporelle de Chlorures dans la plaine de Bouhmama

Dans la plaine de Bouhmama, les cartes de concentration en chlorures des eaux souterraines (Figure 16 a, b) de 2014 et 2023 révèlent une évolution notable. En 2014, des concentrations très élevées (supérieures à 700 mg/l, voire plus de 1297 mg/l) étaient localisées principalement dans la partie nord de la zone d'étude, tandis que le centre et le sud présentaient des valeurs plus faibles (entre 69,59 et 300 mg/l). En revanche, la carte de 2023 indique une diminution significative des zones à très fortes concentrations, les valeurs maximales se situant désormais entre 401 et 566 mg/l, et ces zones étant plus localisées au centre-est. Parallèlement, une expansion des zones de concentration modérée à élevée (201-300 mg/l) est observée dans la partie centrale et sud de la plaine en 2023, suggérant une redistribution des chlorures ou une légère augmentation générale dans ces secteurs, malgré la réduction des pics extrêmes.

3.6 Sulfates SO_4^{2-} :

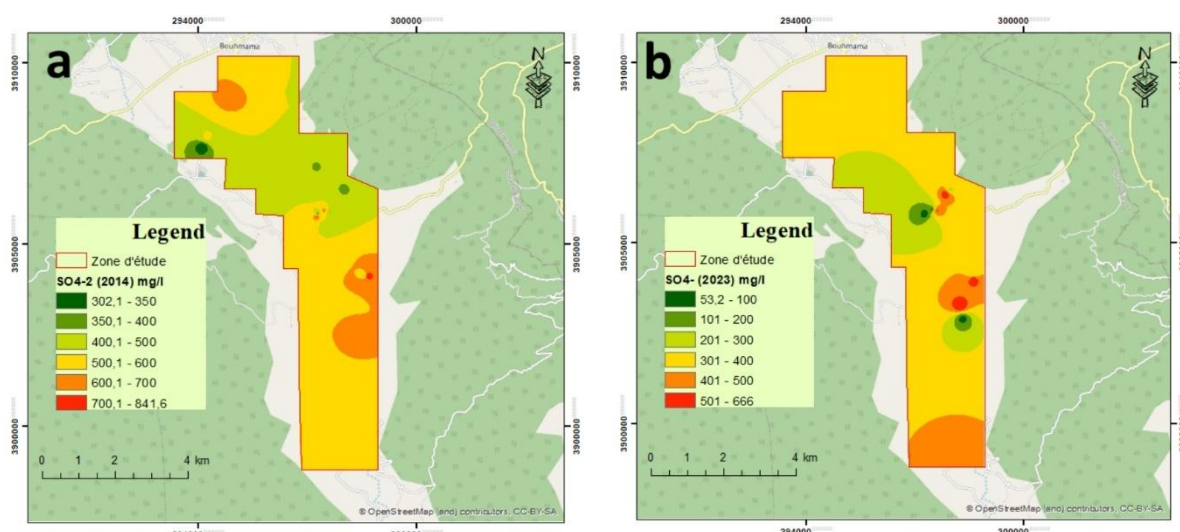


Fig. 17 a, b Distribution spatiotemporelle des sulfates dans la plaine de Bouhmama

Dans la plaine de Bouhmama, les cartes de concentration en sulfates (SO_4^{2-}) des eaux souterraines de 2014 et 2023 (figure 17 a et b) montrent des changements significatifs. En 2014, les concentrations les plus élevées (allant de 600 à 841,6 mg/l) se trouvaient dans la partie nord et ponctuellement au centre-est, tandis que la majeure partie de la plaine affichait des valeurs de 400 à 600 mg/l. En comparaison, la carte de 2023 révèle une réduction générale des concentrations maximales, les pics les plus élevés se situant désormais entre 501 et 666 mg/l dans des zones plus restreintes au sud-est et au centre-est. Une large partie de la zone d'étude en 2023 présente des concentrations entre 301 et 500 mg/l, et des zones avec des valeurs plus faibles (entre 53,2 et 200 mg/l) apparaissent notamment au nord-ouest et ponctuellement au centre. Cette évolution suggère une diminution globale des concentrations de sulfates les plus élevées et une redistribution vers des valeurs plus modérées sur l'ensemble de la plaine entre 2014 et 2023.

3.7 Bicarbonate HCO_3^- :

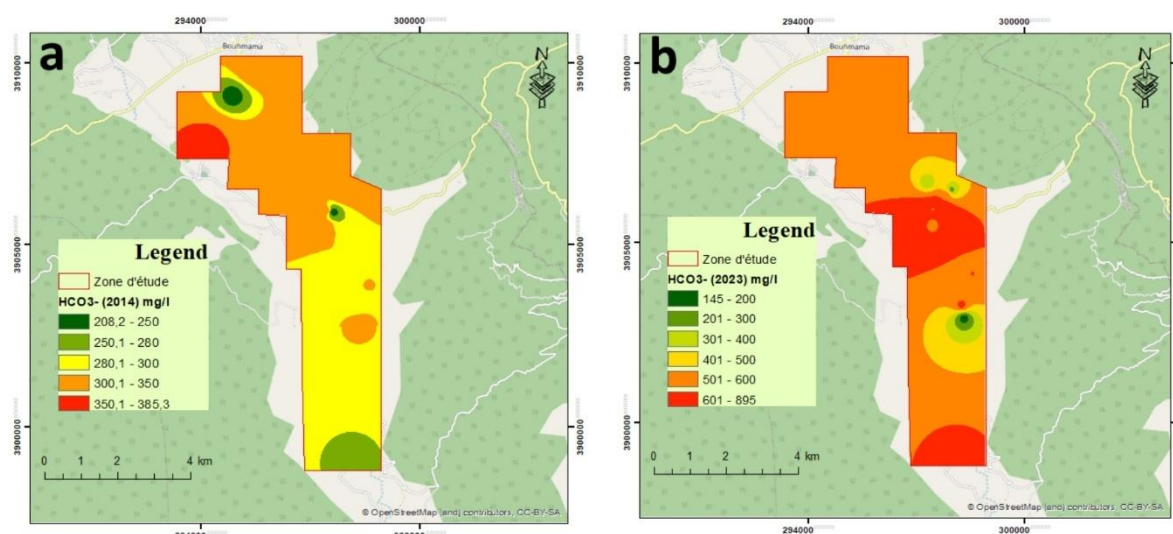


Fig. 18 a, b Distribution spatiotemporelle des Bicarbonates dans la plaine de Bouhmama

Dans la plaine de Bouhmama, les cartes de concentration en bicarbonates (HCO_3^-) des eaux souterraines pour les années 2014 et 2023 (figure 18 a et b) mettent en évidence une augmentation générale et une redistribution des concentrations. En 2014, les valeurs les plus élevées (allant de 300,1 à 385,3 mg/l) étaient principalement localisées dans les parties nord et centrale de la zone d'étude, avec des concentrations plus faibles (208,2 à 300 mg/l) dans le reste de la plaine. En revanche, la carte de 2023 révèle une nette progression des concentrations de bicarbonates. Les zones de très fortes concentrations (601 à 895 mg/l) sont beaucoup plus étendues, couvrant une grande partie du nord, du centre et du sud de la plaine. Les concentrations intermédiaires (401 à 600 mg/l) dominent les secteurs où les valeurs étaient auparavant plus modérées. Seules quelques petites zones isolées au centre-nord et au centre-est maintiennent des concentrations plus faibles (145 à 400 mg/l). Cette évolution suggère une tendance générale à l'enrichissement des eaux souterraines en bicarbonates sur l'ensemble de la plaine de Bouhmama entre 2014 et 2023.

3.8 Nitrates NO₃- :

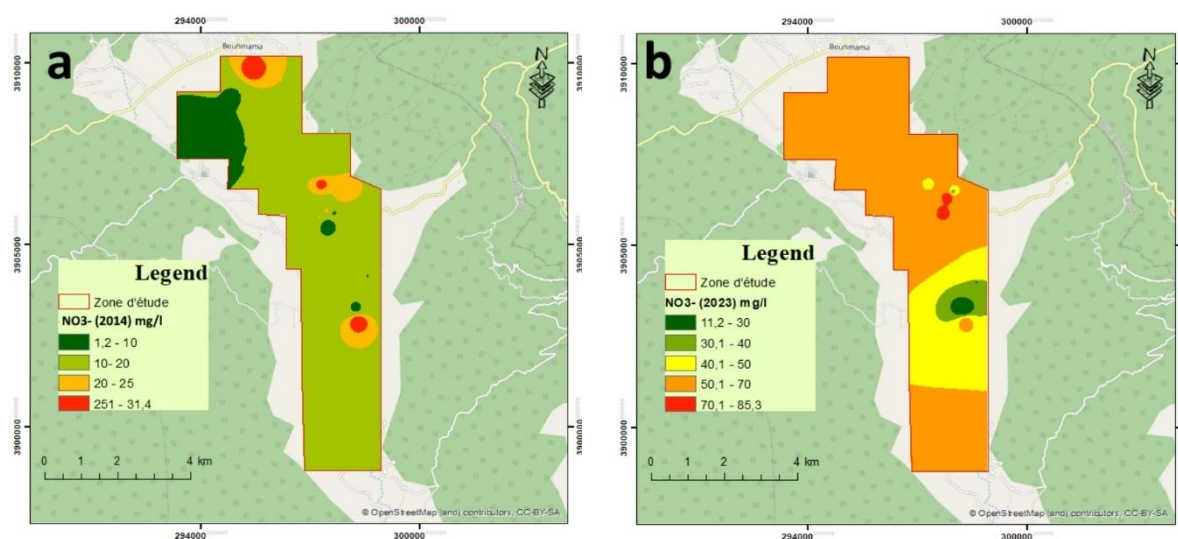


Fig. 19 a, b Distribution spatiotemporelle des Nitrates dans la plaine de Bouhmama

L'analyse spatio-temporelle des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Bouhmama (figure 19 a, b) révèle une dégradation alarmante de la qualité hydrogéologique entre 2014 et 2023, caractérisée par une augmentation drastique des concentrations moyennes (multiplication par un facteur 3 à 4) et un élargissement critique de l'emprise spatiale de la contamination. En 2014, le système aquifère présentait un état relativement préservé avec une dominance de concentrations acceptables (1,2-20 mg/l) sur l'ensemble de la plaine, ponctuées de quelques anomalies localisées de 25-31,4 mg/l au nord et centre-est, suggérant des sources de pollution diffuses et maîtrisées. La situation de 2023 témoigne d'une transformation dramatique du paysage hydrogéochimique avec une généralisation des concentrations critiques (50,1-85,3 mg/l) dépassant largement les seuils de potabilité (50 mg/l OMS), une bipolarisation des zones les plus contaminées au nord et au sud (70,1-85,3 mg/l), et une réduction drastique des zones de refuge hydrogéologique (11,2-30 mg/l) confinées au centre-est. Cette évolution révèle une contamination diffuse systémique probablement liée à l'intensification des pratiques agricoles (fertilisation azotée, élevage intensif).

3.9 Conductivité électrique CE :

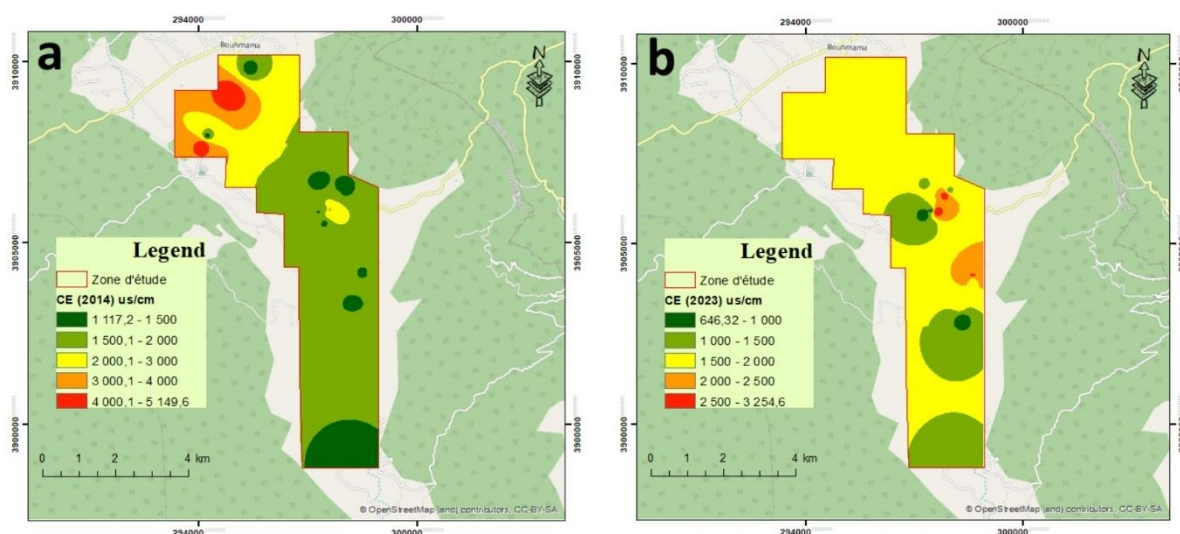


Fig. 20 a, b Distribution spatiotemporelle des CE dans la plaine de Bouhmama

Dans la plaine de Bouhmama, les cartes de conductivité électrique (CE) des eaux souterraines entre 2014 et 2023 (figure 20 a et b) révèlent une tendance générale à la diminution des valeurs les plus élevées et une homogénéisation des concentrations, bien que cela s'accompagne d'une légère augmentation dans certaines zones. En 2014, des zones de très forte conductivité (4000,1 à 5149,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) étaient localisées dans la partie nord de la plaine, avec des valeurs élevées (2000,1 à 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) s'étendant vers le centre et des zones plus modérées (1117,2 à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) au centre et au sud. En 2023, on observe une nette réduction de l'étendue des zones de très forte conductivité, les valeurs maximales étant désormais comprises entre 2500 et 3254,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et se localisant de manière plus ponctuelle au centre-est. Une grande partie de la plaine, en particulier le nord et le centre-est, présente une conductivité électrique moyenne à élevée (1500 à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), suggérant une légère augmentation de la salinité dans ces secteurs par rapport aux zones de faible conductivité de 2014. Cependant, des zones de conductivité plus faible (646,32 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont également apparues au sud et ponctuellement au centre en 2023. Cette évolution globale indique une diminution des extrêmes de salinité observés en 2014, mais également une redistribution des concentrations avec une augmentation de la conductivité dans certaines zones où elle était auparavant plus faible.

4 Indice de qualité des eaux souterraines (IQE) :

L'indice de qualité de l'eau (Water Quality Index, WQI) constitue un paramètre essentiel pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines et de leur aptitude à la consommation humaine.

Le calcul du WQI s'effectue en trois phases successives visant à déterminer cette aptitude. La première étape, dite d'**attribution des poids**, consiste à assigner un poids spécifique (w_i) à chacun des paramètres sélectionnés, en fonction de leur importance relative pour la qualité de l'eau potable, conformément aux recommandations de l'OMS (2017), comme indiqué dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Les normes de l'OMS (2017) relatives aux paramètres de qualité des eaux souterraines, ainsi que les valeurs de poids attribuées

Parameters	WHO (2017)	Relative Weight (Rw)	Weight Parameter (Wp)
pH	6.5–8.5	4	0.06557
EC	1000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5	0.08197
DO	5 (mg/L)	5	0.08197
TDS	500 (mg/L)	2	0.03279
K ⁺	10 (mg/L)	3	0.04918
Na ⁺	200 (mg/L)	4	0.06557
Cl ⁻	250 (mg/L)	4	0.06557
Ca ²⁺	75 (mg/L)	3	0.04918
Mg ²⁺	50 (mg/L)	3	0.04918
TH	400 (mg/L)	3	0.04918
HCO ₃ ⁻	120 (mg/L)	2	0.03279
NO ₃ ⁻	50 (mg/L)	5	0.08197
NH ₄ ⁺	35 (mg/L)	3	0.04918
PO ₄ ³⁻	5 (mg/L)	4	0.06557
SO ₄ ²⁻	250 (mg/L)	4	0.06557
Fe	0.3 (mg/L)	3	0.04918
Zn	3 (mg/L)	2	0.03279
Cu	2 (mg/L)	1	0.01639
Mn	0.4 (mg/L)	1	0.01639
Total weight		61	1

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Chaque paramètre reçoit un poids allant de 1 (impact minimal) à 5 (impact maximal). La deuxième étape porte sur le calcul du **poids relatif** à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

La troisième phase implique l'évaluation de la "cote de qualité (Q_i)", qui est déterminée à l'aide de l'Équation :

$$SI = Q_i \times W_i$$

Où Q_i représente l'indice de qualité, S_i désigne la norme standard et C_i signifie la concentration de l'échantillon en mg/L. Le sous-indice "SI" pour chaque paramètre est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$WQI = \sum_{i=1}^n SI = \sum_{i=1}^n Qi \times Wi$$

Où "Qi" représente la valeur du paramètre et "Wi" désigne le poids relatif. Le score "WQI" pour chaque échantillon est ensuite déterminé comme la somme de tous les sous-indices calculés pour toutes les variables à l'aide de l'équation suivante :

Par la suite, les scores WQI pour tous les échantillons d'eaux souterraines sont classés dans l'une des cinq classes de qualité de l'eau, comme illustré dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Classification de la qualité de l'eau basée sur les valeurs de l'IQE (Sahu et Sikdar, 2008)

Rang IQE	Classe	Qualité de l'eau
< 50	I	Excellent qualité
50–100	II	Bonne qualité
100–200	III	Moyenne qualité
200–300	IV	Mauvaise qualité
> 300	V	Très mauvaise qualité

Les résultats du calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) reposent sur l'évaluation de l'impact relatif de chaque paramètre physico-chimique sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine. Afin de mieux visualiser la répartition spatiale de cette qualité, le module d'analyse spatiale du Système d'Information Géographique (SIG) a été utilisé. Cette intégration a permis la génération d'une carte thématique détaillée, illustrant non seulement les variations de la qualité de l'eau au sein de la zone d'étude, mais aussi les zones critiques nécessitant une attention particulière en matière de gestion et de surveillance des ressources en eau.

5 Résultat et discussion :

Le calcul de l'indice de qualité de l'eau est présenté dans le tableau 6 pour l'année 2014 et le tableau 7 pour l'année 2023 ;

Tableau 6 : Résultats de l'IQE pour l'année 2014

N	WQI	OBSERVATION
1	122,01	permissible
2	164,80	permissible
3	181,64	permissible
4	144,77	permissible
5	194,671	permissible
6	149,64	permissible
7	135,94	permissible
8	130,42	permissible
9	312,86	unsuitable for drinking and irrigation uses
10	171,69	permissible
11	183,94	permissible
12	125,63	permissible
13	152,56	permissible
14	133,20	permissible
15	121,61	permissible
16	148,07	permissible
17	149,20	permissible
18	360,26	unsuitable for drinking and irrigation uses
19	141,46	permissible
20	235,32	doubtful

Tableau 7 : Résultats de l'IQE pour l'année 2023

N	WQI	OBSERVATION
1	163,27	permissible
2	161,02	permissible
3	161,53	permissible
4	137,78	permissible
5	85,861	good
6	167,51	permissible
7	128,82	permissible
8	206,65	doubtful
9	193,56	permissible
10	97,79	good
11	92,42	good
12	97,92	good
13	191,87	permissible
14	118,79	permissible
15	103,99	permissible

Les résultats démontrés dans les tableaux précédente sont transformés sous forme de carte pour faciliter l'analyse spatio temporelle (Figure 21 a et b).

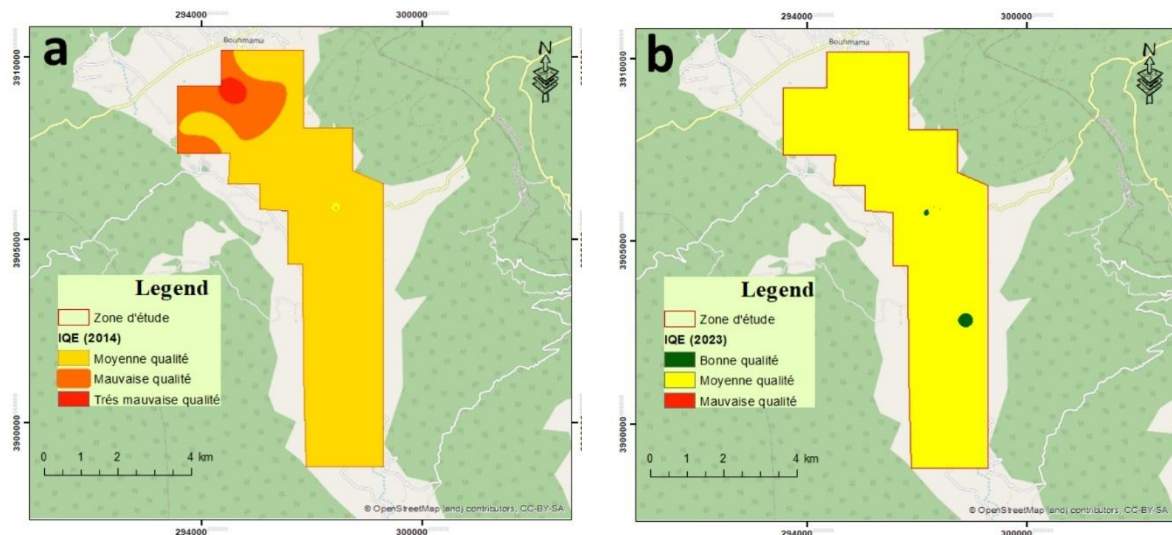


Fig. 21 a, b : Variation spatiotemporelle de l'IQE

5.1 Analyse de la Carte de 2014 :

La carte de l'indice de qualité de l'eau pour l'année 2014 révèle une situation hétérogène au sein de la zone d'étude délimitée. La légende indique trois niveaux de qualité pour cette année : "Moyenne qualité" (représentée en jaune), "Mauvaise qualité" (en orange) et "Très mauvaise qualité" (en rouge). Spatialement, la majorité de la zone d'étude présente une eau de "Moyenne qualité". Cependant, une dégradation notable est observée dans la partie nord de la zone, aux alentours de la localité de Bouhmama. Dans ce secteur septentrional, des étendues significatives sont classées en "Mauvaise qualité" (orange), et une zone plus restreinte, au cœur de cette section nord, est même désignée comme ayant une "Très mauvaise qualité" (rouge). Le reste de la zone d'étude, s'étendant vers le sud, conserve une qualité d'eau moyenne.

5.2 Analyse de la Carte de 2023 :

La carte de l'indice de qualité de l'eau pour 2023 présente un tableau différent et indique une évolution par rapport à 2014. La légende de 2023 introduit une nouvelle catégorie, "Bonne qualité" (représentée en vert foncé), et redéfinit les autres niveaux : "Moyenne qualité" (jaune) et "Mauvaise qualité" (rouge). Il est important de noter la différence de codage couleur pour la mauvaise qualité par rapport à 2014 (rouge en 2023 contre orange/rouge en 2014 pour mauvaise/très mauvaise). Sur la carte de 2023, la grande majorité de la zone d'étude affiche toujours une "Moyenne qualité" (jaune). Cependant, deux améliorations notables sont visibles : l'apparition de deux petites zones distinctes classées en "Bonne qualité" (vert foncé). L'une se situe approximativement au centre de la partie sud de la zone d'étude, et l'autre légèrement au

nord-ouest de celle-ci. De manière significative, les zones qui étaient classées en "Mauvaise" et "Très mauvaise qualité" dans le secteur nord en 2014 apparaissent désormais en jaune, indiquant une amélioration vers une "Moyenne qualité". Aucune zone classée "Mauvaise qualité" n'est visible sur la carte de 2023.

La comparaison directe des deux cartes met en évidence une tendance générale à l'amélioration de la qualité de l'eau dans la zone d'étude entre 2014 et 2023. L'évolution la plus marquante concerne la partie nord de la zone. En 2014, ce secteur présentait les plus faibles indices de qualité, avec des zones de mauvaise et très mauvaise qualité. En 2023, ces mêmes zones ont vu leur qualité s'améliorer pour atteindre un niveau moyen. Cette amélioration spatiale spécifique est un changement positif majeur. Temporellement, sur l'ensemble de la zone, non seulement les points de dégradation critiques de 2014 ont été résorbés, mais de nouvelles zones de "Bonne qualité" sont apparues en 2023. Ces îlots de bonne qualité se situent dans des secteurs qui étaient auparavant classés en qualité moyenne. La vaste étendue classée en "Moyenne qualité" est restée relativement stable en termes de classification générale, bien qu'elle englobe désormais l'ancienne zone dégradée du nord et ait vu émerger en son sein les nouvelles zones de bonne qualité.

5.3 Interprétation statistique des résultats :

L'analyse descriptive pour les deux années est présentée dans les tableaux 8 et 9. Les indices statistiques descriptifs étaient les valeurs minimales et maximales, la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation.

Tableau 8. Statistiques descriptives des caractéristiques physico-chimiques des eaux en 2023

Paramètre	Moyenne	Median	Min	Max	Std Dev
T°C	19.63	19.30	17.10	22.30	1.84
pH	7.00	6.94	6.77	7.33	0.16
c25°C	1846.63	1600.00	643.00	3420.00	887.14
TDS	612.47	573.10	401.33	925.11	189.88
Ca	179.05	188.78	20.04	288.98	75.86
Mg	56.22	48.98	18.60	110.98	24.75
Na	187.75	184.15	72.19	337.72	78.86
K	14.08	15.25	3.52	34.80	9.30
Cl	225.27	170.16	59.20	567.20	162.57
SO4	387.50	303.55	52.83	666.66	193.39
HCO3	533.95	564.95	144.59	905.99	203.10
NO3	48.35	46.88	11.16	94.50	21.56

Tableau 9. Statistiques descriptives des caractéristiques physico-chimiques des eaux en 2014

Paramètre	Moyenne	Median	Min	Max	Std Dev
pH	7.07	7.06	6.92	7.54	0.16
TDS	1522.25	1280.00	125.00	4580.00	1007.92
Cond	1912.20	1379.00	1115.00	5150.00	1264.44
HCO3-	305.55	301.44	197.71	385.34	47.93
Cl-	257.33	142.02	69.52	1297.58	310.94
NO3-	14.70	12.84	1.20	31.46	9.63
SO4--	493.30	457.88	301.98	861.45	164.98
Ca++	218.32	200.78	133.45	334.55	58.90
Mg++	81.52	82.09	37.38	129.24	20.72
Na+	168.29	128.30	67.90	709.70	151.51
K+	2.07	1.76	0.00	11.26	2.39

6 Comparaison des Paramètres Physico-Chimiques (2014 vs. 2023) (Tableau 10)

6.1 Paramètres en Baisse (Amélioration) :

TDS, Conductivité, Ca++, Mg++, Cl-, SO4-- :

Une réduction significative a été observée, ce qui pourrait témoigner d'une baisse notable des rejets domestiques dans l'environnement ou encore d'une amélioration dans la gestion et le traitement des ressources hydriques, notamment à travers des politiques plus efficaces de contrôle de la pollution et de préservation de la qualité de l'eau.

Tableau 10. Comparaison des Paramètres Physico-Chimiques (2014 vs. 2023)

Paramètre	2014 (Moyenne)	2023 (Moyenne)	Évolution	Remarques
Température (T°C)	Non mesuré	19.63°C	-	2023 : Températures stables (17.1–22.3°C), typiques d'eaux de surface.
pH	7.07	7.00	Légère diminution	Les deux années dans la plage neutre (6.77–7.54), idéale pour la vie aquatique.
Conductivité (c25°C/Cond)	1912.20 μS/cm (2013)	1846.63 μS/cm (2023)	Stable	2023 : Variabilité élevée (643–3420 μS/cm), possible pollution ponctuelle.
TDS (mg/L)	1522.25	612.47	Baisse de 60%	Réduction majeure, suggérant une diminution des sels dissous ou des polluants.
Ca++ (mg/L)	218.32	179.05	Baisse de 18%	2023 : Concentrations plus homogènes (20–289 mg/L vs. 133–335 mg/L en 2013).
Mg++ (mg/L)	81.52	56.22	Baisse de 31%	2013 : Pic à 129 mg/L (Point 2) → 2023 : Max à 111 mg/L (Point 6).
Na+ (mg/L)	168.29	187.75	Légère hausse	2023 : Valeurs plus dispersées (72–338 mg/L), possible intrusion saline/localisée.
K+ (mg/L)	2.07	14.08	Hausse ×6.8	2023 : Pic à 34.8 mg/L (Point 8) → Pollution agricole (engrais potassiques) ?
Cl- (mg/L)	257.33	225.27	Baisse de 12%	2013 : Point 18 (1297 mg/L) extrême → 2023 : Max à 567 mg/L (Point 1).
SO4-- (mg/L)	493.30	387.50	Baisse de 21%	2023 : Réduction des sulfates, possible traitement des eaux industrielles.
HCO3- (mg/L)	305.55	533.95	Hausse de 75%	2023 : Alcalinité accrue, potentiellement liée à la dissolution de carbonates.
NO3- (mg/L)	14.70	48.35	Hausse ×3.3	2023 : Pics à 94.5 mg/L (Point 8) → Ruissellement agricole ou eaux usées.

6.2 Paramètres en Hausse (Dégradation Potentielle) :

• NO3-, K+, HCO3- :

- **NO3-** : Multiplication par 3.3 → Pollution agricole (engrais) ou domestique (eaux usées).
- **K+** : Pic à 34.8 mg/L (2023) vs. 11.26 mg/L (2014) → Source anthropique probable.
- **HCO3-** : Hausse de 75% → Possible altération des roches carbonatées ou changement géochimique.

6.3 Paramètres Stables :

- **pH** : Reste neutre dans les deux années, sans risque d'acidification/alcalinisation.
- **Na+** : Légère hausse mais dans des plages acceptables pour les eaux douces.

7 Statistiques Descriptives du IQE :

L'indice de qualité de l'eau (WQI) présente une évolution significative entre les deux périodes étudiées :

Pour l'année 2014 :

- Valeur moyenne du WQI : 172,99
- Écart-type : 63,01
- Valeur minimale : 121,62
- Valeur maximale : 360,27

Pour l'année 2023 :

- Valeur moyenne du WQI : 140,59
- Écart-type : 40,38
- Valeur minimale : 85,86
- Valeur maximale : 206,66

La comparaison de ces statistiques révèle une diminution globale de la moyenne du IQE de 18,73% entre 2014 et 2023. Cette baisse est significative et cohérente avec l'amélioration générale de la qualité de l'eau observée sur les cartes, car dans l'échelle utilisée, des valeurs IQE plus basses correspondent généralement à une meilleure qualité de l'eau.

Un aspect particulièrement notable est la réduction de l'écart-type, qui passe de 63,01 en 2014 à 40,38 en 2023. Cette diminution de la dispersion des valeurs indique une homogénéisation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude. La réduction significative de la valeur maximale (de 360,27 à 206,66) confirme la disparition des zones de très mauvaise qualité observées dans la partie nord de la carte de 2014.

8 Justification des Évolutions Cartographiques :

8.1 Disparition des Zones de Mauvaise Qualité :

La carte de 2014 montrait des zones de mauvaise et très mauvaise qualité dans la partie nord de la région étudiée. Les données numériques confirment cette observation avec des valeurs WQI extrêmement élevées en 2014 (maximum de 360,27), qui correspondent probablement à ces zones dégradées. En 2023, la valeur maximale a considérablement

diminué (206,66), ce qui explique la disparition des zones orange et rouge sur la carte de 2023.

8.2 Homogénéisation vers une Qualité Moyenne :

La réduction de l'écart-type entre les deux périodes (de 63,01 à 40,38) justifie l'homogénéisation visuelle observée sur la carte de 2023, où la majorité de la zone présente une qualité moyenne (jaune). Cette convergence des valeurs vers la moyenne explique pourquoi la carte de 2023 apparaît plus uniforme que celle de 2014.

8.3 Apparition de Zones de Bonne Qualité :

La carte de 2023 montre l'apparition de deux zones distinctes classées en "Bonne qualité" (vert foncé). Bien que la valeur minimale du IQE ait diminué (de 121,62 à 85,86), ce qui est cohérent avec l'émergence de ces zones de meilleure qualité, les données ne permettent pas d'identifier précisément les points correspondant à ces améliorations localisées. Cependant, la présence de valeurs significativement plus basses dans le jeu de données de 2023 confirme cette tendance à l'amélioration ponctuelle.

9 Conclusion :

La diminution globale de la moyenne du IQE de 18,73% entre 2014 et 2023 témoigne d'une amélioration générale de la qualité de l'eau dans la zone d'étude. Cette amélioration est particulièrement marquée dans les zones qui présentaient les plus mauvais indices en 2014, comme le montre la réduction significative de la valeur maximale.

L'homogénéisation des valeurs, illustrée par la réduction de l'écart-type, explique la prédominance de la catégorie "Moyenne qualité" sur la carte de 2023. Parallèlement, l'apparition de valeurs minimales plus basses justifie l'émergence des zones de "Bonne qualité" observées sur cette même carte.

Ces évolutions numériques confirment et expliquent les changements visuels observés entre les deux cartes : une amélioration générale de la qualité de l'eau, une homogénéisation vers une qualité moyenne, et l'apparition localisée de zones de bonne qualité.

Conclusion générale et recommandation

Au terme de cette étude portant sur l'analyse spatio-temporelle de l'indice de qualité des eaux souterraines dans la plaine de Bouhmama (Khenchela, Algérie), plusieurs conclusions majeures se dégagent, tant sur le plan méthodologique que sur les résultats obtenus et leurs implications pour la gestion durable de cette ressource vitale.

L'analyse comparative des données physico-chimiques collectées en 2014 et 2023 a révélé une évolution significative de la qualité des eaux souterraines dans la région. Les cartes de distribution spatiale des différents paramètres mettent en évidence des transformations importantes dans la structure hydrogéochimique de l'aquifère. Notamment, nous avons observé : Une réorganisation spatiale des concentrations en calcium, passant d'une distribution relativement homogène en 2014 à une structure bipolaire en 2023, avec des zones de forte concentration aux extrémités nord et sud de la zone d'étude.

- Une augmentation générale des concentrations en magnésium entre 2014 et 2023, accompagnée d'une modification de sa distribution spatiale qui est devenue bipolaire, similaire à celle du calcium.
- Une diminution globale des concentrations maximales en sodium (-52,5%) et une inversion du gradient de concentration, initialement décroissant du nord vers le sud en 2014, puis inversé en 2023.
- Une évolution de l'indice de qualité de l'eau (IQE) montrant une amélioration générale entre 2014 et 2023, avec la disparition des zones de mauvaise et très mauvaise qualité au profit d'une homogénéisation vers une qualité moyenne, et l'apparition de zones localisées de bonne qualité.

Ces résultats témoignent d'un système aquifère dynamique, dont les caractéristiques physico-chimiques évoluent sous l'influence de facteurs naturels (géologie, conditions d'écoulement) et anthropiques (pratiques agricoles, prélèvements).

Les résultats de cette étude ont des implications directes pour la gestion durable des ressources en eau dans la plaine de Bouhmama :

1 Identification des zones vulnérables :

La cartographie de l'IQE permet d'identifier les secteurs nécessitant une attention particulière en termes de protection et de surveillance.

1.1 Suivi des tendances :

L'amélioration globale de la qualité de l'eau entre 2014 et 2023 suggère que certaines mesures de gestion ou changements dans les pratiques ont eu un impact positif, qu'il conviendrait d'analyser plus en détail pour les renforcer.

1.2 Adaptation des stratégies de gestion :

La compréhension des dynamiques spatio-temporelles permet d'adapter les stratégies de gestion aux spécificités locales et aux évolutions observées.

1.3 Planification des ressources :

L'apparition de zones de bonne qualité offre des opportunités pour une exploitation plus ciblée et durable de la ressource.

2 Recommandations pour une gestion durable :

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour une gestion plus durable des eaux souterraines dans la plaine de Bouhmama :

- Renforcement du réseau de surveillance : Mettre en place un réseau de surveillance permanent avec des points de mesure stratégiquement répartis pour suivre l'évolution de la qualité de l'eau.
- Zonage de protection : Établir un zonage de protection différenciée en fonction de la vulnérabilité des différents secteurs de l'aquifère.
- Sensibilisation et formation : Développer des programmes de sensibilisation et de formation à destination des agriculteurs sur les pratiques agricoles respectueuses de la qualité des eaux souterraines.
- Gestion intégrée : Promouvoir une approche de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin versant, prenant en compte les interactions entre eaux de surface et eaux souterraines.

- Adaptation au changement climatique : Intégrer les projections climatiques dans la planification à long terme de la gestion des ressources en eau.

En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence une amélioration globale de la qualité des eaux souterraines dans la plaine de Bouhmama entre 2014 et 2023, tout en révélant des dynamiques spatiales complexes qui nécessitent une gestion adaptée et vigilante. Dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les ressources en eau, particulièrement dans les régions semi-arides comme le Nord-Est algérien, ces résultats constituent une base scientifique solide pour orienter les politiques de gestion durable de cette ressource vitale pour le développement économique et social de la région.

REFERENCES

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Water quality indices. In *Water Quality Indices* (pp. 353-356). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6>
- Agaguenia, S. (2010). *Principes d'aménagement pour un développement local durable d'un territoire montagneux du littoral. Cas de la commune de Collo (Nord-est Algérien)*. Algérie, 2e série.
- Alobaidy, A. H. M. J., Abid, H. S., & Maulood, B. K. (2010). Application of water quality index for assessment of Dokan Lake ecosystem, Kurdistan region, Iraq. *Journal of Water Resources and Protection*, 2(9), 792-798. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.29093>
- Amneera, W. A., Najib, N. W. A. Z., Mohd Yusof, S. R., & Ragunathan, S. (2013). Water quality index of Perlis River, Malaysia. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 13, 1-6. <https://doi.org/10.1017/S0022112095002084>
- Ball, P. (2008). Water: An enduring mystery. *Nature*, 452(7185), 291-292.
- Benjamin, B. (2007). *Cartographie agroclimatique à méso-échelle : méthodologie et application à la variabilité spatiale du climat en Gironde viticole : conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin* [Thèse de doctorat]. Université de Bordeaux.
- Berkani Ch., Boulabeiz M., Dali N., Sedrati A., Houha B (2023) *Hydrogeochemical modeling of groundwater of the quaternary aquifer in Mellagou valley -Bouhmama- (northeastern Algeria)*, Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, Vol. 18(1), pp. 115 – 126. DOI:10.26471/cjees/2023/018/245
- Bouali, H; Berkane, W. (2015) Contribution a l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la plaine de Mellagou (Bouhmama NW Khenchela) Mémoire de master université de Khenchela. 102 p.
- Bigg, G. R. (2003). *The oceans and climate*. Cambridge University Press.
- Bunker, B. C. (1994). Molecular mechanisms for corrosion of silica and silicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 179, 300-308.
- Chaplin, M. (2006). Do we underestimate the importance of water in cell biology? *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 7(11), 861-866.
- Chaplin, M. F. (2006). Water's hydrogen bond strength. In *Water and life: The unique properties of H₂O* (pp. 69-86).
- Chen, S., & Guan, D. (2017). Temperature dependence of water viscosity. *Journal of Physical Chemistry B*, 121(35), 8195-8202.
- Cude, C. G. (2001). Oregon water quality index: A tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125-137. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05480.x>
- Dadolahi-Sohrab, A., Arjomand, F., & Fadaei-Nasab, M. (2012). Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal*, 26, 445-454. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x>

- Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., & Niell, X. (2005). Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110(1-3), 301-322. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1>
- Department of Water. (2009). *Water quality monitoring program design - A guideline for field sampling for surface water quality*.
- Dojlido, J. A. N., Raniszewski, J., & Woyciechowska, J. (1994). Water quality index applied to rivers in the Vistula river basin in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 33, 33-42.
- Dunn, G. W. (1995). *Trends in water quality variables at the Alberta/Saskatchewan boundary*. Prepared for the Committee on Water Quality.
- Dunnette, D. A. (1979). A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51(1), 53-61.
- Effendi, H., Romano, & Wardiatno, Y. (2015). Water quality status of Ciambulawung River, Banten Province, based on pollution index and NSF-WQI. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.030>
- Eisenberg, D., & Kauzmann, W. (2005). *The structure and properties of water*. Oxford University Press.
- Endesa. (s.d.). What is the purpose of reservoirs? Main uses and benefits. <https://www.endesa.com/en/the-e-face/power-plants/what-purpose-reservoirs-uses-benefits>
- Ewaid, S. H., & Abed, S. A. (2017). Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43(2), 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.03.001>
- Finney, J. L. (2004). Water? What's so special about it? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 359(1448), 1145-1165.
- Franks, F. (2000). *Water: A matrix of life*. Royal Society of Chemistry.
- Freshwater Collaborative of Wisconsin. (s.d.). 10 grand water challenges. <https://freshwater.wisconsin.edu/our-work/10-grand-water-challenges/>
- Fulazzaky, M. A., Seong, T. W., & Masirin, M. I. M. (2010). Assessment of water quality status for the Selangor River in Malaysia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205, 63-77. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0056-2>
- Gazzaz, N. M., Yusoff, M. K., Aris, A. Z., Juahir, H., & Ramli, M. F. (2012). Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 2409-2420. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.005>
- Gleick, P. H. (1996). Water resources. In *Encyclopedia of climate and weather* (Vol. 2, pp. 817-823).
- Global Water Forum. (2025). The future water crisis: Are we prepared for the worst or best case? <https://www.globalwaterforum.org/2025/02/13/the-future-water-crisis-are-we-prepared-for-the-worst-or-best-case/>

- Hamouche, S., Sebai, K., & Mokhtari, E. (2021). *Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi de la qualité physico chimique des eaux de surface. Cas de barrage de Béni Haroun (W. de Mila)* [Mémoire de master]. Université de M'Sila.
- Hasan, H. H., Jamil, N. R., & Aini, N. (2015). Water quality index and sediment loading analysis in Pelus River, Perak, Malaysia. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.10.024>
- Horton, R. K. (1965). An index-number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37, 300-306. <https://doi.org/10.2307/25035251>
- Hoseinzadeh, E., Khorsandi, H., Wei, C., & Alipour, M. (2015). Evaluation of Aydughmush River water quality using the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), River Pollution Index (RPI), and Forestry Water Quality Index (FWQI). *Desalination and Water Treatment*, 54, 2994-3002. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.913206>
- Jéquier, E., & Constant, F. (2010). Water as an essential nutrient: The physiological basis of hydration. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64(2), 115-123.
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S. R., & Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 93-110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
- Koussa, M., & Berhail, S. (2021). Evaluation of spatial interpolation techniques for mapping groundwater nitrates concentrations: Case study of Ain Elbel, Sidi Makhlof syncline in the Djelfa region (Algeria). *Larhyss Journal*, 45, 119-140.
- Laffitte, R. (1939). *Étude géologique de l'Aurès* [Thèse]. Paris, Bulletin du Service de la Carte Géologique. Université d'Annaba.
- Liou, S.-M., Lo, S.-L., & Wang, S.-H. (2004). A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96, 35-52. <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.a1>
- Lobato, T. C., Hauser-Davis, R. A., Oliveira, T. F., Silveira, A. M., Silva, H. A. N., Tavares, M. R. M., & Saraiva, A. C. F. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*, 522, 674-683.
- Lynden-Bell, R. M., Morris, S. C., Barrow, J. D., Finney, J. L., & Harper, C. L. (2010). *Water and life: The unique properties of H₂O*. CRC Press.
- Madenea, E., Boufekane, A., Meddia, M., Gianluigi, B., & Zghibid, A. (2022). Spatial analysis and mapping of the groundwater quality index for drinking and irrigation purpose in the alluvial aquifers of upper and middle Chelif basin (north-west Algeria). *Water Supply*, 22(4), 4422-4444. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.107>
- Mamadou Amadou, M. S. (2025) Etude et évaluation de la dynamique d'occupation des sols agricoles par l'intégration de la télédétection et SIG, cas de la plaine de Malagou Bouhmama (Khenchela). Mémoire de master université de Khenchela. 71p.
- Medeiros, A. C., Faial, K. R. F., do Carmo Freitas Faial, K., da Silva Lopes, I. D., de Oliveira Lima, M., Guimaraes, R. M., & Mendonça, N. M. (2017). Quality index of the

surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 123, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.002>

- Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., & Myers, B. (2017). Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezel Ozan River. *Science of the Total Environment*, 589, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.226>
- Naubi, I., Zardari, N. H., Shirazi, S. M., Ibrahim, N. F. B., & Baloo, L. (2016). Effectiveness of water quality index for monitoring Malaysian river water quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25, 231-239. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109>
- Ongley, E. D., & Booty, W. G. (1999). Pollution remediation planning in developing countries. *Water International*, 24, 31-38. <https://doi.org/10.1080/02508069908692131>
- Osterroth, S., Alcock, N., Knutson, T., & Prestegard, S. (2015). The thermal properties of water. *Journal of Chemical Education*, 92(11), 1888-1891.
- Othman, F., & Alaa Eldin, M. E. (2012). Assessment of the Klang River quality using the water quality indices. *Advanced Materials Research*, 599, 237-240. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.599.237>
- Pham, T. M. H., Sthiannopkao, S., Ba, D. T., & Kim, K. W. (2011). Development of water quality indexes to identify pollutants in Vietnam's surface water. *Journal of Environmental Engineering*, 137, 273-283. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000314](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000314)
- Pohorille, A., & Pratt, L. R. (2012). Is water the universal solvent for life? *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 42(5), 405-409.
- Pope, R. M., & Fry, E. S. (1997). Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 36(33), 8710-8723.
- Rahmstorf, S. (2006). Thermohaline ocean circulation. In *Encyclopedia of quaternary sciences*. Elsevier.
- Saffran, K., Environment, A., Cash, K., & Canada, E. (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life CCME water quality index 1.0 user's manual*. Quality, 1-5.
- Said, A., Stevens, D. K., & Sehlke, G. (2004). An innovative index for evaluating water quality in streams. *Environmental Management*, 34(3), 406-414. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0210-y>
- Sarkar, C., & Abbasi, S. A. (2006). Qualidex - A new software for generating water quality indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119, 201-231. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9023-6>
- Schierow, L. J., & Chesters, G. (1988). Evaluation of the great lakes nearshore index. *Water Research*, 22, 269-277. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(88\)90020-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(88)90020-6)
- Shuhaimi-Othman, M., Lim, E. C., & Mushrifah, I. (2007). Water quality changes in Chini Lake, Pahang, West Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 131, 279-292. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9475-3>

- Sim, S. F., Ling, T. Y., Lau, S., & Jaafar, M. Z. (2015). A novel computer-aided multivariate water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 181. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4416-7>
- Smith, D. G. (1990). A better water quality indexing system for rivers and streams. *Water Research*, 24(10), 1237-1244. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90047-A](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90047-A)
- Steinhart, C. E., Schierow, L.-J., & Sonzogni, W. C. (1982). An environmental quality index for the great lakes. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 18(6), 1025-1031. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1982.tb00110.x>
- Stoner, J. D. (1978). *Water-quality indices for specific water uses*. Geological Survey Circular.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (2012). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*. John Wiley & Sons.
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2017). Using the analytic hierarchy process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators*, 75, 220-233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.043>
- Swamee, P. K., & Tyagi, A. (2000). Describing water quality with aggregate index. *Journal of Environmental Engineering*, 126(5), 451-455. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2000\)126:5\(451\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:5(451))
- Tomas, D., Curlin, M., & Marić, A. S. (2017). Assessing the surface water status in Pannonian ecoregion by the water quality index model. *Ecological Indicators*, 79, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.033>
- Trenberth, K. E., & Fasullo, J. T. (2010). Tracking Earth's energy. *Science*, 328(5976), 316-317.
- Uddin, M. G., Nash, S., Agnieszka, I., & Olbert. (2020). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>
- Vargaftik, N. B., Volkov, B. N., & Voljak, L. D. (1983). International tables of the surface tension of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 12(3), 817-820.
- Venkatramanan, S., Chung, S. Y., Ramkumar, T., Rajesh, R., & Gnanachandrasamy, G. (2016). Assessment of groundwater quality using GIS and CCME WQI techniques: A case study of Thiruthuraipoondi city in Cauvery deltaic region, Tamil Nadu, India. *Desalination and Water Treatment*, 57(26), 12058-12073.
- Vila, J. M. (1977). *Carte géologique de l'Algérie et notices explicatives*.
- Wagner, W., & Pruß, A. (2002). The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 31(2), 387-535.
- Water and Wastewater. (2024). Reservoir management: Optimizing water resources for sustainable future. <https://www.waterandwastewater.com/reservoir-management-optimizing-water-resources-for-sustainable-future/>

- Zolotov, M. Y., & Shock, E. L. (2001). Composition and stability of salts on the surface of Europa and their oceanic origin. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E12), 32815-32827.