



Université Mohamed khider –Biskra
Faculté d'Architecture, de l'Urbanisme,
De Génie Civil et de l'Hydraulique
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies Filière :

Hydraulique

Spécialité : **Hydraulique urbaine**

Réf :

Présenté et soutenu par :
ZEBIRI Ouannas

16 Juin 2025

La qualité physico-chimique des eaux souterraines. Cas de la région de Mekhadema. Biskra

Jury :

Dr. YUCEF Sofiane	MCB	Université de Biskra	Président
Mr. ABED Mourad	MAA	Université de Biskra	Examineur
Dr. MESMOUDI Toufik	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, Seigneur des Mondes, pour m'avoir guidé et soutenu tout au long de la réalisation de ce travail, qui n'a pas été une tâche aisée dans mon parcours universitaire.

J'adresse mes remerciements les plus sincères et ma profonde gratitude au Dr Masmoudi Toufik, pour sa présence bienveillante, ses encouragements constants et tout le soutien qu'il m'a généreusement accordé.

Je tiens également à remercier du fond du cœur toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la préparation de ce travail, ainsi que l'ensemble des enseignants du Département de Génie Civil et Hydraulique, qui ont participé à ma formation avec rigueur et dévouement.

Dédicace

*Je dédie cette humble œuvre à ma mère bien-aimée, source
infinie d'affection et prunelle de mes yeux.*

*Elle est la couronne de ma tête, mon unique étoile qui éclaire
mes nuits de sa lumière de diamant.*

*Je la dédie aussi à mon père, Nadir, ainsi qu'à mes chers
frères Schaib et Saifeddin,*

qui m'ont soutenu avec constance dans toutes les circonstances.

*Cette œuvre est également dédiée à mes amis et collègues,
qui ont été présents dans les moments de joie comme dans
ceux de doute.*

Enfin, à toute ma famille.

Sommaire

Résumé.....	8
ملخص.....	8
Abstract.....	9
Liste des tableaux.....	10
Liste des figures.....	12
Liste des abréviations.....	14
Introduction Générale.....	15
Partie A : Littérature et revue bibliographique.....	17
Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution.....	18
I.1 Introduction.....	19
I.2 Caractéristiques des eaux souterraines :.....	19
I.2.1 Définition des eaux souterraines.....	19
I.2.2 Importance des eaux souterraines.....	20
I.3 Norme de qualité d'eau:.....	20
A- L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) :.....	20
B- Norme Algérienne (JORA 2014) :.....	20
I.4 Principaux paramètres de potabilité.....	21
I.4.1 Paramètres organoleptiques (physique).....	21
I.4.1.1. Couleur.....	21
I.4.1.2 Odeur et Saveur.....	21
I.4.2 Paramètres bactériologiques.....	22
I.4.3 Paramètres physicochimiques.....	23
I.4.3.1 Température.....	23
I.4.3.2 Turbidité.....	23
I.4.3.3 Conductivité.....	23
I.4.3.4 Potentiel d'Hydrogène (pH).....	24
I.4.3.5 Les ions majeurs.....	24
. Calcium.....	24
. Potassium.....	24
. Sulfate.....	24
I.4.3.6. Nutriments.....	25
I.4.3.7. Métaux lourds.....	25

I.5 Pollution des eaux	25
I.5.1 Sources de pollution	26
I.5.1.1. La pollution domestique	27
I.5.1.2. Origine industrielle	27
I.5.1.3 La pollution agricole	27
I.5.1.4. Phénomènes naturels	28
I.5.1.5. Pollution atmosphérique	28
I.5.2 Les principaux polluants des eaux	28
I.5.2.1 Les polluants microbiologiques	28
I.5.2.2 Les polluants chimiques	29
I.5.2.3. Les polluants physiques	29
I.6 Conclusion	30
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	31
II.1. Introduction	32
II.2. Situation géographique de la région de Mekhadema	32
Commune de Mekhadema :	32
II.3. Répartition de l'habitat	33
II.4 Activité d'agriculture	35
II.5 Types de Sol de la région d'étude	35
II.6 Relief	36
II.7 Hydrologie de la région	36
II.7.1 Climat	37
II.7.1.1 Précipitation	37
II.7.2.2 Températures	38
II.7.2.3 Evapotranspiration	39
II.7.2.4. Les vents dominants	40
II.7.3 Le climat suivant les nouvelles données climatiques	41
II.7.3.1 Identification de la période sèche	41
II.7.3.2 Climagramme d'Emberger	42
II.8. Géologie de la zone d'étude	43
II.9 Cadre géologique générale	43
II.10. Identification des formations hydrogéologiques.	44
II.11.1 identification des différentes nappes	44
1. Les nappes phréatiques dans la région des Zibans	45
2. Les nappes profondes	45
II.11.3 La piézométrie	47
II.12 Conclusion	48

Partie B : Etude expérimentale	49
I.1 Introduction	51
I.2 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]	51
I.3 Méthodes de traitement des données	53
I.3.1 Traitement des données par Excel	53
I.3.2 Traitement des données par diagramme	53
• Le diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkaloff	55
• Le diagramme de Chadha	56
I.4 Aptitudes des eaux d'irrigation	59
I.4.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)	59
I.4.2 La teneur en sodium (Na%)	60
I.4.3 L'indice de perméabilité (PI)	60
I.4.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)	61
II.5 Analyse Statistique Multivariée	61
II.5.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)	61
I.6 Conclusion	62
I.1. Introduction	64
II.2. Paramètres physico-chimiques	64
II.2.1. Bilan Ionique	64
II.3 Paramètres physiques	65
II.3.1 La température	65
II.3.2 Potentiel d'hydrogène (pH)	66
II.3.3 Minéralisation (Conductivité électrique CE)	67
II.4 Les paramètres chimiques	68
II.4.2 Les Cations Majeurs	68
II.4.2.1 Le Calcium (Ca²⁺)	68
II.4.2.2 Le Magnésium (Mg²⁺)	69
II.4.2.3 Le Sodium (Na²⁺)	70
II.4.2.4 Le Potassium (K⁺)	71
II.4.3 Les Anions Majeurs	72
II.4.3.1 Bicarbonate (HCO₃⁻)	72
II.4.3.2 Sulfate (SO₄²⁻)	72
II.4.3.3 Chlorure (Cl⁻)	73
II.4.3.4 Nitrate (NO₃⁻)	74
II.4.4 Analyse statistique des paramètres physico-chimique	75
II.5 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]	76
II.6 Classification hydro-chimique des eaux souterraines	78

II.6.1 Traitement des données par Diagramme	78
II.6.1.1 Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.)	78
II.7 Les aptitudes des eaux d'irrigation	84
II.7.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)	84
II.7.2 La teneur en sodium (Na%)	86
II.7.3 L'indice de perméabilité (PI)	88
II.7.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)	89
II.8 Analyse en composantes principales (ACP)	90
II.9 Conclusion	93
Conclusion générale	95
Références Bibliographies	96

Résumé

Cette étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines dans la région de Mekhadema, en mettant l'accent sur leur aptitude à la consommation humaine et à l'irrigation. Des échantillons ont été collectés à partir de 14 forages, sélectionnés pour leur équilibre ionique. Les résultats ont révélé une forte minéralisation des eaux, dominée par les ions chlorure, sulfate, calcium et magnésium. Les analyses hydrochimiques ont montré que les eaux appartiennent principalement aux types chloruré sodique et sulfaté calcique magnésien, traduisant l'influence de la géologie locale et des interactions avec les roches évaporitiques.

Selon le diagramme de Riverside, les eaux destinées à l'irrigation sont classées entre C3S1 et C4S1, indiquant une qualité moyenne à mauvaise, nécessitant des mesures correctives telles que le lessivage périodique et l'ajout de gypse, notamment dans les sols lourds. Les indices complémentaires (SAR, Na%, PI, MHR) confirment ce diagnostic. L'analyse en composantes principales (ACP) a identifié deux axes expliquant 56,78 % de la variance :

- F1 (38,79 %) traduit la minéralisation globale,
- F2 (17,99 %) est lié aux processus de dissolution du gypse et aux activités anthropiques.

Dans ce contexte, une évaluation continue de la qualité de l'eau est essentielle pour une gestion durable de la ressource.

Mots-clés : Mekhadema, minéralisation, eau souterraine, irrigation, activités anthropiques.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة المياه الجوفية في منطقة مخادمة، مع التركيز على مدى صلاحيتها للاستهلاك البشري والسقي. تم جمع عينات من 14 بئراً في المنطقة، بعد التأكد من توازنها الأيوني. أظهرت النتائج وجود تمعدن مرتفع في المياه، مع سيادة لأيونات الكلوريد، الكبريتات، الكالسيوم، والمغنيسيوم. وقد بينت التحاليل أن المياه مصنفة بشكل رئيسي ضمن النوعين الكلوردي الصوديومي والكبريتي الكالسيومي المغنيسيومي، مما يعكس تأثير التكوينات الجيولوجية وتفاعل المياه مع الصخور الملحية.

وفقاً لرسم Riverside، تم تصنيف مياه الري ضمن الفئتين C3S1 وC4S1، مما يدل على جودة متوسطة إلى سيئة، وتتطلب تدابير تصحيحية مثل الغسيل الدوري وإضافة الجبس، خاصة في الأراضي الثقيلة أو منخفضة النفاذية. وقد أكدت المؤشرات الإضافية مثل SAR، Na%، PI، MHR هذا التقييم.

وأظهرت تحليل المكونات الرئيسية (ACP) وجود محورين أساسيين يفسران 56.78% من التباين:

- F1 (38.79%) يعبر عن التمعدن العام،
- F2 (17.99%) يعكس عمليات ذوبان الجبس وتأثيرات الأنشطة البشرية مثل استخدام الأسمدة والمياه المستعملة.

بناءً على ما سبق، فإن التقييم المستمر لجودة المياه يعد أمرًا ضروريًا لضمان استدامة استخدامها وتقليل المخاطر الصحية المرتبطة بالمياه غير المعالجة.

الكلمات المفتاحية: مخادمة ، المياه الجوفية، التمعدن، الري، الأنشطة البشرية.

Abstract

This study aims to assess the quality of groundwater in the Mekhadema area, focusing on its suitability for human consumption and agricultural irrigation. Samples were collected from 14 wells, selected based on ionic balance. The results showed a high mineralization level dominated by chloride, sulfate, calcium, and magnesium ions. Hydrochemical analysis indicated that the water types were mainly sodium chloride and calcium magnesium sulfate, reflecting the influence of local geology and interactions with evaporitic rocks.

According to the Riverside diagram, irrigation waters were classified into C3S1 and C4S1 categories, indicating moderate to poor water quality. Their use requires corrective measures such as periodic leaching and gypsum application, especially in heavy or low-permeability soils. Complementary indices (SAR, Na %, PI, MHR) supported these findings.

Principal Component Analysis (PCA) revealed two main components accounting for 56.78 % of the variance:

- F1 (38.79 %) represents overall mineralization,
- F2 (17.99 %) is associated with gypsum dissolution and anthropogenic influences (e.g., fertilizers, wastewater).

In this context, continuous monitoring of groundwater quality is essential to ensure sustainable management and to mitigate health risks linked to untreated water.

Key words: Mekhadema, groundwater ,Mineralization, Irrigation, Human activities,.

Liste des tableaux

Tableau N°1 : Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau Potable OMS (2006) et JORA (2014).....	21
Tableau N°2 : Indicateurs microbiens courants et causes possibles de leur présence dans l'eau potable (Verhille, 2013).....	22
Tableau N°3 : Classification des eaux selon la dureté totale (Berne et al. 1991).....	23
Tableau N°4: Certains contaminants courants des eaux souterraines et les sources de pollution associées. Source : GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006	26
Tableau N°5 : Répartition de l'habitat (DPSB 31/12/2015).....	33
Tableau N°6: Répartition de l'habitat selon la zone D'identification (DPSB 31/12/2015)	33
Tableau N°7 : Répartition de l'habitat selon le genre (DPSB 31/12/2015).....	34
Tableau N°8: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019	37
Tableau N°9: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019) Source Station météorologique de Biskra 2019	38
Tableau N°10: Températures moyennes mensuelles [maximales : T (°C) Max. et minimales : T (°C). Min] de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019	38
Tableau N°11: Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019).....	39
Tableau N°12: Evaporation moyennes mensuelle pour la période de (2008– 2018).	39
Tableau N°13: Vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018).....	40
Tableau N°14: vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019).....	41
Tableau N°15: Températures et précipitations en (mm),Moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019).....	41
Tableau N°16: Valeurs d'indice de Climagramme d'Emberger, station de Biskra (2008, 2018)	42
Tableau N°17: Poids relatif des paramètres physico-chimiques.....	52
Tableau N°18: Classification de l'IQE, statut, et utilisation possible de l'échantillon d'eau (Balamurugan 2020).	52
Tableau N°19: Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R.....	57
Tableau N°20: Paramètres physico-chimiques de l'eau de 14 forages-ANRH.....	64
Tableau N°21 : Balance Ionique de l'eau de 14 forages-ANRH.....	64

Tableau N°22: Statistique de la température de 14 forages.....	66
Tableau N°23: Statistique du pH de 14 forages.....	67
Tableau N°24: Statistique de la CE de 14 forages.....	68
Tableau N°25: Statistique de Calcium de 14 forages.....	69
Tableau N°26: Statistique de Magnésium de 14 forages.....	70
Tableau N°27: Statistique de Sodium de 14forages.....	70
Tableau N°28: Statistique de Potassium de 14 forages.....	71
Tableau N°29: Statistique de Bicarbonate de 24 forages.....	72
Tableau N°30: Statistique de Sulfate de 14 forages.....	73
Tableau N°31: Statistique de Chlorure de 24 forages.....	74
Tableau N°32: Statistique de Nitrate de 24 forages.....	75
Tableau N°33: Résultats de matrice de corrélation.....	75
Tableau A -N° 34: Valeurs de IQE de 14 forages.....	76
Tableau B -N° 35: Récapitulative de résultats de IQE.....	77
Tableau N°36: Les classes issues du diagramme de RIVERSIDE (CLEMANT et GALAND, 1979).....	82
Tableau N°37: Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE.....	83
Tableau N°38: Résultats des SAR de 14 forages.....	85
Tableau N°39: Résultats des Na% de 14 forages.....	87
Tableau N°40: Résultats des PI de 14 forages.....	88
Tableau N°41: Résultats des MHR de 14 forages.....	89
Tableau N°42: Variance totale expliquée.....	90
Tableau N°43: Contributions des variables.....	91

Liste des figures

Figure N°1: Présentation des eaux souterraines systèmes dynamiques.	19
Figure N°2 : Principaux mécanismes de transport des contaminants Vers l'eau souterraine (Qualité de l'eau potable dans les communautés des Premières Nations. Consulté le [2025].	26
Figure N°3: Carte sur la situation géographique de Mekhadema	33
Figure N°4 : Nombre de la population par rapport à la zone d'identification	34
Figure N°5: Répartition l'habitat selon le genre	34
Figure N°6: Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).	37
Figure N°7: précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)	37
Figure N°8: La précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019).	38
Figure N°9: Variabilités thermique de la région de Biskra durant la période (2008-2018). ...	39
Figure N°10: Evaporation mensuelle pour la période de (2008– 2018).	40
Figure N°11: Courbe de la vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018).	40
Figure N°12: La vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019).	41
Figure N°13: le Diagramme Ombrothermique (Juin 2018-Mai 2019)	42
Figure N°14: Localisation de la région de Biskra sur le Climagramme d'Emberger.	43
Figure N°15: Position géographique de la commune de Mekhadema. (Google Maps, 2025).	43
Figure N°16: Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).	44
Figure N°17: Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011)	46
Figure N°18: Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).	47
Figure N°19: Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)	47
Figure N°20 : Interface de commande du logiciel Diagramme	54
Figure N°21: Représentation des faciès chimiques des eaux avec Diagramme de Piper.	55
Figure N°22: Diagramme de Schoeller Berkloff.	56
Figure N°23: Diagramme de Chadha	56
Figure N°24: Diagramme de Richards (Riverside).	58
Figure N°25: Diagramme de Wilcox.	59
Figure N°26: Variation du déséquilibre ionique (ΔE) dans les 14 forages.	65
Figure N°27: Histogramme de la température de 14 forages.	66
Figure N°28: Histogramme du pH de 14 forages.	67
Figure N°29: Histogramme de la conductivité électrique de 14 forages.	68
Figure N°30: Histogramme de Calcium de 14 forages.	69

Figure N°31: Histogramme de Magnésium de 14 forages.....	69
Figure N°32: Histogramme de Sodium de 14 forages.	70
Figure N°33: Histogramme de Potassium de 14 forages.	71
Figure N°34: Histogramme de Bicarbonate de 14 forages.	72
Figure N°35: Histogramme de Sulfate de 14 forages.	73
Figure N°36: Histogramme de Chlorure de 14 forages.	74
Figure N°37: Histogramme de Nitrate de 24 forages.	75
Figure N°38: Histogramme de IQE de 14 forages.	78
Figure N°39: Interface de logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A version 8.44).	78
Figure N°40: Diagramme de Piper pour 14 forages de Mekhadema	79
Figure N°41: Diagramme de Schoeller et Berkloff pour 14 forages de Mekhadema.	81
Figure N°42: Diagramme de Riverside pour les 14 forages de Mekhadema.	82
Figure N°43: Diagramme de Wilcox pour 14 forages de Mekhadema	84
Figure N°44: Histogramme de SAR pour 14 forages.	85
Figure N°45: Histogramme des Na% de 14 forages.	87
Figure N°46: Histogramme des PI de 14 forages.	89
Figure N°47: Histogramme des MHR de 14 forages.	90
Figure N°48: Projection des variables sur le premier plan factoriel.	92

Liste des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne.

APC : Assemblée Populaire Communale.

APFA : Accession à la Propriété Foncière Agricole.

CI : Consommation Intermédiaire.

DSA : Direction des Services Agricole.

GCA : Générales des Concessions Agricoles.

ITDAS : Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne.

MADRP : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et de la Pêche.

MB : Marge Brute.

MN : Marge Nette.

ONM : Office Nationale de Météorologie.

PRM : Périmètre.

PB : Produit Brute.

PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme.

PNDAR : Plan National du Développement Agricole et Rural.

PRR : Programme de Renouveau Rural.

RGPH : Recensement Générale de la Population et de l'Habitat.

SAT : Superficie Agricole Totale.

SAU : Superficie Agricole utile.

SSP : Sous Système de Production.

HHR: Human Health Risk

Introduction Générale

Introduction Générale

L'eau souterraine constitue une ressource vitale et stratégique pour les régions arides et semi-arides comme l'Algérie. Bien que l'attention du grand public soit souvent tournée vers les eaux de surface telles que les rivières et les oueds, il est important de rappeler que près de 97 % de l'eau douce utilisable sur Terre provient des nappes souterraines. Ces eaux, bien qu'invisibles à l'œil nu, jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement domestique, le développement agricole et la durabilité des écosystèmes.

En Algérie, et plus précisément dans les zones sahariennes comme la région de Biskra, l'exploitation des ressources hydriques repose en grande partie sur les eaux souterraines. Cette dépendance s'explique par la faible pluviométrie, la variabilité climatique, et les besoins sans cesse croissants liés à l'urbanisation, à l'essor démographique et aux activités agricoles intensives. La commune de Mekhadema, située dans la wilaya de Biskra, illustre parfaitement cette dynamique où l'agriculture constitue l'activité dominante, nécessitant une quantité importante d'eau d'irrigation, souvent tirée des nappes profondes.

Cependant, l'utilisation accrue de cette ressource soulève de nombreuses problématiques, notamment celles liées à la qualité chimique de l'eau, à sa salinité croissante et à son aptitude à divers usages, notamment la consommation humaine et l'irrigation. La minéralisation excessive, la présence d'ions comme le chlorure, le sulfate, le calcium ou encore le magnésium, ainsi que les effets des activités anthropiques (usage d'engrais, eaux usées), sont autant de facteurs influençant la qualité des eaux disponibles.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail de recherche, dont l'objectif principal est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Mekhadema, à partir de 14 afin de déterminer leurs classifications hydrochimiques et leur aptitude à la consommation et à l'irrigation. Pour ce faire, des outils analytiques comme les diagrammes de Riverside, l'analyse en composantes principales (ACP) ainsi que des cartes thématiques ont été mobilisés.

Le manuscrit est structuré en deux parties complémentaires :

➤ **Partie A : Étude bibliographique**

- Chapitre I : Présentation de la problématique de la qualité des eaux souterraines et de la pollution.
- Chapitre II : Description détaillée de la zone d'étude (Mekhadema– Wilaya de Biskra).

➤ **Partie B : Étude expérimentale**

- Chapitre I : Présentation des matériaux et méthodes utilisés dans l'analyse.
- Chapitre II : Présentation, analyse et interprétation des résultats obtenus.

**Partie A : Littérature et revue
bibliographique**

Chapitre I : Qualité des eaux souterraine et problème de pollution

I.1 Introduction

Dans des conditions naturelles, les eaux souterraines sont généralement potables et ne nécessitent que peu de traitement avant leur utilisation, grâce au rôle filtrant des sols et des roches de la zone non saturée qui protègent efficacement la nappe phréatique contre les contaminants de surface (OMS, 2017). Toutefois, cette protection naturelle peut être compromise par les infiltrations massives de polluants issues des pratiques agricoles modernes (comme l'usage excessif d'engrais et de pesticides), des rejets industriels, ainsi que par l'absence ou l'insuffisance d'infrastructures sanitaires adéquates (UNESCO, 2010). Une fois contaminées, les eaux souterraines sont très difficiles et coûteuses à dépolluer, et les effets de cette pollution peuvent mettre longtemps à se manifester, rendant la détection et l'intervention tardives (OMS, 2017). Cela souligne l'importance cruciale d'une gestion rigoureuse des aquifères et de la mise en place de mesures préventives visant à limiter les risques de pollution.

I.2 Caractéristiques des eaux souterraines :

I.2.1 Définition des eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent une ressource précieuse et essentielle pour l'approvisionnement en eau potable de l'humanité. Elles sont stockées dans des aquifères, formations géologiques constituées de roches poreuses ou fissurées, permettant l'accumulation de l'eau sous forme de nappes (Guergazi et Achour, 2005). Généralement, ces eaux se distinguent par une faible turbidité et une contamination bactérienne réduite grâce à la filtration naturelle du sol, ce qui les rend plus protégées que les eaux de surface. Toutefois, elles présentent souvent une dureté élevée en raison du contact prolongé avec les formations rocheuses des aquifères (Chelli et Djouhri, 2013). L'origine principale des eaux souterraines est constituée des précipitations (pluie ou neige), qui s'infiltrent dans le sol lorsque l'eau n'est pas perdue par évaporation, transpiration ou ruissellement. Sur un sol sec, cette infiltration est limitée, l'eau étant retenue sous forme de film à la surface ou dans les micropores des particules du sol (Manahan, 2005).

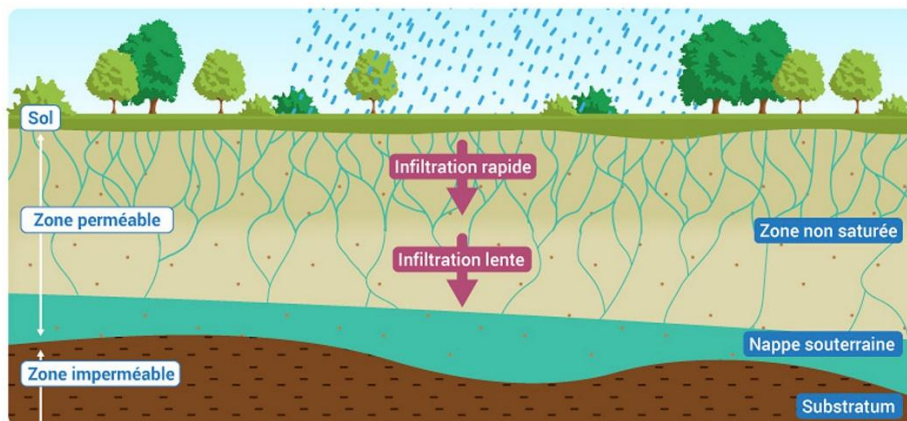


Figure 1: Présentation des eaux souterraines systèmes dynamiques. Consulté en juin 2025).

I.2.2 Importance des eaux souterraines

L'eau circule sous la surface du sol. Comme l'eau de surface, mais à des débits beaucoup plus lents, elle s'écoule de l'amont vers l'aval pour ultimement rejoindre les cours d'eau et les lacs. L'émergence de l'eau souterraine peut contribuer considérablement au maintien des débits de base d'un cours d'eau ou du niveau de l'eau d'un lac. Durant les périodes sèches, certains cours d'eau et milieux humides peuvent être entièrement alimentés par l'eau souterraine. À l'inverse, en période de précipitations abondantes et de crue, ce sont généralement les eaux de surface qui alimentent les eaux souterraines. Ainsi, l'eau souterraine est étroitement liée aux eaux de surface et est une composante importante du cycle global de l'eau (COSANDEY, 2003).

Les eaux souterraines contribuent à l'alimentation des sources et des cours d'eau et leur rôle est souvent essentiel pendant les périodes d'étiage. Elles sont exploitées pour la consommation humaine (eau potable), l'agriculture (irrigation) et l'industrie. L'accumulation de nitrate dans les hydro systèmes est aujourd'hui à l'origine de problèmes de santé publique même si cela fait encore l'objet de débats (WEYER et al., 2001). L'absorption répétée d'importantes quantités de nitrate pourrait favoriser l'apparition de certains cancers (MORALES et al., 1996).

I.3 Norme de qualité d'eau:

A- L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) :

La nature et la forme des normes s'appliquant à l'eau de boisson peuvent varier d'un pays ou d'une région à l'autre. Il n'existe pas d'approche unique, universellement applicable. Lors du développement et de la mise en œuvre des normes, il est essentiel de prendre en compte la législation actuelle ou en préparation concernant l'eau, la santé et l'administration locale et d'évaluer la capacité du pays à établir des réglementations et à les faire appliquer. Des démarches susceptibles de fonctionner dans un pays ou une région ne sont pas nécessairement transposables à d'autres pays ou régions. Il importe que chaque pays fasse le bilan de ses besoins et de ses capacités pour la mise au point d'un cadre réglementaire (OMS, 2017).

B- Norme Algérienne (JORA 2014) :

Les normes algériennes (JORA 2014) définissant la potabilité de l'eau fixent les seuils limites de présence de certaines substances nocives ou indésirables qui peuvent se trouver dans l'eau : Certains éléments doivent être totalement absents de l'eau pour qu'elle soit jugée potable, comme les agents pathogènes (virus, bactéries...) qui présentent un risque important pour la santé.

D'autres éléments font l'objet de seuils maximaux d'admissibilité, comme par exemple les nitrates, les pesticides ou les métaux lourds. Ces critères sont déterminés selon les connaissances scientifiques et le risque acceptable déterminé et évoluent dans le temps. L'eau est à ce jour la denrée alimentaire la plus

réglementée, et elle fait donc l'objet de nombreux traitements pour être conforme avant d'arriver aux consommateurs (Guerzou, 2008).

Tableau N°1 : Normes OMS et Algériennes des paramètres physico-chimiques pour l'eau Potable OMS (2006) et JORA (2014)

Substances	Unité	Normes OMS	Norme Algérienne
Couleur	mg/l platine	Pas de valeur guide	15
Odeur à 25°C	Taux dilution	Acceptable	4
Saveur à 25°C	Taux dilution	Acceptable	4
Turbidité	NTU	5	5
Température	C°	25	25
Calcium	mg/l	/	200
Magnésium	mg/l	/	150
Chlorure	mg/l	750	1000
Ions hydrogène	PH	6,5 - 9,5	6,5 - 10
Dureté	mg/l de CaCO ₄	800	1100
Conductivité A 20°C	µS/cm	pas de norme	2800
Ammonium	mg/l	Pas de contraintes	0,5
Potassium	mg/l	-226	-464
Oxygène dissous	O ₂ %	Pas de valeur guide	Pas de valeur guide
Fluorure	mg/l	1,5	1,5
Fer	mg/l	Pas de valeur guide	0,3
Nitrate	mg/l	50	50
Sulfate	mg/l	300	200
Sodium	mg/l	Pas de valeur guide	200
Phosphore	mg/l	pas de norme	5
Résidu sec	mg/l	/	1500

I.4 Principaux paramètres de potabilité

I.4.1 Paramètres organoleptiques (physique)

I.4.1.1. Couleur

Dans l'idéal, l'eau potable doit être claire et incolore. Le changement de couleur d'une eau potable peut être le premier signe d'un problème de qualité (Chelli et Djouhri ,2013).

I.4.1.2 Odeur et Saveur

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur non désagréables. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, émanent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés purement organoleptiques (Chelli et Djouhri ,2013).

I.4.2 Paramètres bactériologiques

Les eaux naturelles, notamment les eaux superficielles, contiennent fréquemment des micro-organismes tels que des bactéries, des virus ou des parasites, tandis que leur présence est généralement plus faible dans les eaux souterraines. Certains de ces micro-organismes peuvent être pathogènes pour l'homme et représenter un risque sanitaire immédiat, en particulier pour les populations vulnérables telles que les jeunes enfants, les personnes âgées ou immunodéprimées (ARS d'Auvergne, 2014). Leur présence dans l'eau destinée à la consommation humaine est souvent liée à une dégradation de la qualité de la ressource (pollution, infiltrations après épisodes pluvieux), à une protection insuffisante des points de captage, à une défaillance dans le traitement de désinfection ou encore à une contamination au cours du transport ou du stockage de l'eau dans le réseau de distribution. L'impact sanitaire dépend alors non seulement de la nature des germes présents, mais aussi de leur concentration et de la durée d'exposition. Certains indicateurs microbiens permettent d'évaluer la qualité microbiologique de l'eau potable, comme illustré dans le tableau N°02.

Tableau N°2 : Indicateurs microbiens courants et causes possibles de leur présence dans l'eau potable (Verhille, 2013).

Indicateur microbien	Causes possibles de la détection de l'indicateur	CAM*ou valeur de référence
E. coli	Contamination fécale récente, présence possible d'organismes pathogènes.	Aucune UFC détectable dans 100 ml.
Coliformes fécaux	Traitement et désinfection inadéquats, recolonisation bactérienne ou infiltration dans le réseau de distribution	Aucune UFC détectable dans 100 ml d'eau traitée.
Coliformes totaux	Leur présence à la sortie de la station de traitement révèle une défaillance grave du système. Dans le réseau de distribution, elle indique une vulnérabilité à la contamination ou une recolonisation bactérienne, sans lien nécessaire avec une contamination fécale.	. Aucune UFC détectable dans 100 ml à la sortie de station de traitement. .Ailleurs dans le réseau de distribution, elle dépend de la fréquence des prélèvements et de la taille du réseau 25.
Numération des bactéries Hétérotrophes (NBH)	. Un pic de NBH dans l'eau sortant de la station de traitement peut indiquer un problème dans le traitement ou un changement de qualité à la source avant de	. La valeur et la plage de référence sont à chaque réseau et dépendent des caractéristiques du site.

	<p>même le traitement.</p> <p>.Une pie de NBH dans le réseau de distribution indique qu'il pourrait y avoir une recolonisation bactérienne.</p>	
--	---	--

I.4.3 Paramètres physicochimiques

I.4.3.1 Température

Les variations de température saisonnières peuvent affecter les eaux, surtout quand elles sont superficielles. Elle est accélérée la croissance de micro-organismes, d'algues, entraînant des goûts et des Odeurs désagréables, ainsi qu'une augmentation de couleur et de la turbidité dans le cas de température supérieur à 15°C.

En rapport avec les normes de potabilités de l'eau fixées journal officiel de la république (JORA) L'eau est : excellente lorsque la température varie entre 20 et 22°C passable lorsque la température oscille dans l'intervalle de 22 à 25°C (JORA, 2014).

I.4.3.2 Turbidité

La turbidité est l'indicateur du caractère plus ou moins troublant de l'eau ; c'est l'opposé de la limpidité. Techniquement, la turbidité est la propriété optique de l'eau qui fait que la lumière incidente est déviée (diffraction) ou absorbée par les particules plutôt que transmise en ligne droite (C.E.R.S.P, 2003). Elle est généralement causée par des matières en suspension et des particules colloïdales d'origine naturelle (acides humiques, particules provenant de la dégradation des végétaux ou de l'érosion du sol) ou anthropique (rejets industriels, agricoles et urbains).

I.4.3.3 Conductivité

La conductivité de l'eau, exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflète sa teneur en sels minéraux dissous et permet d'évaluer son niveau de minéralisation. Plus la conductivité est élevée, plus l'eau est riche en ions dissous (Tardat et Beaudry, 1984). Selon Rodier (2009), l'eau peut être classée de déminéralisée à très salée en fonction de cette valeur. Par ailleurs, la dureté de l'eau, liée à la concentration en ions calcium et magnésium, est un autre indicateur chimique important. Elle s'exprime en °f (degrés français) ou en mg/L de CaCO_3 , et permet également de classifier les eaux selon leur teneur en minéraux (Rodier, 2009).

Tableau N°3 : Classification des eaux selon la dureté totale (Berne et al. 1991)

TH en degrés français (°F)	Spécificité de l'eau
Spécificité de l'eau	Eau très douce
0 à 6	Eau douce
Eau très douce	Eau moyennement dure
6 à 15	Eau dure

I.4.3.4 Potentiel d'Hydrogène (pH)

C'est une mesure de l'activité des ions H^+ et OH^- contenus dans une eau. En chimie, par convention, on considère le pH de l'eau pure comme celui qui correspond à la neutralité d'une solution. Autrement dit, toute solution de pH inférieur à 7 (à 25°C) est considérée comme acide et inversement. Les normes édictées par la réglementation locale et internationale en matière de potabilité de l'eau recommandent un pH situé entre 6,5 et 9,0 (JORA, 2014). Il diminue en présence de la matière organique et augmente en saison sèche, quand l'évaporation est élevée.

I.4.3.5 Les ions majeurs

Les éléments majeurs dissoutes dans une eau naturelle provenant des terrains traversés (calcium, sodium, potassium, sulfates, chlorures) :

. Calcium

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés (Rodier, 2009). Magnésium Le magnésium est un élément très répandu dans la nature et il est présent dans la plupart des eaux naturelles. Le magnésium contribue à la dureté de l'eau sans être l'élément essentiel et aussi il est indispensable pour la croissance et pour la production de certaines hormones (Savary, 2010).

. Potassium

Le potassium est le cation le plus abondant du liquide intracellulaire et joue un rôle important dans un grand nombre de fonctions cellulaires pour lesquelles les besoins de l'organisme par jour sont importants (Houillier et al, 2004).

. Sulfate

Les sulfates (SO_4^{2-}) proviennent du ruissellement ou d'infiltration dans les terrains à gypse. Ils résultent également de l'activité de certaines bactéries (chlorothiobactéries, rhodothiobactéries, etc.). Cette activité peut oxyder l'hydrogène sulfuré (H_2S) toxique en sulfate (Belghitim, 2013).

. Chlorures

Les teneurs en chlorures (Cl^-) des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes non polluées ont souvent une teneur en chlorures. Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé (Degremont, 2005).

. Sodium

Le sodium est un élément constant de l'eau, toutefois les concentrations peuvent être extrêmement variables. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, des retombées d'origine marine, de la venue d'eaux salées dans les nappes aquifères, des nombreux usages industriels etc.... Un régime normal apporte 3 à 5 g /j de sodium (8 à 12 g /j en chlorure de sodium).

La quantité nécessaire est inférieure à 200 mg/j pour l'enfant et à 2000 mg/j pour l'adulte (Belghitim, 2013). La fabrication des explosifs, dans l'industrie chimique comme oxydant, et comme conservateur dans les denrées alimentaires (Savary, 2010).

I.4.3.6. Nutriments

. Nitrites

Ils sont également assez largement présents, mais à des niveaux bien moindres que les Nitrates. Les nitrites proviennent d'une oxydation incomplète des matières organiques. Le taux normal en nitrites est fixé à 0,1mg/l selon l'OMS. La présence des Nitrites dans l'eau en quantité importante dégrade la qualité de l'eau et pourrait affecter la santé humaine. La toxicité liée au nitrite est très significative en raison de leur pouvoir oxydant (Rodier, 2009).

. Nitrates

Les nitrates constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Les nitrates sont très répandus dans la plupart des eaux et dans les plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des végétaux. Soluble dans l'eau, ils se retrouvent naturellement en faible concentration dans les eaux souterraines et superficielles. Les nitrates sont employés dans la fabrication des explosifs, dans l'industrie chimique comme oxydant, et comme conservateur dans les denrées alimentaires (Savary, 2010).

I.4.3.7. Métaux lourds

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds.

On appelle métaux lourds tout élément métallique naturel dont la masse volumique dépassent 5g/cm³. Ils englobent l'ensemble des métaux et métalloïdes présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Les métaux lourds les plus souvent considérés comme toxique pour l'homme sont : le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. D'autres comme le cuivre, le zinc, le chrome, pourtant nécessaires à l'organisme en petites quantités, peuvent devenir toxiques à doses plus importantes.

I.5 Pollution des eaux

La dégradation de la qualité des eaux souterraines peut résulter de sources naturelles ou anthropiques. Bien que ces eaux soient généralement potables sans traitement, certaines régions présentent naturellement des concentrations élevées de substances nuisibles, comme l'arsenic au Bangladesh ou la salinisation d'origine géologique. Toutefois, les activités

humaines aggravent souvent ces phénomènes. En Afrique, la détérioration de la qualité des eaux souterraines est fréquemment liée à l'urbanisation mal contrôlée (fuites de latrines, rejets industriels), à la surexploitation pour l'irrigation qui intensifie la salinisation, et à l'intrusion d'eaux salées dans les nappes côtières causée par l'abaissement du niveau piézométrique (GW-MATE, Note 8, 2002–2006).

I.5.1 Sources de pollution

À l'échelle mondiale, les aquifères sont de plus en plus menacés par la pollution due à l'urbanisation, à l'agriculture intensive, aux activités industrielles et minières. La lenteur de l'écoulement des eaux souterraines, notamment dans les aquifères profonds, peut masquer pendant longtemps la présence de contaminants, rendant la pollution difficile à détecter avant qu'elle ne soit largement propagée. Une fois contaminée, la nappe devient souvent difficile, voire impossible, à restaurer, en raison des coûts élevés et des contraintes techniques. La prévention, par la protection des zones de recharge et un contrôle rigoureux des rejets, est donc essentielle. Bien que les sols puissent atténuer certains polluants via des processus physico-chimiques et biologiques, cette capacité n'est pas universelle ni infinie. Ainsi, les nappes superficielles peu profondes restent particulièrement vulnérables aux sources diffuses de pollution d'origine domestique, agricole ou industrielle.

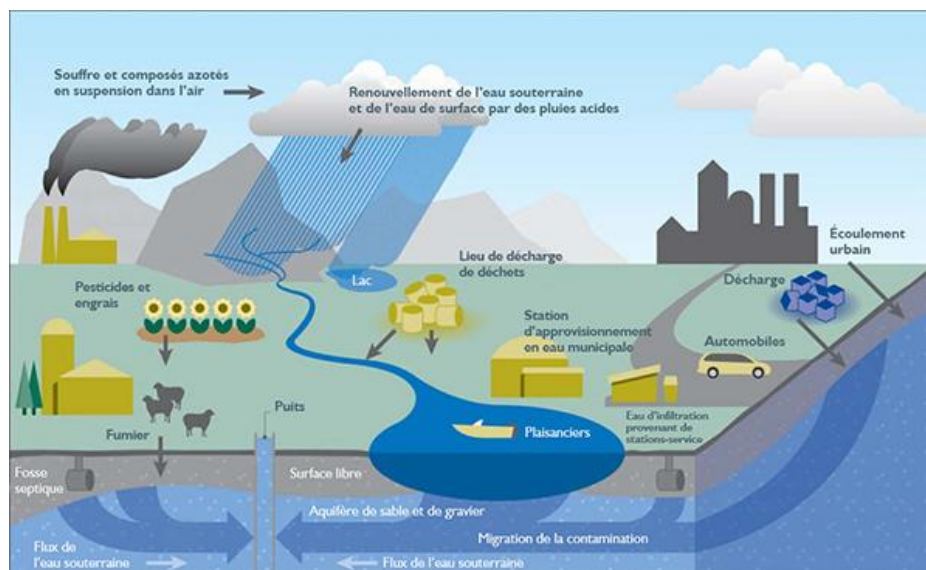


Figure N°2 : Principaux mécanismes de transport des contaminants Vers l'eau souterraine (Qualité de l'eau potable dans les communautés des Premières Nations. Consulté le [2025])

Tableau N°4: Certains contaminants courants des eaux souterraines et les sources de pollution associées. Source : GW-MATE Briefing Note Séries, Note 8, 2002-2006

Source de pollution	Type de contaminant
Activité agricole	Les nitrates, ammonium, pesticides, organismes fécaux
Assainissement individuel	Les nitrates, les organismes fécaux, hydrocarbures synthétiques de trace
Stations d'essence & Garages	Benzène, d'autres hydrocarbures aromatiques, des phénols, des hydrocarbures halogènes

Enfouissement des déchets solides	Ammonium, salinité, hydrocarbures halogènes, métaux lourds
Industries métalliques	trichloréthylène, tétrachloréthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, métaux lourds, des phénols, cyanures
Travaux de Peinture	Alkylbenzene, tétrachloroéthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, des métaux, quelques hydrocarbures aromatiques
Industrie du bois	Pentachlorophénol, certains hydrocarbures aromatiques
Nettoyage à sec	Trichloroéthylène, tétrachloroéthylène
Fabrication de pesticides	divers hydrocarbures halogènes, des phénols, de l'arsenic
Vidange des boues d'eaux usées	les nitrates, les divers hydrocarbures halogènes, plomb, zinc
Tanneries	Chrome, divers hydrocarbures halogènes, des phénols
salinité (chlorure de sodium), les hydrocarbures aromatiques	Exploration / Extraction pétrolière et gazière
Les mines de charbon et métallifères	Acidité, divers métaux lourds, fer, sulfates

I.5.1.1. La pollution domestique

La pollution domestique des eaux est principalement liée aux rejets d'eaux usées, qu'ils soient d'origine organique ou chimique. Les eaux issues des activités quotidiennes (toilettes, cuisine, douche, etc.) contiennent des matières organiques et fécales pouvant contaminer les ressources en eau, notamment en l'absence de raccordement adéquat au réseau d'assainissement. Par ailleurs, les produits ménagers, riches en substances chimiques, génèrent une pollution difficilement traitable. Une fois rejetés dans les canalisations ou directement dans l'environnement, ces polluants contribuent à la dégradation chimique des milieux aquatiques (Surfrider Ocean Campus, s.d.).

I.5.1.2. Origine industrielle

Les activités industrielles, notamment celles du secteur manufacturier et tertiaire, consomment de grandes quantités d'eau pour le refroidissement, le traitement et le nettoyage. Lorsque ces eaux usées sont rejetées sans traitement adéquat, elles peuvent contaminer les nappes souterraines, surtout lorsque les installations industrielles ne sont pas raccordées aux réseaux d'égouts. L'usage de fosses, de puisards ou de réservoirs septiques expose directement les ressources souterraines à des risques de pollution. Certaines industries comme les stations-service, les ateliers de traitement de photos, ou les fabricants d'équipements électroniques sont particulièrement concernées, du fait de leur rejet de produits chimiques toxiques. La pollution peut aussi provenir de fuites de réservoirs contenant des substances dangereuses (acides, solvants, hydrocarbures) ou du stockage inadéquat de matériaux à même le sol. L'exploitation minière et pétrolière contribue également à cette contamination (Degrémont, 1991).

I.5.1.3 La pollution agricole

Les activités agricoles sont une source majeure de contamination des eaux souterraines. L'utilisation excessive ou inappropriée de pesticides, d'engrais, d'herbicides ainsi que les déchets d'origine animale peuvent provoquer une infiltration de polluants dans les nappes phréatiques. Cette pollution résulte souvent de pratiques telles que le débordement de produits chimiques lors de leur manipulation, le lavage des équipements d'application ou encore l'écoulement incontrôlé dans les sols. Dans les zones agricoles mal drainées, les agriculteurs recourent parfois à des puits de drainage, qui peuvent agir comme des voies directes d'infiltration des polluants vers les eaux souterraines. De plus, le stockage de produits chimiques à proximité de puits ou dans des zones non protégées aggrave ce risque de contamination (Marquita, 2004).

I.5.1.4. Phénomènes naturels

Les eaux souterraines contiennent quelques impuretés, même si elles ne sont pas affectées par les activités humaines.

Les types et les concentrations d'impuretés naturelles dépendent de la nature du matériel géologique par lequel les eaux souterraines se déplacent, et de la qualité de l'eau de recharge.

Les eaux souterraines se déplaçant à travers les roches et les sols sédimentaires, peuvent absorber un éventail de composés tels que le magnésium, le calcium, et les chlorures.

Certaines couches aquifères ont des concentrations naturelles élevées en constituants dissous tels que l'arsenic, le bore, et le sélénium. L'effet de ces sources normales de contamination sur la qualité d'eaux souterraines dépend du type du contaminant et de ses concentrations (Stanley, 2005).

I.5.1.5. Pollution atmosphérique

L'eau d'origine pluviale est relativement polluée. L'origine de cette pollution peut provenir des gaz ou solides en suspension rejetés dans l'atmosphère par les véhicules, les usines ou les centrales thermiques. Ces polluants (oxyde de carbone, dioxyde de soufre, poussière...) sont envoyés vers le sol à la moindre averse.(K.KARA.2020)

I.5.2 Les principaux polluants des eaux

La pollution des milieux aquatiques par des substances introduites par l'homme comme les produits agricoles et industriels a des conséquences néfastes qui menacent l'environnement et qui sont de plus en plus responsables de l'apparition de la pollution organique et chimique de l'eau qui nécessite une lutte soutenue.

I.5.2.1 Les polluants microbiologiques

La pollution microbiologique des eaux se traduit par une forte contamination par de nombreux agents pathogènes, bactéries, protozoaires et virus. L'importance de la pollution de l'eau dépend également des conditions d'hygiène des populations, mais aussi des caractéristiques écologiques et épidémiologiques.

Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient dans l'eau sont les bactéries, les virus, les parasites et les champignons, on parle ainsi de la pollution bactérienne, viral ou parasitaire. (K.KARA.2020)

I.5.2.2 Les polluants chimiques

La pollution chimique des eaux résulte de la libération de certaines substances minérales toxiques dans les cours d'eaux (les nitrates, les phosphates, l'ammoniac et autres sels) ainsi que des ions métalliques. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et les rendent plus dangereuses. Les polluants chimiques sont classés en substances chimiques dites indésirables, les pesticides, les détergents, les colorants et autres éléments toxiques.(KARA.K.2020)

I.5.2.3. Les polluants physiques

La pollution physique désigne la pollution thermique due à la température élevée causant une diminution de la teneur en oxygène dissous ainsi qu'une réduction de la solubilité des gaz et la pollution mécanique, qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variées dans l'eau qui lui confèrent un caractère trouble (KARA.K.2020).

I.6 Conclusion

Ce premier chapitre constitue une étape fondamentale de notre travail de recherche. Il a été consacré à la présentation des principales notions liées à la qualité des eaux souterraines. Nous y avons abordé, dans un premier temps, les caractéristiques générales des eaux souterraines, avant de présenter les normes de qualité de l'eau et les principaux paramètres permettant d'évaluer sa potabilité. Par la suite, une attention particulière a été accordée à la problématique de la pollution des eaux souterraines, à travers une définition rigoureuse et une explication de ses mécanismes et sources potentielles.

L'ensemble des éléments traités dans ce chapitre vise à fournir un socle théorique solide, indispensable à la bonne compréhension de la suite du mémoire. Ce cadre conceptuel permet d'identifier les paramètres essentiels, les indicateurs pertinents, ainsi que les substances à surveiller pour une évaluation correcte de la qualité des eaux souterraines.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Afin de donner une caricature à la commune de de la région de Mekhadema, à travers maints points : commençant par la situer géographiquement, montrer sa spécificité hydrologique et sa spécificité météorologique ainsi que géologique, sans fermer la parenthèse. Car notre chapitre se résume en une petite étude de tous les détails qui font partie de la présentation de cette zone d'étude de la région de Mekhadema.

Cette dernière formerait un point essentiel sur lequel la présente étude a été effectuée, car notre travail s'intéresse en particulier à cette commune et pour arriver à notre objectif celui de faire une recherche menée sur sa qualité d'eau à l'aide de l'indice (IQE) et une analyse multivariée, et on a intérêt de décortiquer, si nous pouvons dire cet endroit pour donner des résultats

II.2. Situation géographique de la région de Mekhadema

La région des Ziban fait partie de la wilaya de Biskra, qui constitue l'une des grandes régions du Sud-est algérien. Elle est située à l'ouest du chef-lieu de la wilaya. Elle est limitée au Nord par les communes suivantes : El Outaya, Branis et Mchounech. À l'Est par la commune d'Aïn Naga, El Haouch. Au Sud par la commune de Still (wilaya d'El Oued) et à l'Ouest par la commune de Chaïba, Zerzour, et Ouled Slimane (wilaya de M'sila).

Cette région est l'une des grandes oasis du Sahara algérien. Elle est composée de deux entités distinctes. Celle située à l'ouest de Biskra est appelée le Zab Gharbi. Elle regroupe administrativement les communes de Tolga, El Ghrous, Bordj Ben Azzouz, Lichana, Bouchagroune, Foughala et El Hadjeb, qui forment un premier groupement constituant l'axe nord de l'oasis. Alors que l'axe sud de l'oasis est formé par l'ensemble des communes suivantes : Oumache, Mlili, Ourlal, Mekhadema et Lioua.

Commune de Mekhadema :

La commune de Mekhadema se situe dans la région des Ziban, à environ 10 kilomètres au sud-est de la ville de Biskra (figure 2), avec une latitude de 34.7667, une longitude de 5.7667 et une altitude moyenne de 92 m, et elle s'étale sur une superficie de 151,6 km² (DB City, 2023). Elle présente un caractère oasien typique, avec une forte dépendance aux eaux souterraines pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable.



Figure N°3: Carte sur la situation géographique de Mekhadema

II.3. Répartition de l'habitat

L'étude de la répartition de l'habitat dans la région de Mekhadema constitue un outil essentiel pour identifier les problèmes, les contraintes et les handicaps qui freinent son développement, sa répartition spatiale équilibrée, ainsi que son dynamisme et ses besoins réels.

Cette répartition est analysée selon plusieurs critères géographiques et démographiques, en s'appuyant sur les données officielles fournies par la Direction de la Planification et des Statistiques de la Wilaya de Biskra (DPSB). Les tableaux ci-après présentent la répartition de l'habitat dans la commune de Mekhadema, selon divers facteurs, arrêtés à la date du 31 décembre 2015.

Tableau N°5 : Répartition de l'habitat (DPSB 31/12/2015)

Commune	Nombre de population	Superficie Km ²	Densité C/Km ²
Mekhadema	869215	151,6	43

Tableau N°6: Répartition de l'habitat selon la zone D'identification (DPSB 31/12/2015)

Commune	Nombre de population par rapport à la zone d'identification				Total
	Groupement centre-ville	Groupement secondaires	Zone dispersés	Population nomade	
Mekhadema	670.410	71.050	117289	10466	869215

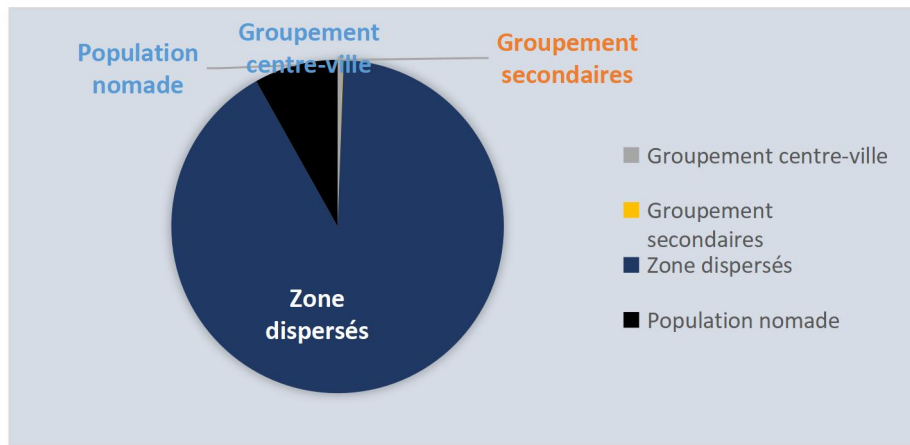


Figure N°4 : Nombre de la population par rapport à la zone d'identification

Figure N°04 illustre la répartition de la population de la commune de Mekhadema selon deux principales zones d'identification géographique :

- Centre-ville : 670 410 habitants (77 %), montrant une forte concentration urbaine liée à la disponibilité des services (eau, électricité, santé...).
- Zone dispersée : 117 289 habitants (13,5 %), souvent en manque d'accès aux services de base.
- Groupements secondaires : 71 050 habitants (8,2 %).
- Population nomade : 10 466 habitants (1,2 %).

Cette répartition montre un déséquilibre en faveur du centre-ville, au détriment des zones rurales.

Tableau N°7 : Répartition de l'habitat selon le genre (DPSB 31/12/2015)

Commune	Répartition l'habitat selon le genre		Total
	Masculin	Féminin	
Mekhadema	443291	425924	869215

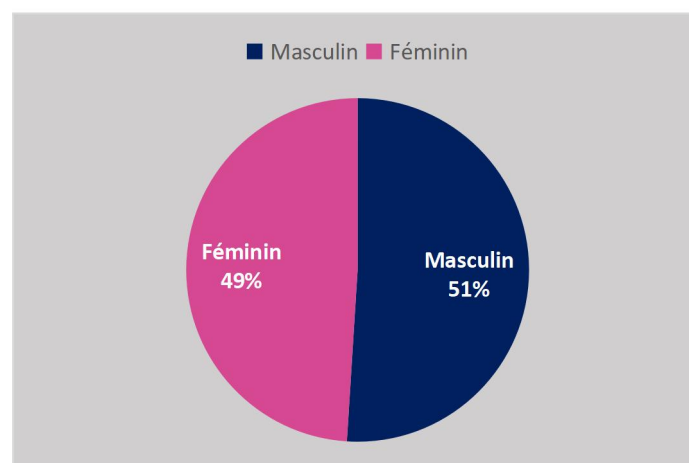


Figure N°5: Répartition l'habitat selon le genre

La figure N°05 illustre la répartition des habitants de la commune de Mekhadema selon le genre, à partir des données fournies par la Direction de la Planification et des Statistiques de la Wilaya (DPSB) en date du 31 décembre 2015.

La répartition par genre est la suivante :

- Hommes : 443 291 individus (51 % environ)
- Femmes : 425 924 individus (49 % environ)

Cette répartition montre un équilibre démographique relativement stable entre les deux sexes au sein de la commune.

Cette répartition révèle un équilibre démographique quasi parfait entre les hommes et les femmes, avec une légère majorité masculine (51 % contre 49 %), soit une différence de seulement 2 %. Ce type de répartition est fréquent dans plusieurs communes algériennes et peut s'expliquer par des facteurs socio-économiques ou culturels propres à la région.

L'analyse des données issues des tableaux précédents concernant Mekhadema permet de dégager plusieurs caractéristiques :

- Une densité moyenne de 43 habitants/km², traduisant une occupation relativement modérée du territoire communal.
- Une répartition spatiale relativement équilibrée entre les différentes zones d'habitation (centre-ville, zones secondaires et zones dispersées), bien que le centre-ville concentre une grande partie de la population.
- La prédominance des zones rurales et dispersées définit Mekhadema comme une région à caractère agricole et pastoral, ce qui oriente les besoins de la population vers les infrastructures de base et les services de proximité.

II.4 Activité d'agriculture

L'économie de Mekhadema repose principalement sur la culture du palmier dattier, avec plus de 90 000 palmiers, dont 70 % de Deglet Nour. Cette activité est soutenue par les programmes de développement agricole (F.N.D.A., P.N.D.A.) et des aides financières.

Les cultures maraîchères sous serres connaissent aussi un essor notable grâce à leur rentabilité rapide.

Malgré ces atouts, le secteur agricole fait face à plusieurs contraintes :

- Manque de main-d'œuvre qualifiée
- Problèmes de drainage
- Surexploitation des nappes phréatiques
- Vétusté des palmiers
- Insuffisance d'infrastructures (électricité, pistes agricoles)

II.5 Types de Sol de la région d'étude

Les sols de Mekhadema présentent les caractéristiques typiques des zones sahariennes arides : faible pluviométrie, évaporation élevée et fortes concentrations en sels solubles.

On y distingue trois grands types :

- Sols peu évolués : à structure simple, pauvre en matière organique.

- Sols calcimagnésiques : riches en carbonates de calcium et magnésium, à texture fine ou moyenne.

- Sols halomorphes : salins, nécessitant une gestion attentive pour préserver la fertilité.

La texture dominante est sablo-limoneuse ou sablo-argileuse, offrant un bon drainage mais exigeant une irrigation maîtrisée et une surveillance de la salinité.

II.6 Relief

La commune de Mekhadema se situe au piémont sud des monts du Zab (chaîne des Ziban) et présente une diversité de formes de relief, réparties du nord au sud :

- **Zone montagneuse** (nord-ouest) : relief accidenté, accès difficile, dernières extensions des monts du Zab.

- **Zone de piémonts** : composée d'éboulis et de dunes sableuses d'origine éolienne, surtout vers le sud.

- **Zone de plaines** : couvre plus de **50 %** du territoire, favorable à l'agriculture et à l'urbanisation.

- **Zone de bas-fonds humides** : marécages temporaires où la nappe phréatique affleure lors des périodes pluvieuses.

II.7 Hydrologie de la région

Située dans une zone aride, Mekhadema connaît un régime hydrologique irrégulier, caractérisé par de faibles précipitations et la présence d'oueds temporaires au régime torrentiel. Ces crues courtes, souvent déclenchées par des orages violents, contribuent à la recharge des nappes phréatiques, notamment profondes.

L'écoulement débute en surface sur les versants montagneux (Atlas saharien, Aurès) avant de se concentrer vers les bas-fonds. Une grande partie de l'eau s'évapore, tandis qu'une autre pénètre les sols pour alimenter les aquifères.

La morphologie des lits fluviaux et la topographie influencent fortement la dynamique des crues, les risques d'érosion et la gestion de l'eau, rendant l'étude des profils des oueds essentiels pour une exploitation durable des ressources hydriques.

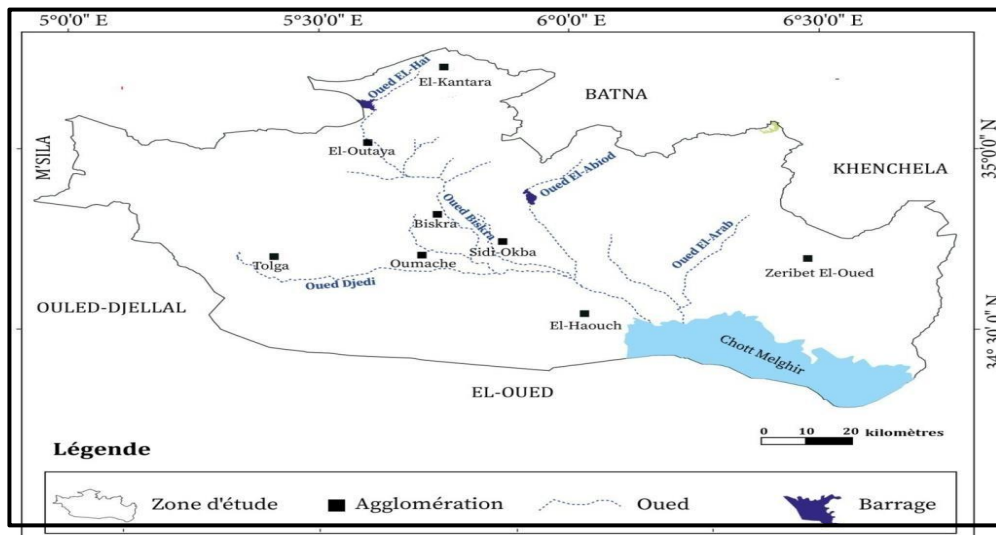


Figure N°6: Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).

II.7.1 Climat

L'ensemble agroécologique des Ziban appartient à l'étage bioclimatique saharien, caractérisé par un hiver doux peu pluvieux et un été sec et chaud.

Le climat de la région est du type aride ou semi désertique avec des étés chauds et secs et des hivers froids et secs.

Les principaux paramètres climatiques retenus dans cette étude sont : les précipitations, la température, le vent, l'humidité relative, (les climatiques sont obtenues à partir de l'Office National de Météorologie O.N.M.2019)

II.7.1.1 Précipitation

Le terme « précipitations » englobe toutes les eaux météoriques qui tombes sur la surface de la terre, que ce soit sous forme liquide (pluie) ou sous forme solide (neige, grêle). Dans notre région d'étude, les précipitations sont faibles.

Tableau N°8: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018)
Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
PRECIPITATIONS EN MM	12.8	5.4	15.0	15.9	13.0	6.5	0.8	2.1	18.2	28.7	10.8	6.8

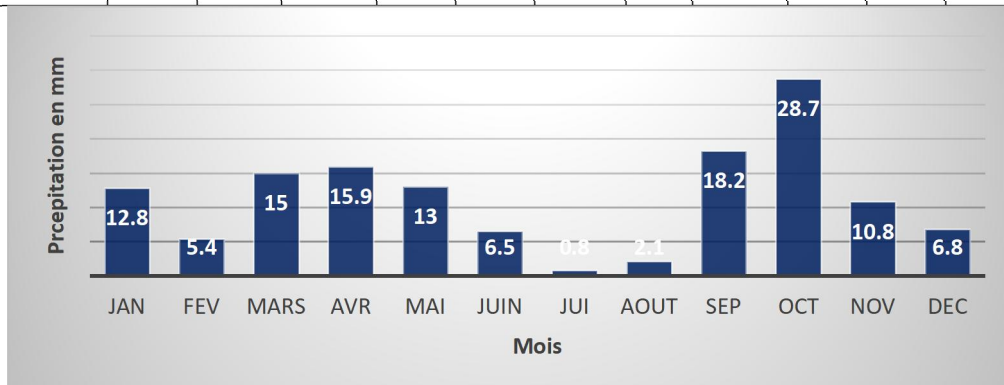


Figure N°7: précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018)

La lecture de ces données montre que le climat de la région étudiée est caractérisé par l'irrégularité de la pluviométrie. La figure, montre que les précipitations moyennes enregistrées au niveau de Biskra durant la période 2008-2018 sont assez faibles car elles ne dépassent pas une moyenne de 135,8 mm/an.

La pluviométrie moyenne la plus élevée est enregistrée durant le mois d'octobre avec 28,7 mm et la plus faible au mois de juillet avec 0,8 mm.

Tableau N°9: Précipitations (mm) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019) Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI
PRECIPITATIONS EN MM	0	0	2.29	13.21	17.68	0.76	0.5	1.52	0.25	9.14	18.5	9.8

Les mois de juin et juillet sont très secs dans cette année avec précipitation de 0 mm et dans le mois d'avril est la plus élevée avec 18,5mm.

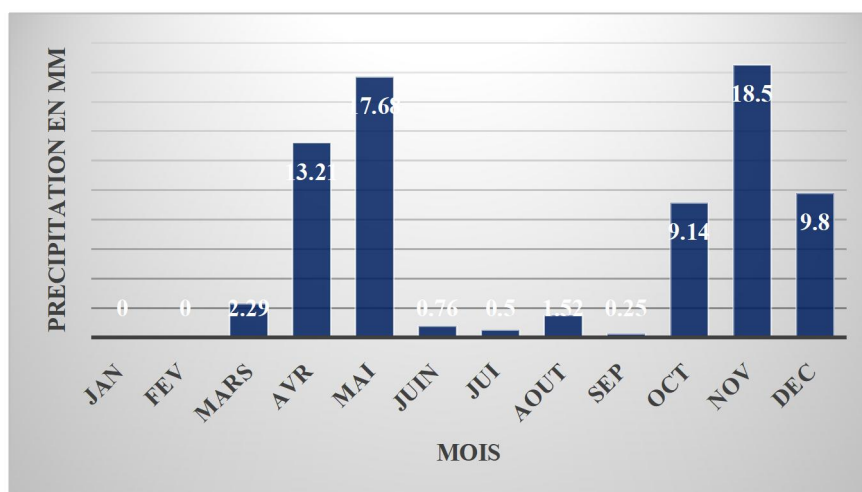


Figure N°8: La précipitation enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019)

II.7.2.2 Températures

La température est le second facteur, après la précipitation qui conditionne le climat d'une région. Elle permet aussi d'estimer le déficit d'écoulement.

Tableau N°10: Températures moyennes mensuelles [maximales : T (°C) Max. et minimales : T (°C) Min] de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018) Source Station météorologique de Biskra 2019

MOIS	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
T° C MAX	18.1	19.1	23.2	28.1	32.5	37.5	41.6	40.2	35.1	29.4	22.7	18.5
T° C MIN	7.1	7.8	11.4	15.4	19.5	24.4	28.4	27.6	23.6	18.1	12.0	7.8
T° C MOY	12.4	13.3	17.4	22.0	26.2	31.4	35.3	34.1	29.4	23.6	17.1	12.7

- **T° C MAX :** Moyennes mensuelles des températures maximales.
- **T° C MIN :** Moyennes mensuelles des températures minimales.

- **T° C MOY** : Températures moyennes mensuelles.

A partir du tableau, les variations des températures moyennes mensuelle, minimales et maximales, représentées dans la figure, montrent en général que le mois de Janvier est le mois le plus froid, avec une température de 12,4 °C, et que les mois de Juillet et Août sont les plus chauds, avec une température allant de 35,3°C et 34,1°C, respectivement.

Tableau N°11: Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)

MOIS	JUIN	JUIT	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI
T° C MAX	36.0	42.7	36.9	35.9	27.1	21.6	19.2	16.5	18.7	23.0	26.5	29.8
T° C MIN	23.9	30.5	26.4	25.1	17.4	12.1	8.0	7.5	7.4	10.4	15.0	18.0
T° C MOY	30.6	37.1	31.8	30.4	22.1	16.7	13.2	12.1	13.1	17.1	21.0	24.5

D'après ce tableau, on trouve que les mois de juillet et d'Août étaient les mois le plus chaud sont de 37,1°C et 31,8°C. Et les basses températures sont enregistrées en mois de janvier avec une moyenne de 12,1°C.

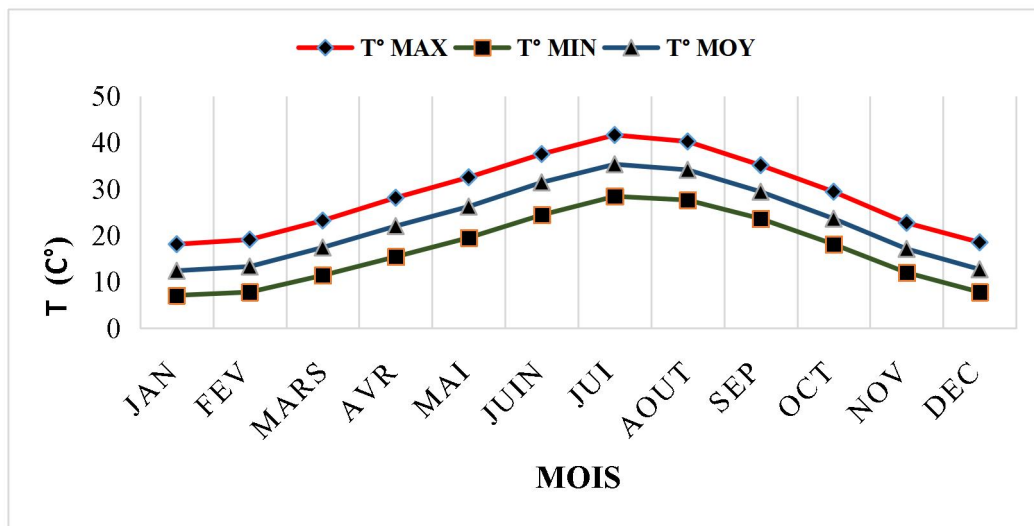


Figure N°9: Variabilités thermique de la région de Biskra durant la période (2008-2018).

II.7.2.3 Evapotranspiration

Le processus de l'évaporation s'intensifie aux moments du sirocco (O.N.M., 2010) (Djellouli, 1990) cite que l'évaporation est fonction des températures, de l'humidité, du rayonnement solaire, la vitesse des vents, l'importance du couvert végétal et du degré d'humidité du sol.

Tableau N°12: Evaporation moyennes mensuelle pour la période de (2008– 2018).

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Evaporation	2.9	3.6	5.4	6.8	8.7	9.9	10.3	8.9	7.0	5.0	3.4	2.4

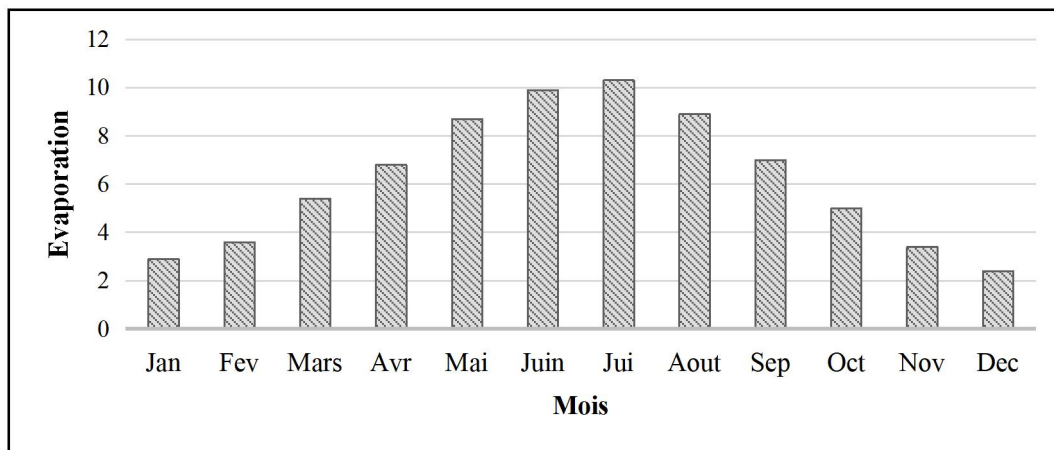


Figure N°10: Evaporation mensuelle pour la période de (2008– 2018).

D'après l'histogramme (figure N° 10) ; on remarque que l'évaporation moyenne la plus élevée se concentre au mois de juillet 10.3 mm (Tableau N° 12). L'évapotranspiration est très importante dans la région, la méthode de "Turc" nous a permis d'obtenir une valeur de 2540.85mm/an. L'intensité de l'ETP est fortement renforcée par les vents et notamment ceux qui sont chauds (Sirocco).

II.7.2.4. Les vents dominants

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année Dans la région de Biskra, les vents sont fréquents durant toute l'année. En hiver, on enregistre la prédominance des vents froids et humides venant des hauts plateaux et du nord-ouest, les vents issus du sud sont les plus secs et froids.

Tableau N°13: Vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (2008 à 2018)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
Vitesse de vent (km/h)	13.3	16.2	17.1	16.4	16.6	14.5	12.2	11.3	12.2	10.7	12.1	11.2

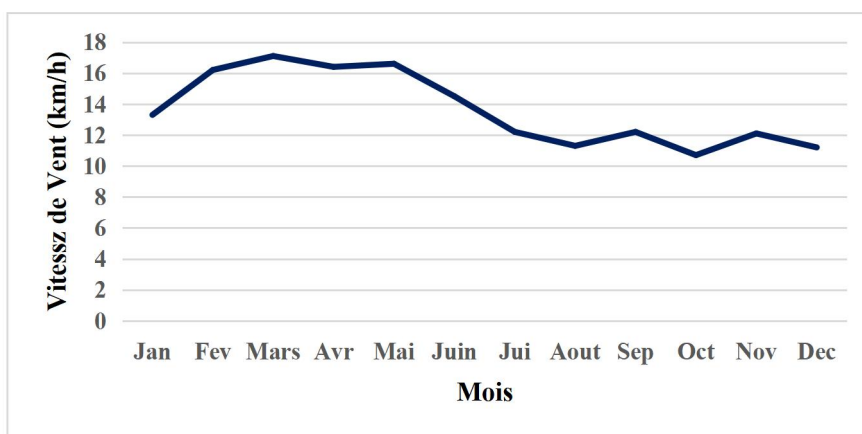


Figure N°11: Courbe de la vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (2008-2018).

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année, avec des vitesses moyennes mensuelles de 13,6 km/h environ ; alors que les vitesses maximales sont enregistrées aux mois de Mars de 17,1 km/h, et la vitesse minimale au mois d'Octobre de 10,7 km/h.

Durant la saison sèche, les vents dominants sont de secteur Sud-Est. En effet, durant cette période arrivent souvent des siroccos, d'une moyenne de 58 jours/an.

Tableau N°14: vitesse des vents (km/h) de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)

Mois	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai
Vitesse de vent (km/h)	16.7	13.6	11.6	10.4	14.6	16.6	10.7	20.8	15.0	11.7	17.6	16.5

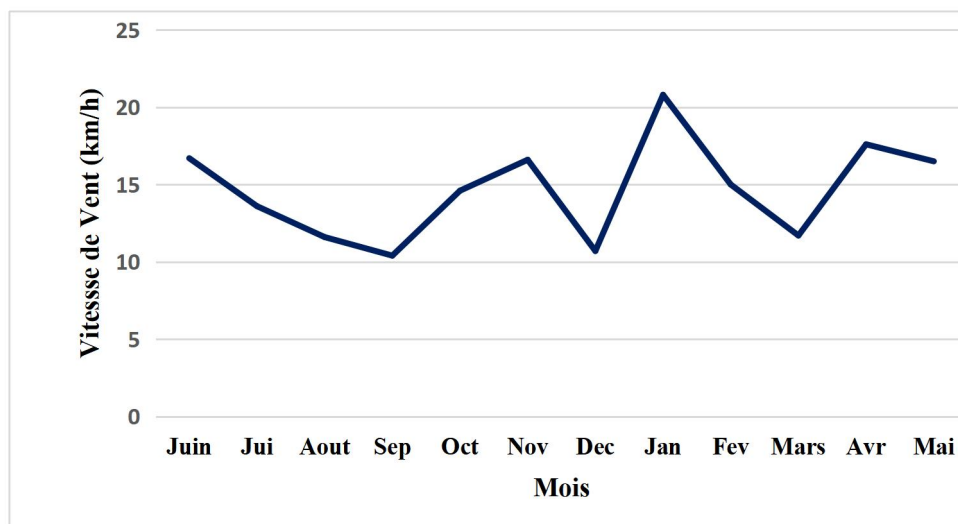


Figure N°12: La vitesse se vent enregistrée dans la région de Biskra en (Juin 2018-Mai 2019).

Pour le vent, est toujours répartie dans cette période aussi avec une valeur élevée de 17,6% dans le mois d'avril et une autre très basse de 10,4% dans le mois de septembre

II.7.3 Le climat suivant les nouvelles données climatiques

II.7.3.1 Identification de la période sèche

La région de Mekhadema (wilaya de Biskra) est marquée par une période de sécheresse prolongée, généralement de mai à septembre, caractérisée par des précipitations très faibles et des températures élevées. Cette situation a un impact direct sur l'agriculture, en particulier sur les cultures sensibles à l'humidité du sol.

Les changements climatiques tendent à accentuer cette sécheresse, rendant la gestion des ressources en eau et la planification agricole plus complexes.

L'indice ombrothermique de Gaussen, basé sur la relation entre précipitations et températures mensuelles, permet d'identifier les périodes sèches :

La sécheresse est définie lorsque les précipitations mensuelles sont inférieures au double de la température moyenne ($P < 2T$)

Tableau N°15: Températures et précipitations en (mm), Moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (Juin 2018-Mai 2019)

MOIS	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI
PRECIPITATIONS EN MM	0	0	2.29	13.21	17.68	0.76	0.5	1.52	0.25	9.14	18.5	9.8

T° C MOY	30.6	37.1	31.8	30.4	22.1	16.7	13.2	12.1	13.1	17.1	21.0	24.5
-----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

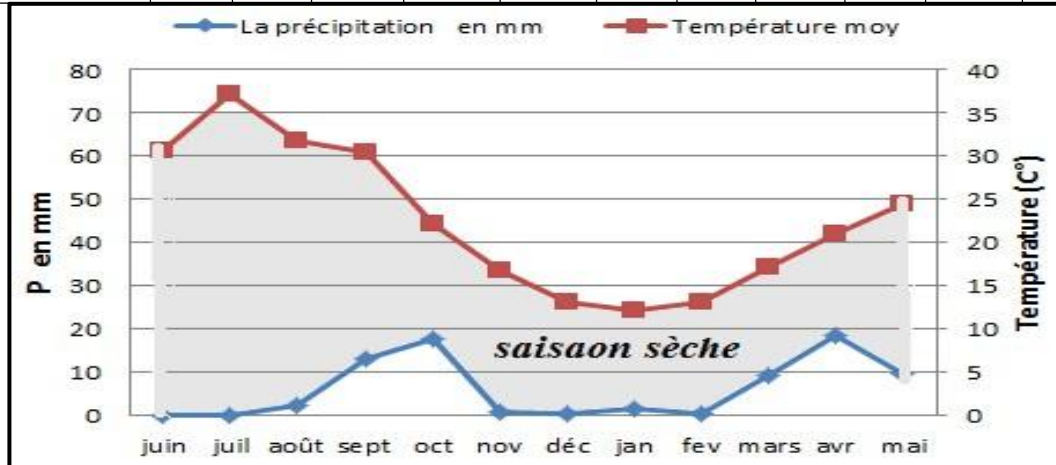


Figure N°13: le Diagramme Ombrothermique (Juin 2018-Mai 2019)

Pour la région de Biskra, Ce diagramme a été réalisé avec les données climatiques relevées Durant de la période 2008 à 2019 et aussi dans toute l'année d'étude et montre que la période sèche s'étale durant toute l'année. (Figure N°13)

II.7.3.2 Climagramme d'Emberger

Il permet de situer la région d'étude dans l'étage bioclimatique qui lui correspond (Dajoz,1971). Le quotient pluviothermique d'Emberger est déterminé selon la formule suivante (Stewart, 1968) $Q = 3,43 \times P / (M - m)$ (01)

Avec :

Q : quotient pluviométrique ;

P : pluviométrie annuelle en mm ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid

- Humide pour $Q > 100$
- Tempérée pour $100 > Q > 50$
- Semi-aride pour $50 > Q > 25$
- Aride pour $25 > Q > 10$ • Désertique pour $Q < 10$ **Donc :**

Tableau N°16: Valeurs d'indice de Climagramme d'Emberger, station de Biskra (2008, 2018)

Région	P (mm)	M (°C)	m (°C)	Q	Etage bioclimatique
Biskra	135.8	41.6	7.1	13.5	Saharien à hiver chaud

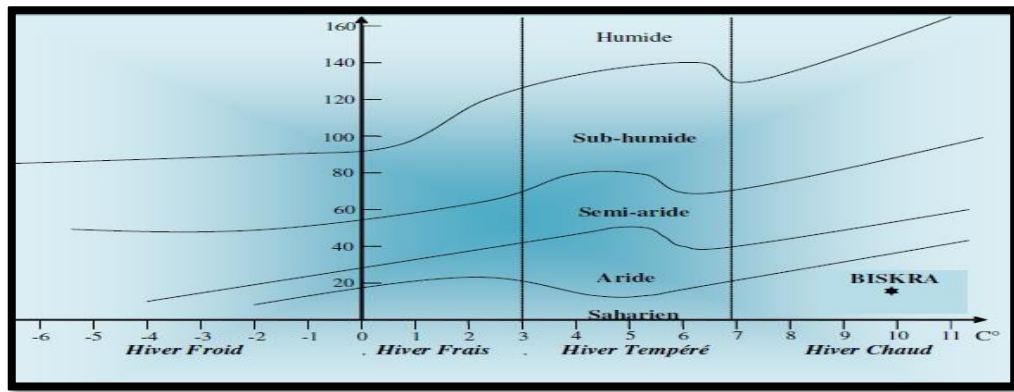


Figure N°14: Localisation de la région de Biskra sur le Climagramme d'Emberger.

D'après les données climatiques et la valeur de Q (indice de Climagramme d'Emberger), la valeur de Q est égale de 13.5, la région de Biskra classé dans l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud durant la période (2008-2018).

II.8. Géologie de la zone d'étude

Selon la carte géologique au 1/200 000, la région de Mekhadema appartient au contexte quaternaire (<Qt>), composé principalement de dépôts gypseux blanchâtres d'épaisseur importante. Le quaternaire se distingue par une érosion plus active que celle des terrains alluviaux. Malgré la présence d'anciennes terrasses quaternaires, les dépôts pliocènes antérieurs ont été en grande partie altérés. Les produits de lessivage issus de cette érosion sont entraînés par les crues des oueds vers le Sud-Est, en direction des grands Chotts, selon Gousko (1964).



Figure N°15: Position géographique de la commune de Mekhadema. (Google Maps, 2025).

II.9 Cadre géologique générale

La région de Biskra est une zone de transition entre une région montagneuse au nord (monts du Zab et massif des Aurès) et un paysage effondré au sud (Sahara septentrional). Cette transition est marquée par la « Flexure Saharienne », une structure tectonique formée durant le Pliocène liée à la surrection des Aurès. Au nord, les terrains sont recouverts par des dépôts

récents du Mio-Plio-Quaternaire, tandis qu'au sud, des dépôts néogènes et quaternaires recouvrent des formations plus anciennes.

-La zone de la plaine saharienne :

- a partie nord est montagneuse avec des massifs comme le Djebel Kahila et le Djebel Ksoum, séparés par de grandes failles comme celle de Chaiba.
- La plaine saharienne est divisée en deux parties principales par la vallée de l'Oued Djedi :
- Au nord de l'Oued Djedi : des zones de plaines élevées, des plantations de palmiers dattiers (Tolga, Bou-Chagroun, Lichana), et le cône alluvial de l'Oued Biskra qui s'étend vers les chotts.
- Au sud de l'Oued Djedi : des plateaux pliocènes avec des substrats argileux et gypseux, parfois recouverts de sable et de regs caillouteux.

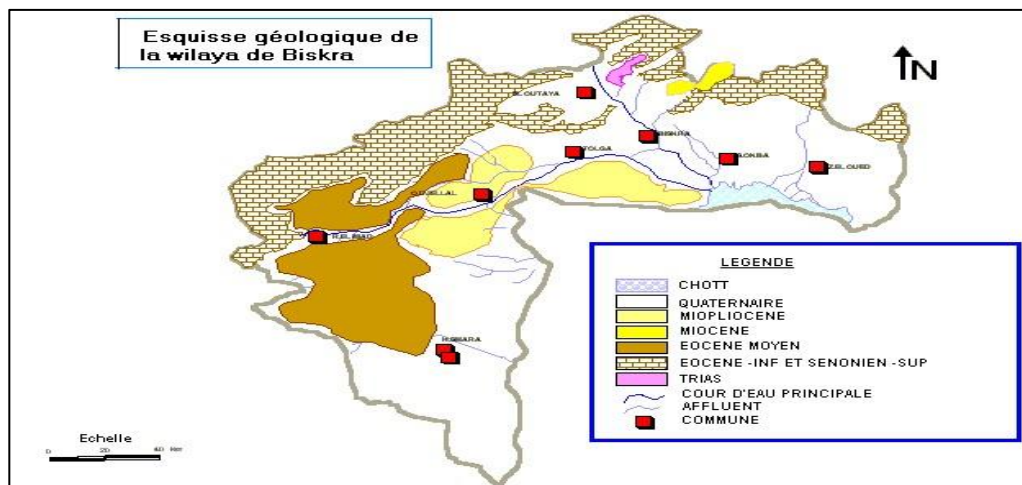


Figure N°16: Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).

II.10. Identification des formations hydrogéologiques.

La connaissance de l'hydrogéologie de la région hydrodynamique est très intéressante car elle permet d'envisager les échanges souterrains qui peuvent se produire dans les aquifère. En se basant sur la description géologique des terrains ainsi que sur les caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation

II.11.1 identification des différentes nappes

La carte hydrogéologique des Ziban (INRH, 1981) ne couvre pas entièrement le bassin hydrogéologique, qui inclut la vallée de l'Oued Djedi, la région de Biskra et la cuvette d'El Outaya.

Quatre grandes unités aquifères sont identifiées, basées sur la lithologie et l'hydrodynamique :

- La nappe phréatique du Quaternaire
- La nappe des calcaires de l'Éocène inférieur et du Sémonien (CT)
- La nappe des grès du Continental Intercalaire (CI)

1. Les nappes phréatiques dans la région des Zibans

- **Répartition spatiale :**

- Les nappes phréatiques sont exploitées traditionnellement pour alimenter les palmeraies, via des sources naturelles ou des puits, principalement dans les alluvions des oueds comme Oued Biskra (en amont de Biskra) et Oued Djedi.

- **Nappe des alluvions d'Oued Biskra :**

Elle se trouve dans les accumulations alluvionnaires, alimentée principalement par l'infiltration des eaux des oueds (inféro-flux). C'est la principale source d'eau pour Ouled Djellal, Sidi Khaled et Biskra.

- Sa profondeur varie entre 20 et 150 mètres avec un débit de 5 à 20 l/s, et sa qualité chimique est bonne, ce qui la rend adaptée à l'eau potable.

- **Subdivision du Quaternaire dans la région :**

- Alluvions anciennes : galets et conglomérats au pied des versants calcaires miocènes, autour de la dépression des Zibans.

- Alluvions des terrasses moyennes de l'Oued Biskra : cailloutis, graviers, sables, situés en dessous des alluvions anciennes.

- Alluvions récentes (basses terrasses) : gros galets, graviers, sables issus de l'érosion, importantes pour l'agriculture et l'hydrogéologie.

- **Limites et niveau piézométrique :**

Les limites de la nappe correspondent aux terrasses des oueds. Le niveau piézométrique est en moyenne à 3 m sous la surface, mais descend plus bas en période sèche à cause du pompage et de l'évaporation.

- **Origine de l'alimentation :**

- Alimentation souterraine par échanges avec les couches calcaires sous-jacentes lors du gonflement de la nappe calcaire (relation hydraulique réciproque).

2. Les nappes profondes

D'un point de vue hydrogéologique, on regroupe sous le terme de réservoir toutes les formations continentales les plus récentes, déposées au Sahara, qui sont d'âge Tertiaire et Quaternaire. Au Bas - Sahara, on regroupe la nappe des calcaires de l'Eocène et du Sénonien et même celle du continental intercalaire sous le nom de "complexe terminal"

a) Nappe des sables

- Constituée d'alternances d'argile, sable et cailloutis du Mio-pliocène.
- Exploitée surtout à l'Est de Biskra (exemple : M'Zirâa).
- Profondeur entre 100 et 300 m, débit moyen d'environ 15 l/s.
- Hétérogène avec couches aux perméabilités variables.

- Divisée en deux aquifères à l'Est : un profond (Pontien) et un moyennement profond (Miopliocène).

b) Nappe profonde du continental intercalaire (« albienne »)

- Formée de grès et marnes d'âge Albien et Barrémien.
- Exploitation difficile et coûteuse à cause de la grande profondeur (> 2000 m) et température élevée (> 60 °C).
- Exploitée par 19 forages dans la région de Biskra, avec des sources hydrothermales (ex. Hammam Essalhine).
- S'étend sur une vaste zone du Bas Sahara (limites : Oued Saoura à l'Ouest, Atlas Saharien au Nord, Sud tunisien à l'Est, Sud-Ouest Libyen).
- Écoulement majoritairement Nord-Sud, avec exutoires naturels vers l'Est (cuvette de Taoudeni) et l'Ouest (nappe côtière tunisienne).

c) Nappe des calcaires éocènes inférieurs

- Située dans des calcaires marins de l'Éocène inférieur, prolongée par des calcaires du Crétacé supérieur.
- Affleure dans les contreforts de l'Atlas au nord du Bas-Sahara.
- La nappe de Tolga (calcaires fissurés d'Éocène inférieur) est la plus exploitée dans les palmeraies des Zibans. Profondeur entre 100 m (Tolga) et 500 m (Lioua), débits entre 10 et 30 l/s.
- Contact hydraulique avec la nappe du Sénonien supérieur, parfois séparées par une couche de marne fine.
- Aquifères associés au nord et nord-est de Biskra : Maastrichtien et Campanien (200-900 m), eaux de bonne qualité. Le Turonien est aussi présent, mais non exploité.
- Ces calcaires fissurés offrent un excellent réservoir avec bonne perméabilité, souvent captif et artésien grâce à une couverture imperméable.

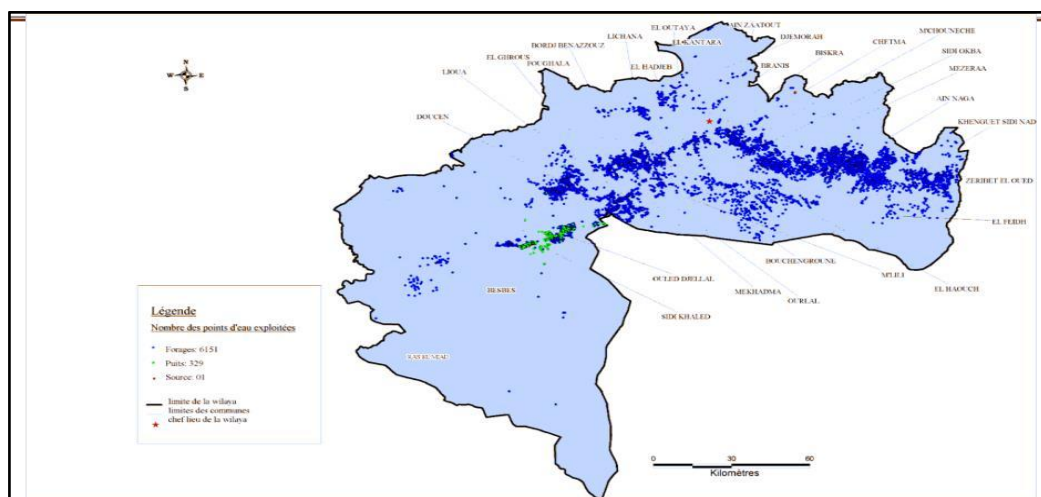


Figure N°17: Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011)

II.11.3 La piézométrie

L'étude piézométrique dans la région Mekhadema montre que l'écoulement des eaux souterraines suit une direction générale du nord vers le sud. Ce mouvement est influencé par la topographie et la géologie : dans les zones montagneuses et fracturées, le flux est plus rapide en raison des pentes fortes, alors que dans les zones planes, l'écoulement est plus lent. On observe aussi une convergence des lignes de courant vers les zones basses, ce qui indique des zones d'accumulation. Cette dynamique joue un rôle important dans la qualité des eaux, qui peut être affectée par la minéralisation naturelle et les activités humaines. D'où la nécessité d'une gestion intégrée et durable des ressources en eau.

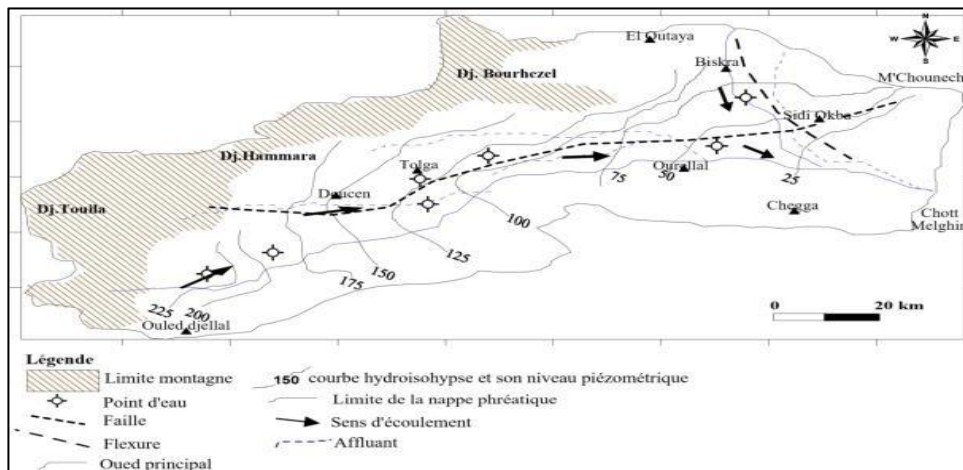


Figure N°18: Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).

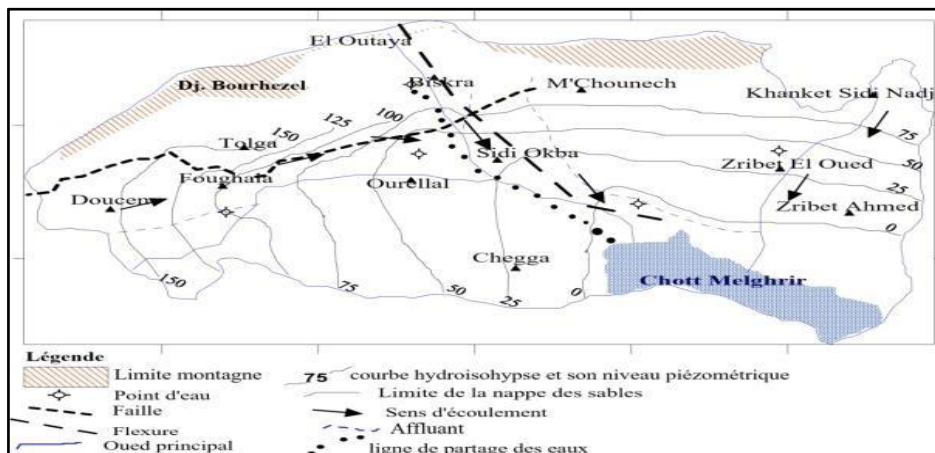


Figure N°19: Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)

II.12 Conclusion

La région de Mekhadema, située dans la wilaya de Biskra en Algérie, est caractérisée par un climat saharien rigoureux. Selon le climagramme d'Emberger, elle appartient à l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud, marqué par un climat hyperaride, des précipitations faibles et irrégulières, ainsi que des températures estivales extrêmement élevées. Bien que les pluies estivales puissent parfois être intenses, elles restent sporadiques, ce qui limite le développement de la couverture végétale et complique les activités agricoles en raison de la rareté des ressources en eau.

Malgré ces conditions climatiques difficiles, Mekhadema dispose d'un potentiel naturel et socioéconomique important. La région bénéficie de ressources hydriques, bien qu'elles soient exploitées de manière intensive, et d'une population dense, fournissant une main-d'œuvre disponible pour maintenir l'agriculture comme activité principale. Cependant, cette activité fait face à plusieurs défis majeurs : un drainage insuffisant des excès d'eau d'irrigation, l'exploitation excessive des nappes phréatiques non renouvelables, et le vieillissement des palmiers-dattiers, qui constituent une ressource clé pour la région.

Ces problématiques sont aggravées par des contraintes environnementales telles que la sécheresse persistante et la dégradation de la qualité des sols et des eaux, ainsi que par des difficultés socioéconomiques liées au manque de main-d'œuvre qualifiée et à l'accès limité aux infrastructures énergétiques et de transport. Au cours des deux dernières décennies, le développement des cultures maraîchères, notamment la tomate, a profondément transformé l'économie locale. Toutefois, cette expansion soulève des inquiétudes quant à la durabilité des ressources naturelles et aux impacts environnementaux, soulignant la nécessité d'une gestion intégrée des ressources hydriques et d'une adaptation des pratiques agricoles.

Ainsi, la région de Mekhadema illustre la complexité des interactions entre conditions climatiques extrêmes, dynamiques socioéconomiques et gestion des ressources naturelles en milieu saharien. Une approche durable, fondée sur une exploitation rationnelle de l'eau et une planification agricole adaptée, est indispensable pour assurer la pérennité du développement agricole et économique de la région.

Partie B : Etude expérimentale

Chapitre I : Matériels et méthodes

I.1 Introduction

Ce chapitre se concentrera sur l'exploration des méthodes utilisées pour évaluer les caractéristiques chimiques des eaux souterraines dans la région de Mekhadema, situées à Wilaya de Biskra.

Nous vérifierons en détail les processus analytiques utilisés, mettant en évidence les techniques utilisées dans nos recherches. De plus, nous discuterons du logiciel utilisé pour analyser les données collectées, offrant ainsi un aperçu de notre méthode. Enfin, nous présenterons les principaux paramètres utilisés pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans le contexte de nos recherches, en soulignant leur importance dans la prise de décisions et la gestion durable des ressources en eau.

I.2 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]

L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) est déterminé en évaluant plusieurs facteurs biologiques, physiques et chimiques. Ces paramètres servent d'indicateurs pour l'utilisation multifacette des ressources en eau dans des contextes de consommation humaine, englobant des aspects tels que les activités récréatives, l'approvisionnement en eau potable, les applications industrielles, l'irrigation et l'usage résidentiel (Akhtar et al. 2021). Voici les étapes impliquées dans le calcul de l'IQE :

Dans la phase initiale, des poids (w_i) allant d'une plage numérique de 1 à 5 ont été attribués à chacune des dix caractéristiques chimiques, reflétant leur importance respective dans l'influence de la qualité globale de l'eau d'irrigation. Par la suite, le poids relatif (W_i) de ces paramètres a été déterminé en utilisant l'équation (2) (Şener et al. 2017) (Abdel-Fattah, Mokhtar et Abdo 2021).

Le tableau 1 comprend également les valeurs pondérées relatives dérivées (W_i) pour chaque paramètre

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Dans ce contexte,

Le poids attribué au i -ème paramètre de qualité de l'eau est désigné par w_i , et le nombre total de paramètres de qualité de l'eau est noté n .

À la troisième étape, une évaluation de la qualité (q_i) a été générée pour chaque paramètre, à l'exception du pH. Cette évaluation a été calculée en divisant la concentration dans chaque échantillon d'eau par les valeurs limites établies selon les normes algériennes (JORA 2014).

Ce calcul a été effectué en utilisant l'équation suivante (3) :

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (3)$$

Dans cette équation, q_i représente l'évaluation de la qualité ; où C_i désigne la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau, exprimée en mg/L, tandis que S_i

représente la norme respective pour l'eau potable de chaque paramètre chimique conformément aux directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011) et aux normes algériennes (JORA 2014). Par la suite, les sous-indices de qualité de l'eau (Sli) pour chaque paramètre chimique sont calculés en utilisant l'équation suivante (4).

$$Sli = Wi \times qi_{(4)}$$

Si désigne le sous-indice attribué au i -ème paramètre.

Enfin, l'indice global de qualité de l'eau (IQE), utilisé pour évaluer la qualité globale de l'eau pour chaque échantillon, a été calculé en utilisant l'équation suivante (5).

$$WQI = \sum_{n=1}^n Sli \quad (5)$$

Comme illustré dans le tableau 2, les valeurs calculées de l'IQE ont ensuite été classées en cinq classes distinctes pour déterminer le statut de la qualité de l'eau, allant de "eau excellente" à "eau non appropriée pour la consommation". Dans le calcul de l'IQE, les normes de potabilité recommandées fournies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011) et les normes algériennes (JORA 2014) ont été incorporées de manière exhaustive (Tableau N° 17).

Tableau N°17: Poids relatif des paramètres physico-chimiques.

Paramètres chimique	(JORA 2014)	Poids Relatif
pH	$\geq 6,5$ et ≤ 9	0.445
Calcium (mg/L)	200	0.019
Magnésium (mg/L)	50	0.076
EC (uS/cm)	2800	0.001
Nitrate (mg/L)	50	0.076
Sulfate(mg/L)	250	0.009
Chloride (mg/L)	500	0.008
Bicarbonates (mg/l)	120	0.032
Sodium (mg/L)	200	0.019
Potassium (mg/L)	12	0.315

Tableau N°18: Classification de l'IQE, statut, et utilisation possible de l'échantillon d'eau (Balamurugan 2020).

IQE Intervalle	Qualité de l'Eau	Possibilité d'utilisation
0-25	Excellente	Consommation humaine, irrigation
26-50	Bonne	Consommation humaine, irrigation
51-75	Modérée	Irrigation et traitement nécessaire avant d'utilisation comme eau potable
76-100	Mauvaise	une possibilité utilisation à l'irrigation avec des conditions
>100	Très Mauvaise	Utilisation interdit (Consommation humaine ou irrigation)

I.3 Méthodes de traitement des données

Le traitement des données des eaux superficielles de la région d'étude nous a permis d'apprécier leur qualité chimique.

L'évaluation de la qualité des eaux et de l'évolution des paramètres physico-chimiques nous a obligé à utiliser des méthodes de traitement classiques et d'application de logiciels adéquats. (Reghis ,2024)

I.3.1 Traitement des données par Excel

En général, la qualité des eaux est déterminée selon des critères quantitatifs et qualitatifs tels que, par exemple, la présence en quantités suffisantes de certains nutriments, la teneur en oxygène, le pH, la température ou encore, la présence des métaux lourds. De ce fait il devient impératif de déterminer les caractérisations physico-chimiques et les métaux lourds des eaux de la région d'étude avec les normes.

I.3.2 Traitement des données par diagramme

Les résultats des analyses chimiques des sels exprimés sous la forme ionique, peuvent être portés sur des diagrammes qui permettent de comparer les eaux entre elles, et de les classer en familles chimiques, c'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau qui permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau et la qualité des eaux des affluant en vus d'usage agricole. Les représentations les plus utilisées sont :

- Le diagramme en losange ou diagramme de Piper.
- Le diagramme semi-logarithmique Schoëller-Berkaloff.
- Le diagramme de Riverside.
- Le diagramme de Wilcox.
- Le diagramme de Chadha.

our analyser efficacement les données, un logiciel de diagrammes développé par Roland SIMLER (Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon) a été utilisé. Ce logiciel libre, spécialisé en hydrochimie, permet une exploitation rapide des analyses d'eau grâce à des fonctionnalités variées telles que : Piper, Schoeller-Berkalov, Korjinski, Stiff, Riverside, Wilcox.

Bien que toutes les fonctions n'aient pas été utilisées, le logiciel s'est révélé simple et efficace. Les diagrammes de Piper, Schoeller et Riverside ont été réalisés avec cet outil. (Reghis, 2024)

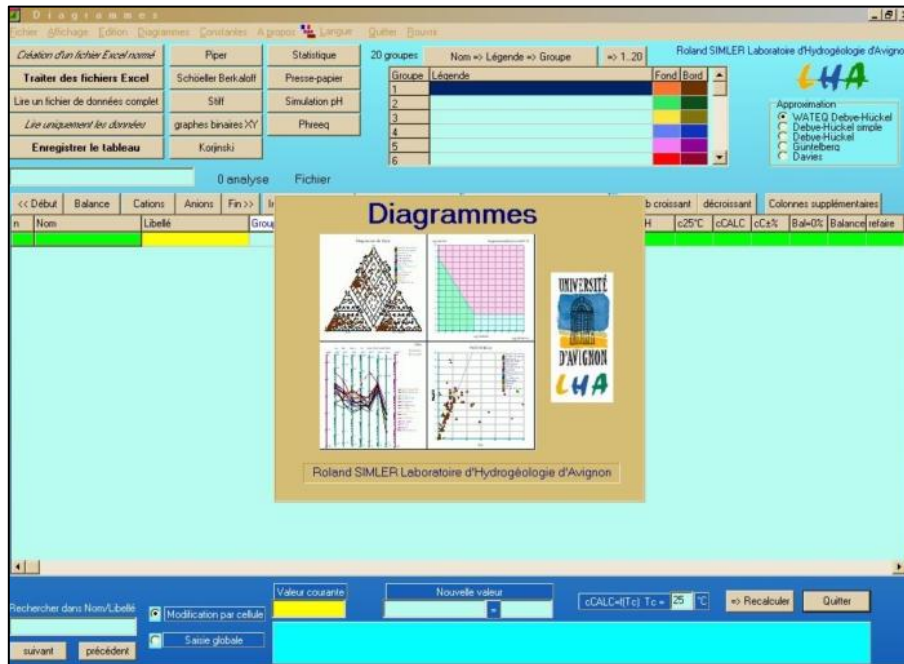


Figure N°20 : Interface de commande du logiciel Diagramme

- **Diagramme de Piper**

Le diagramme trilineaire de Piper (Piper, 1944) est utilisé pour classer les eaux selon leurs caractéristiques hydrochimiques, en analysant les principaux ions influençant leur qualité. Il représente l'équilibre chimique entre les **cations** (calcium, magnésium, sodium, potassium) et les anions (chlorure, sulfate, carbonate, bicarbonate), facilitant ainsi l'identification des ions dominants et des réactions chimiques en jeu.

Le diagramme se compose de deux triangles inférieurs, représentant séparément les cations et les anions, et d'un losange supérieur illustrant leur combinaison. Il permet de comparer et de regrouper les échantillons aux propriétés similaires, offrant ainsi une meilleure compréhension des interactions chimiques et une distinction entre les différents types d'eaux souterraines et superficielles (Todd, 2001 ; Walton, 1970).

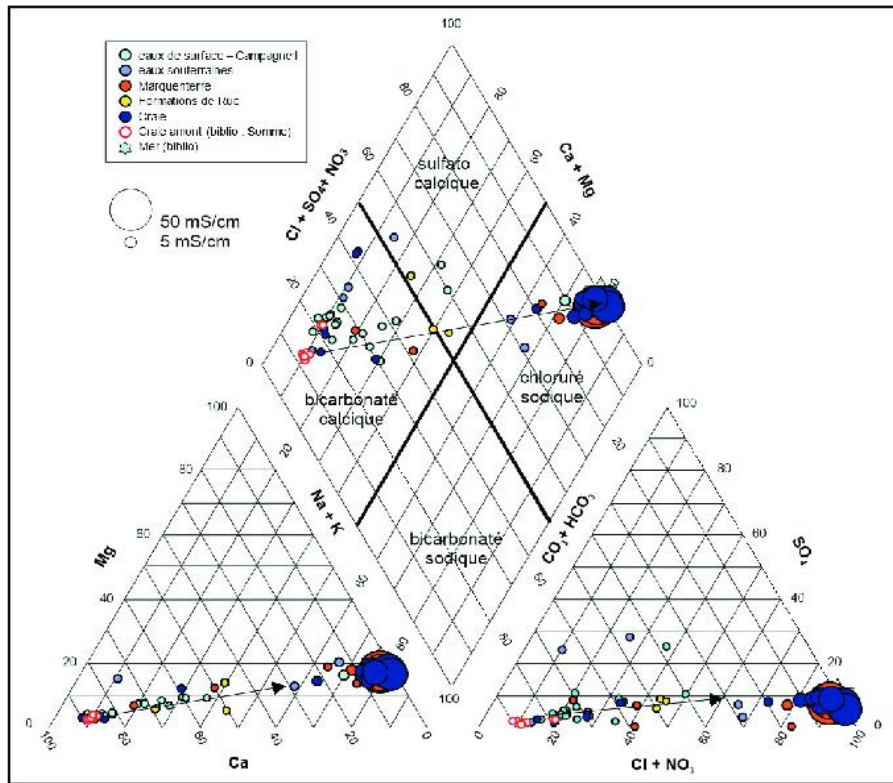


Figure N°21: Représentation des faciès chimiques des eaux avec Diagramme de Piper.

- **Le diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkaloff**

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure N°22) est un outil utilisé pour représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eau. Chaque échantillon est illustré par une ligne brisée, où la concentration des éléments chimiques est affichée sur une échelle logarithmique verticale. En reliant les points correspondant aux différents ions, on obtient une courbe permettant d'analyser et de comparer la composition chimique des eaux.

Lorsque plusieurs échantillons présentent des proportions constantes entre les éléments dissous, leurs courbes restent parallèles. En revanche, lorsque les lignes se croisent, cela indique un changement de faciès chimique. Ce diagramme offre ainsi une vision simultanée du faciès chimique et du degré de minéralisation de l'eau, facilitant son interprétation (Gouaidia, 2008).

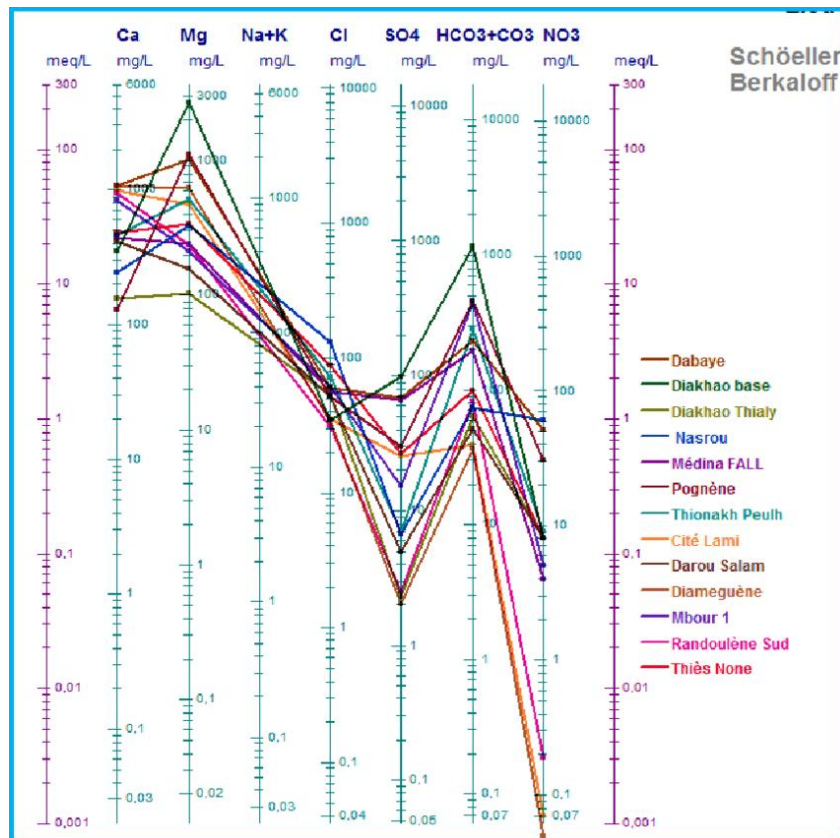


Figure N°22: Diagramme de Schoeller Berkaloff.

- **Le diagramme de Chadha**

Les anions et cations exprimés en milliéquivalent ont été représentés graphiquement sur le diagramme proposé par Chadha (1999). Huit types d'eau pouvant être identifiés à partir du diagramme dépendent de la relation entre les alcalino-terreux (calcium et magnésium), les métaux alcalins (sodium et potassium), les anions acides faibles (carbonate et bicarbonate) et les acides forts (chlorure et sulfate). La majorité des échantillons (80 %) se trouvent dans la sixième zone, représentant par Ca –Mg–Cl–SO₄ type, où $(Ca + Mg) > (Na + K)$ et $(Cl + SO_4) > (CO_3 + HCO_3)$, alors que le reste exprimant les 2% sont situés sur la première zone.

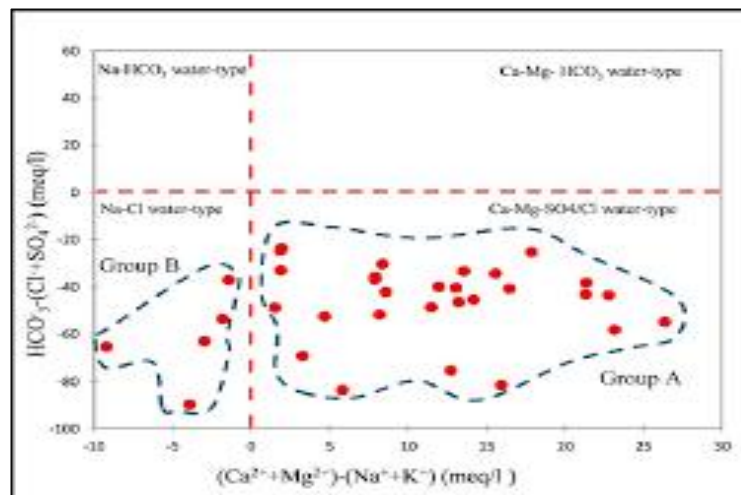


Figure N°23: Diagramme de Chadha

Le diagramme de Riverside

Proposé par Richards, le diagramme de Riverside est un outil fiable pour évaluer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation. Une forte concentration en sels dissous peut poser des risques pour les cultures, notamment en influençant la structure du sol. Ce risque est évalué à l'aide du Sodium Absorption Ratio (SAR), qui mesure la capacité d'échange des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par Na^+ dans les argiles et colloïdes.

Le SAR est calculé selon la formule :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Dans ce diagramme, on trace la conductivité électrique (exprimée en $\mu S/cm$ à $20^\circ C$) en fonction du SAR, ce qui permet de classifier les eaux selon leur potentiel de salinisation et d'alcalinisation. La classification de Richards, détaillée dans le Tableau N°18, définit plusieurs classes d'eau, chacune présentant un niveau de risque pour l'irrigation.

Tableau N°19: Classification des eaux d'irrigation en fonction de la C.E et du S.A.R
(Méthode de Richards)

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1er	Excellente	C1S1	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2eme	Bonne	C2S1 C1S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 eme	Admissible	C3S1 C2S3 C3S2	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée
4 eme	Médiocre	C4S1 C4S2 C3S3	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol et bien drainées
5 eme	Mauvaise	C3S4 C4S3 C4S4	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé plantes tolérantes aux sels

○ Ce tableau classe la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation agricole en fonction de leur salinité (C) et de leur teneur en sodium (S), ce qui influence leur aptitude à l'usage agricole.

1. Eaux excellentes (C1S1) : Utilisables sans restriction pour toutes les cultures et la plupart des sols.
2. Eaux bonnes (C2S1, C1S2) : Conviennent sans grande restriction, mais nécessitent une attention pour les plantes ayant une tolérance moyenne aux sels.
3. Eaux admissibles (C3S1, C2S3, C3S2) : Adaptées aux cultures tolérantes aux sels, mais nécessitent un bon drainage et un contrôle de la salinité.
4. Eaux médiocres (C4S1, C4S2, C3S3) : Fortement minéralisées, utilisables uniquement pour des cultures très résistantes aux sels et sur sol bien drainé.
5. Eaux mauvaises (C3S4, C4S3, C4S4) : Généralement inadaptées à l'irrigation, sauf dans des conditions spécifiques : sols très perméables, bien lessivés, et cultures tolérantes aux sels.

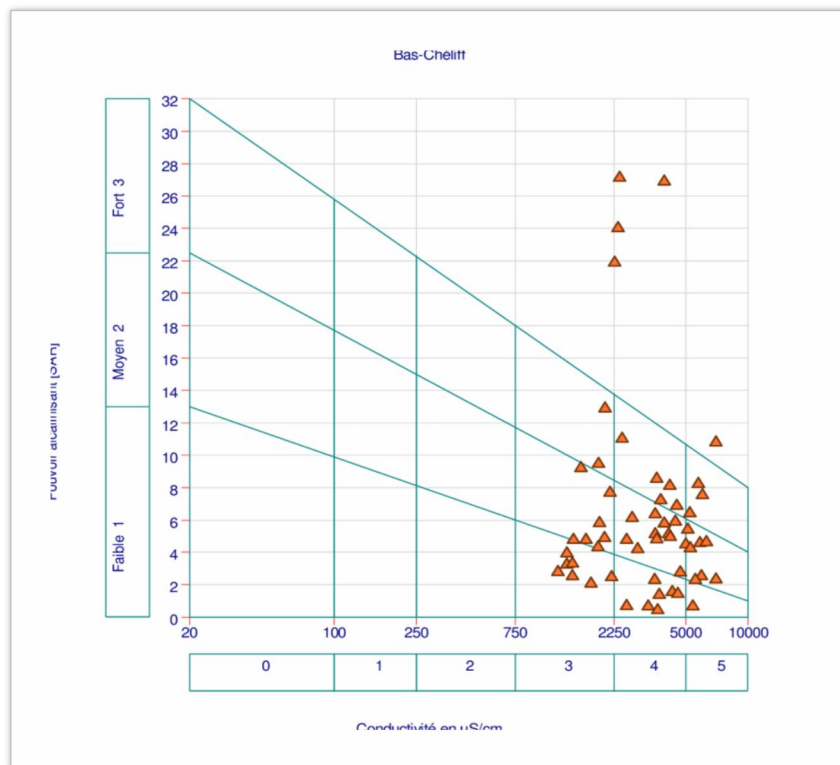


Figure N°24: Diagramme de Richards (Riverside).

- **Le diagramme de Wilcox**

Le diagramme de Wilcox est un outil permettant d'évaluer la qualité des eaux destinées à l'irrigation. En effet, la plupart des plantes tolèrent mal les sols riches en sodium. Cette classification repose sur deux paramètres essentiels : la conductivité électrique (EC), qui reflète la salinité de l'eau, et le pourcentage de sodium (%Na) présent dans celle-ci.

La formule utilisée pour calculer le pourcentage de sodium est la suivante :

$$N\% = \frac{(Na^+ + K^+) \times 100}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)}$$

Le diagramme de Wilcox représente graphiquement la relation entre le risque de salinité (mesuré en EC, exprimé en µS/cm) et la teneur en sodium dans l'eau. Grâce à cette

représentation, il est possible de classer les eaux d'irrigation selon différents niveaux d'aptitude :

1. Excellent à bon (I)
2. Bon à permis (II)
3. Permis à douteux (III)
4. Douteux à inadapté (IV)
5. Totalement inadapté (V)

Ce diagramme est donc un outil crucial pour déterminer l'impact de l'eau sur la qualité des sols agricoles et prévenir les risques de salinisation et de sodisation des terres irriguées.

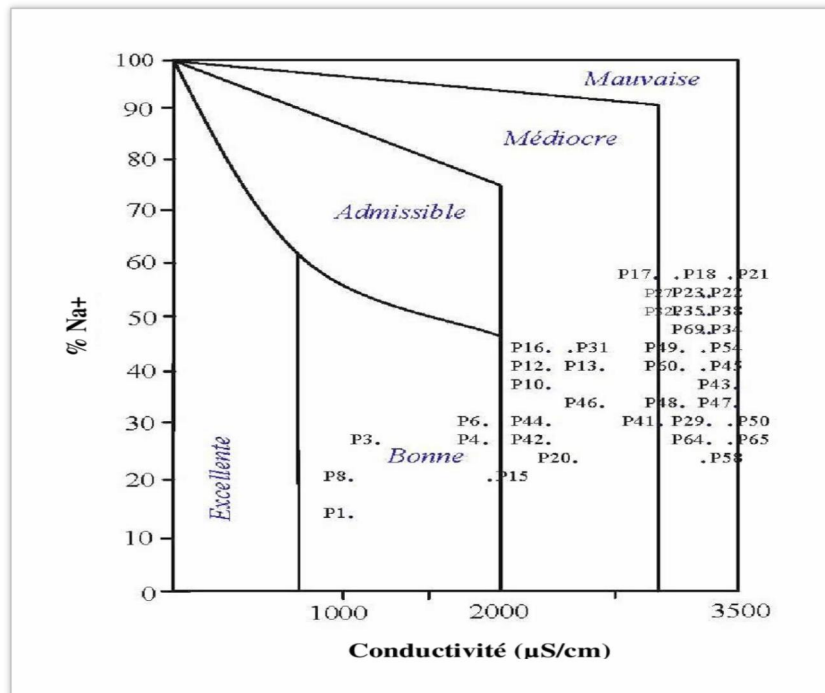


Figure N°25: Diagramme de Wilcox.

I.4 Aptitudes des eaux d'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation dépend de sa composition chimique et de son impact sur le sol et les cultures (Adimalla et al., 2020). Elle est généralement évaluée à travers plusieurs paramètres essentiels, notamment le taux d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (%Na), l'indice de perméabilité (IP), le rapport de Kelly (RK) et le rapport de danger de magnésium (MHR).

I.4.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Le SAR est un indicateur clé pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation, car il reflète la capacité des sols à absorber le sodium. Une concentration excessive de sel dans l'eau peut entraîner la salinisation des sols, tandis qu'une teneur élevée en sodium peut accroître leur alcalinité (Adhikary et al., 2012). Le SAR permet donc d'estimer ce risque : plus la proportion de sodium est importante, plus l'alcalinité du sol est susceptible d'augmenter (Sheikhy Narany et al., 2015).

Le SAR est calculé à l'aide de la formule suivante (Hem, 1985) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

La classification du SAR selon (Gugulothu et al., 2022) et (Richards, 1954) est la suivante :

La classification du SAR (Sodium Adsorption Ratio) selon Gugulothu et Richards distingue quatre niveaux :

- **S1 (<10)** : Faible risque, eau adaptée à la plupart des sols.
- **S2 (10–18)** : Risque modéré, problèmes possibles dans sols fins sans drainage.
- **S3 (18–28)** : Risque élevé, nécessite drainage et lessivage régulier.
- **S4 (>28)** : Risque très élevé, eau généralement inadaptée à l'irrigation sauf conditions spécifiques. Le **diagramme USSL** (Batarseh et al., 2021) permet de visualiser la relation entre la salinité (EC) et le SAR, et est largement utilisé pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation.

I.4.2 La teneur en sodium (Na%)

Le pourcentage de sodium (**%Na**) est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation. Un excès de sodium dans l'eau peut nuire à la structure du sol en réduisant sa perméabilité et en gênant la croissance des plantes (Wilcox, 1955). Lorsque la concentration en **Na⁺** est élevée, les ions sodium remplacent les ions **Ca²⁺** et **Mg²⁺** dans les particules d'argile par échange ionique, ce qui réduit la capacité du sol à absorber et à transporter l'eau. Ce phénomène entraîne une mauvaise infiltration de l'eau et un compactage du sol, surtout en période sèche (Saleh et al., 1999).

Le **%Na** est calculé selon la formule suivante :

$$Na\% = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+)} \times 100$$

Selon Khoda Panah et al. (2009), la classification de l'eau en fonction de %Na est la suivante :

1. Excellente : < 20 %
2. Bonne : 20-40 %
3. Admissible : 40-60 %
4. Douteuse : 60-80 %
5. Inadaptée : > 80 %

I.4.3 L'indice de perméabilité (PI)

L'indice de perméabilité (PI) est utilisé pour évaluer la capacité de l'eau à maintenir une bonne infiltration dans le sol. À long terme, l'irrigation avec une eau riche en sels peut altérer cette perméabilité. L'effet des ions **Na⁺**, **Ca²⁺**, **Mg²⁺** et **HCO₃⁻** joue un rôle clé dans cette dynamique (Doneen, 1964).

Le PI est calculé selon l'équation suivante :

$$PI = \frac{(Na^+ + Ca^{2+})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100$$

D'après Doneen (1964), l'eau est classée selon son indice de perméabilité en trois catégories :

- Classe I (> 75 %) : Eau convenable pour l'irrigation.
- Classe II (25-75 %) : Eau de bonne qualité.
- Classe III (< 25 %) : Eau inadaptée pour l'irrigation.

Les eaux appartenant aux Classes I et II sont recommandées pour l'irrigation.

I.4.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)

En général, un équilibre entre calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) est maintenu dans les eaux naturelles. Cependant, une concentration excessive de Mg^{2+} peut affecter la structure du sol et réduire la productivité des cultures (Nagaraju et al., 2014).

Le rapport de risque du magnésium (MHR) est l'un des indicateurs clés pour évaluer l'impact du magnésium sur la qualité de l'eau d'irrigation (Awad et al., 2022). Un excès de magnésium dans le sol peut augmenter l'alcalinité, ce qui détériore la qualité du sol et réduit les rendements agricoles (Kawagoshi et al., 2016).

Le MHR est calculé selon l'équation suivante :

$$MHR = \frac{Mg^{2+}}{(Mg^{2+} + Ca^{2+})} \times 100$$

Si la valeur du MHR dépasse 50 %, la qualité du sol est compromise et il devient plus alcalin, réduisant ainsi la croissance des cultures.

II.5 Analyse Statistique Multivariée

II.5.1 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique multivariée utilisée pour résumer et visualiser des données comportant plusieurs variables quantitatives. Elle projette les données dans un espace de dimension réduite, en conservant au mieux l'information, notamment les distances entre individus.

Objectifs principaux de l'ACP :

1. Identifier des regroupements d'échantillons similaires.
2. Détecter des corrélations entre variables.
3. Déterminer quels éléments caractérisent chaque échantillon ou groupe.

Les approches méthodologiques de l'ACP incluent la statistique classique (Hotelling, 1933), l'analyse factorielle et l'analyse des données (Pearson, 1901), cette dernière étant la plus courante. Le traitement des données peut se faire par centrage, réduction ou normalisation.

L'ACP normée, combinant centrage et réduction, est la plus utilisée car elle permet de comparer des variables ayant des unités différentes.

I.6 Conclusion

L'analyse de la qualité des eaux souterraines s'appuie sur l'étude détaillée de plusieurs paramètres physico-chimiques. Parmi ceux-ci figurent la conductivité électrique, les concentrations en ions majeurs comme le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), ainsi que le pH et la présence éventuelle de polluants.

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière approfondie les démarches méthodologiques employées pour interpréter les données collectées. Nous avons expliqué les techniques analytiques utilisées afin de garantir une évaluation rigoureuse des échantillons. De plus, nous avons intégré l'usage d'outils informatiques sophistiqués, notamment des logiciels spécialisés en hydrochimie et en analyses statistiques, pour améliorer la visualisation et l'interprétation des résultats.

Enfin, une attention particulière a été accordée aux indices et critères servant à évaluer la qualité des eaux souterraines. Ces indicateurs facilitent l'établissement de relations significatives entre les variables étudiées, ce qui permet de mieux comprendre les processus hydrochimiques qui influencent la composition de l'eau

Chapitre II : Résultats et interprétations

I.1. Introduction

L'évaluation de la qualité de l'eau constitue une étape fondamentale pour appréhender l'état des ressources hydriques et assurer leur gestion de manière sûre et durable. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats issus des analyses de la qualité de l'eau, réalisées à partir d'un ensemble de paramètres biologiques, physiques et chimiques. Ces résultats permettent d'obtenir une vue d'ensemble sur l'état actuel des différentes sources d'eau, tout en identifiant les aspects nécessitant une attention particulière selon les usages envisagés, notamment l'irrigation, l'alimentation en eau potable et les besoins industriels.

Ce travail vise à fournir des données précises et fiables, susceptibles de contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau et à la mise en place de stratégies adaptées pour leur préservation.

II.2. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques correspondent aux mesures qui décrivent les propriétés physiques et chimiques de l'eau prélevée dans 14 forages situés dans la zone de Mekhadema. Ces données ont été fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Biskra.

Tableau N°20: Paramètres physico-chimiques de l'eau de 14 forages-ANRH

N	T°C	pH	c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	NO3
1	17	7,92	2300	339	321,45	120	177	167	1600	366	18
2	16,3	8,1	2050	278,55	365,34	340	16	107	1200	780	4
3	16,5	7,8	2480	201,13	189,23	200	20	98	1300	210	10
4	67,4	7,72	2200	204,6	96	9	20	40	1600	45	25
5	16,4	7,21	2000	112,36	140	166	269	89	600	268	7
6	16,05	7,45	4090	367,33	69,44	189	6	178	1340	278	6
7	7,5	8,12	350	66	156	15	177	990	250	4	17,5
8	15,8	7,87	3000	163,54	239	9	146	1800	385	0	27,57
9	16	7,98	2000	182	140	13	177	1220	238	45	12,7
10	16,4	7,7	236	50	236	26	55	1104	388	6	21,8
11	16,3	7,15	430	28	146	28	79	960	376	6	21,5
12	15,5	7,64	2700	326	76	120	10	165	990	175	4
13	16	8,1	2810	271,4	131,71	136	6	195,2	1000	160	5
14	16,7	8,13	2900	424	74	116	13	1910	245	238	13

II.2.1. Bilan Ionique

Tableau N°21 : Balance Ionique de l'eau de 14 forages-ANRH

N	meq/l Mg	meq/l Na	meq/l K	meq/l HCO3	meq/l SO4	meq/l Cl	meq/l NO3	ΣCations	ΣAnions	Δ E
1	28,25	13,98	3,08	2,90	3,48	45,07	5,90	63,30	57,35	4,93
2	23,21	15,88	8,72	0,26	2,23	33,80	12,58	51,81	48,87	2,92
3	16,76	8,23	5,13	0,33	2,04	36,62	3,39	40,12	42,38	2,74
4	17,05	4,17	0,23	0,33	0,83	45,07	0,73	46,45	46,96	0,54
5	9,36	6,09	4,26	4,41	1,85	16,90	4,32	26,71	27,49	1,44
6	30,61	3,02	4,85	0,10	3,71	37,75	4,48	44,48	46,04	1,72
7	5,50	6,78	0,38	2,90	20,63	7,04	0,06	30,17	30,63	0,77

8	13,63	10,39	0,23	2,39	37,50	10,85	0,00	51,82	50,74	1,05
9	15,17	6,09	0,33	2,90	25,42	6,70	0,73	34,29	35,75	2,09
10	4,17	10,26	0,67	0,90	23,00	10,93	0,10	36,89	34,93	2,74
11	2,33	6,35	0,72	1,30	20,00	10,59	0,10	30,90	31,98	1,72
12	27,17	3,30	3,08	0,16	3,44	27,89	2,82	37,55	34,31	4,50
13	22,62	5,73	3,49	0,10	4,07	28,17	2,58	36,83	34,91	2,67
14	35,33	3,22	2,97	0,21	39,79	6,90	3,84	54,53	50,74	3,59

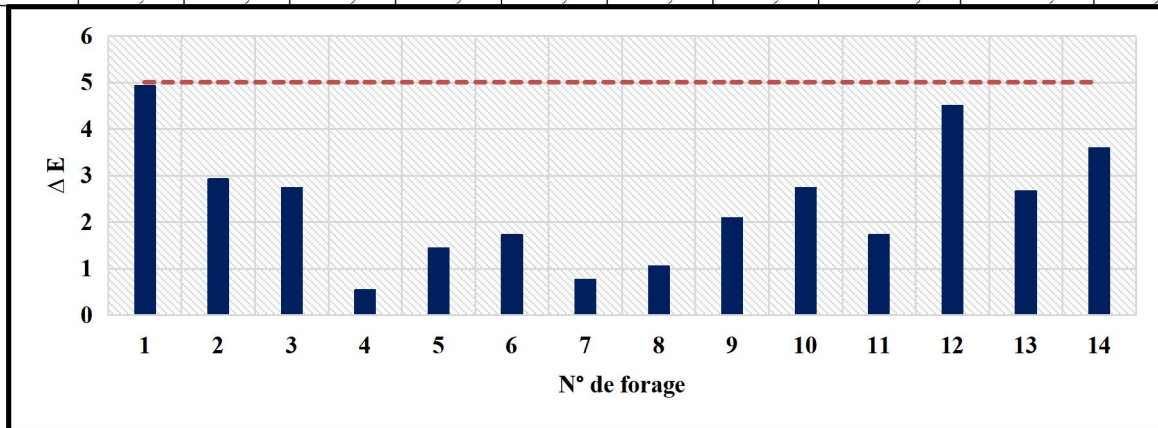


Figure N°26: Variation du déséquilibre ionique (ΔE) dans les 14 forages.

- **Vérification du bilan ionique et exclusion de certains forages**

Le bilan ionique a été calculé pour l'ensemble des forages étudiés en comparant la somme des concentrations des cations et des anions exprimés en milliéquivalents par litre (meq/L), selon la formule suivante :

$$100 \times \left(\frac{\text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\text{Cations} + \sum \text{Anions}} \right) = \Delta E$$

Un écart maximal de $\pm 5\%$ a été retenu comme seuil d'acceptabilité, conformément aux recommandations courantes en hydrochimie. La majorité des forages ont montré un bon équilibre ionique ($\Delta E \leq 5\%$), ce qui confirme la fiabilité des analyses chimiques.

II.3 Paramètres physiques

II.3.1 La température

La température des eaux souterraines issues du forage dépend de plusieurs facteurs, tels que la profondeur du puits, la nature géologique des couches traversées, les conditions climatiques locales ainsi que d'autres paramètres environnementaux. En général, plus le forage est profond, plus la température de l'eau augmente, en raison du gradient géothermique terrestre. Toutefois, cette relation peut être influencée par des variations régionales et locales significatives.

La température joue un rôle fondamental dans l'intensification des réactions chimiques, la prolifération bactérienne et l'augmentation du taux d'évaporation de l'eau. Elle est également affectée par la température de l'air ambiant, les fluctuations saisonnières, les caractéristiques géologiques des formations traversées, ainsi que la profondeur de la nappe phréatique par rapport à la surface du sol.

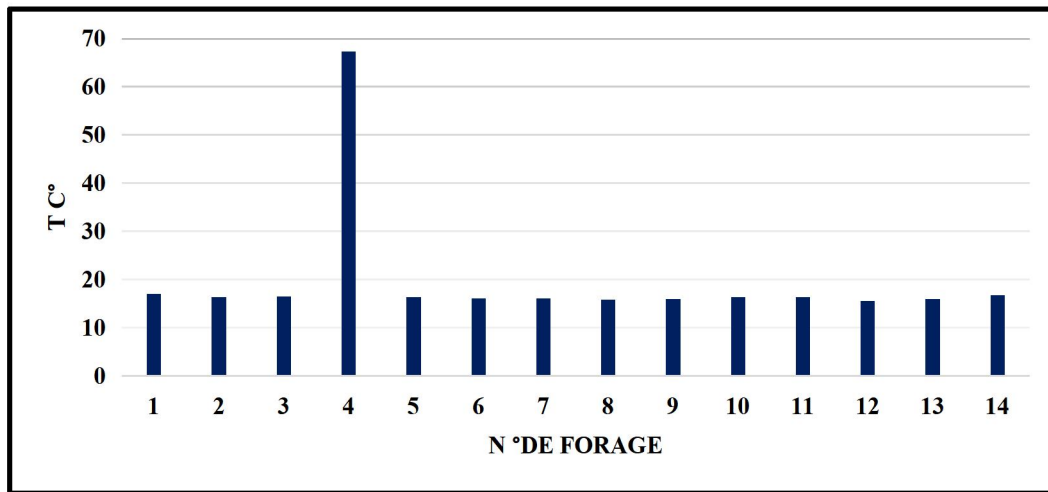


Figure N°27: Histogramme de la température de 14 forages.

Tableau N°22: Statistique de la température de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type
Température (T°)	°	15,5	67,4	22,5844	13,1820

- Nous observons une faible variation de température avec écart type de (0.567°C).
- Température minimum 15.5°C
- Température maximum 67.4°C
- Température moyenne 13.1820°C

D'après la figure N° 30 les résultats présentés dans la figure n°30, la température des eaux souterraines mesurée dans 14 forages de la zone d'étude varie entre 15,5°C et 67,4°C, avec une moyenne de 22,58°C et un écart-type de 13,18°C. Cette variation importante peut s'expliquer par la différence de profondeur des forages, la nature géologique du sous-sol, ainsi que l'influence des conditions climatiques locales.

Malgré la valeur maximale relativement élevée, la température moyenne reste inférieure à la limite recommandée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011), qui fixe une température souhaitable de 25°C pour l'eau destinée à la consommation. Ainsi, on peut conclure que la température des eaux souterraines dans la région de Mekhadema est globalement acceptable et n'affecte pas négativement la qualité de l'eau.

II.3.2 Potentiel d'hydrogène (pH)

Le **pH** (potentiel hydrogène) est un indicateur essentiel permettant d'apprécier l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Il est mesuré sur une échelle de 0 à 14, avec 7 correspondant à la neutralité.

Dans notre étude, les valeurs de pH des 14 forages se situent entre 7,01 et 8,4, indiquant des eaux légèrement basiques. Ces valeurs restent conformes aux normes algériennes (JORA 2014), ce qui signifie que le pH des eaux souterraines de la région est acceptable et ne présente aucun risque pour la qualité de l'eau.

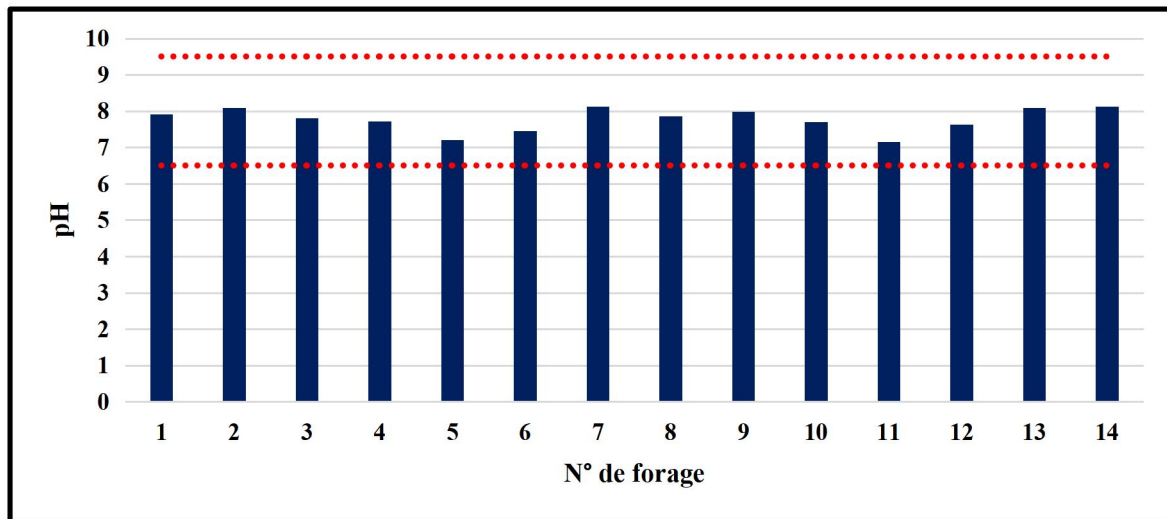


Figure N°28: Histogramme du pH de 14 forages.

Tableau N°23: Statistique du pH de 14 forages.

Paramètre	Unité	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
pH	-	7,15	8,13	7,760625	0,31296	6.5 – 9.5

- Nous observons un écart type de (0.31296).
- pH minimum 7.15
- pH maximum 8.13
- pH moyenne 7.835

D'après la figure N° 29 les résultats obtenus du pH sont comme suivis : Les valeurs du pH mesurées dans les 24 forages varient entre 7,01 et 8,4, avec une moyenne de 7,835 et un écart type de 0,3526. Ces résultats indiquent que toutes les eaux analysées présentent un pH compris dans l'intervalle recommandé par la norme algérienne (JORA 2014), qui fixe les limites acceptables entre **6,5 et 9,5**. Ainsi, le pH des eaux souterraines étudiées est **acceptable**, traduisant un caractère neutre à légèrement basique, ce qui est favorable à la stabilité chimique et à la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine.

II.3.3 Minéralisation (Conductivité électrique CE)

Dans le contexte de l'eau, la conductivité électrique est souvent utilisée comme indicateur de la concentration d'ions dissous dans l'eau. Les ions tels que le sodium, le calcium, le magnésium, le chlorure et le sulfate contribuent à la conductivité électrique de l'eau. Par conséquent, une eau avec une conductivité électrique élevée peut indiquer une concentration plus élevée en sels dissous, tandis qu'une eau avec une conductivité électrique faible peut indiquer une concentra.

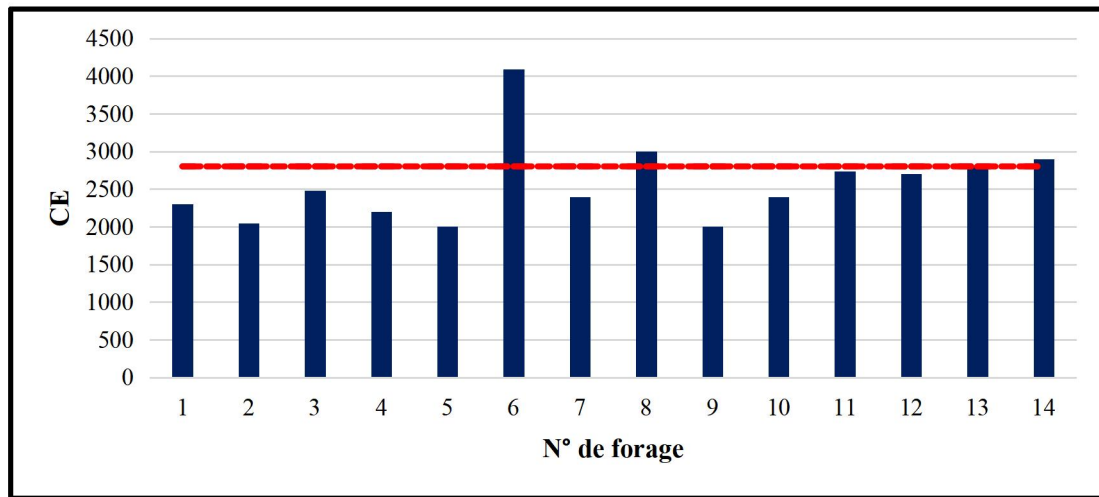


Figure N°29: Histogramme de la conductivité électrique de 14 forages.

D'après la figure N° 30 les résultats obtenus de la conductivité électrique sont comme suivis :

- 12 forages dépassent cette la valeur de la Norme (2800uS/cm), indiquant une salinité élevée probable de l'eau.
- Tandis que 2 forages présentent des valeurs inférieures ou égales à cette norme, reflétant une qualité d'eau relativement meilleure en termes de salinité.

Tableau N°24: Statistique de la CE de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
CE	uS/cm	2000	4090	2635	527,9963	2800

- Un grand écart type observé (527.9963 uS/cm).
- Conductivité électrique minimale est (2000 uS/cm)
- Conductivité électrique maximale est (4090 uS/cm)
- Conductivité électrique moyenne est (2635 uS/cm)

II.4 Les paramètres chimiques

II.4.2 Les Cations Majeurs

II.4.2.1 Le Calcium (Ca²⁺)

Le calcium (Ca²⁺) est un élément largement présent dans les eaux naturelles. Il contribue de manière significative à la dureté de l'eau et provient principalement de la dissolution des roches carbonatées, sous l'effet du dioxyde de carbone, selon la réaction :



Il peut également provenir des formations gypseuses (CaSO₄·2H₂O), connues pour leur solubilité élevée. Dans ces cas, une concentration accrue en sulfates (SO₄²⁻) peut entraîner une augmentation parallèle du calcium dans l'eau souterraine.

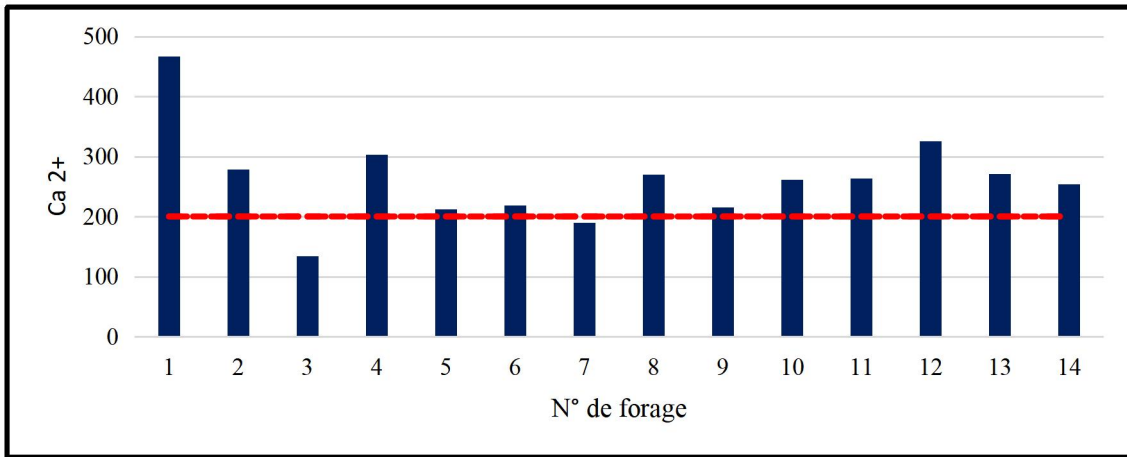


Figure N°30: Histogramme de Calcium de 14 forages.

Tableau N°25: Statistique de Calcium de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Ca ²⁺	mg/L	134,76	467	266,8675	73,753	200

La concentration en calcium (Ca²⁺) mesurée dans 14 forages varie entre une valeur minimale et maximale, avec une moyenne représentant le niveau général. Un certain nombre de forages (comme 2 ou 4) respectent la norme algérienne (200 mg/L), où les concentrations de calcium restent dans les limites acceptables, tandis que la majorité dépasse cette norme. La grande variabilité des valeurs, indiquée par un écart-type élevé, reflète des conditions géologiques et hydrogéologiques diverses influençant la qualité des eaux souterraines.

II.4.2.2 Le Magnésium (Mg²⁺)

Le magnésium est un élément naturellement présent dans les eaux. À fortes concentrations, il peut altérer le goût de l'eau potable et provoquer des dépôts dans les installations. En agriculture, un excès de magnésium dans l'eau d'irrigation peut nuire à la croissance des plantes et déséquilibrer la structure des sols. Un suivi régulier de ce paramètre est donc essentiel, notamment dans des zones sensibles comme la région de Mekhadema, pour assurer la durabilité des ressources en eau.

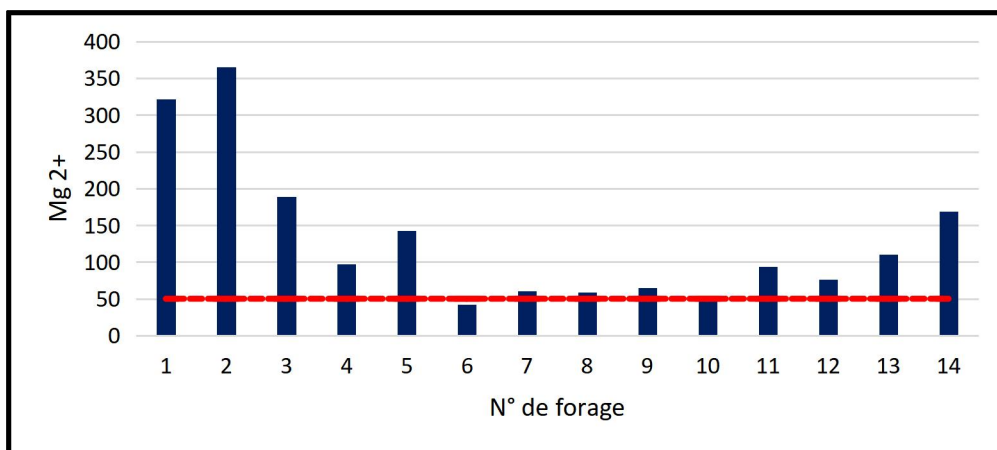


Figure N°31: Histogramme de Magnésium de 14 forages.

Tableau N°26: Statistique de Magnésium de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Mg ²⁺	mg/L	42	365,34	140,864	96,49545	50

Les concentrations en magnésium mesurées dans 14 forages de la région de Mekhadema varient entre 42 mg/L et 365,34 mg/L, avec une moyenne d'environ 128,65 mg/L. La norme algérienne (JORA 2014) fixe une limite maximale de 50 mg/L.

D'après les résultats, un seul forage respecte cette norme, tandis que 13 forages la dépassent largement. Cette situation révèle une forte minéralisation en magnésium dans la majorité des eaux souterraines échantillonnées.

L'écart-type élevé (89,73 mg/L) indique une grande variabilité des teneurs, probablement due à des facteurs géologiques ou anthropiques.

II.4.2.3 Le Sodium (Na²⁺)

Lorsque le sodium est présent dans les eaux souterraines, il peut entraîner diverses réactions en fonction de plusieurs paramètres, notamment sa concentration, le pH, et la présence d'autres éléments dissous.

Des teneurs élevées en sodium altèrent la potabilité de l'eau à cause d'un goût excessivement salé, et peuvent également dégrader la qualité des sols agricoles par accumulation dans la matrice du sol. Ainsi, la présence de sodium dans les eaux souterraines constitue un facteur à surveiller, car elle peut générer des effets physico-chimiques complexes et compromettre à la fois la qualité de l'eau et celle de l'environnement.

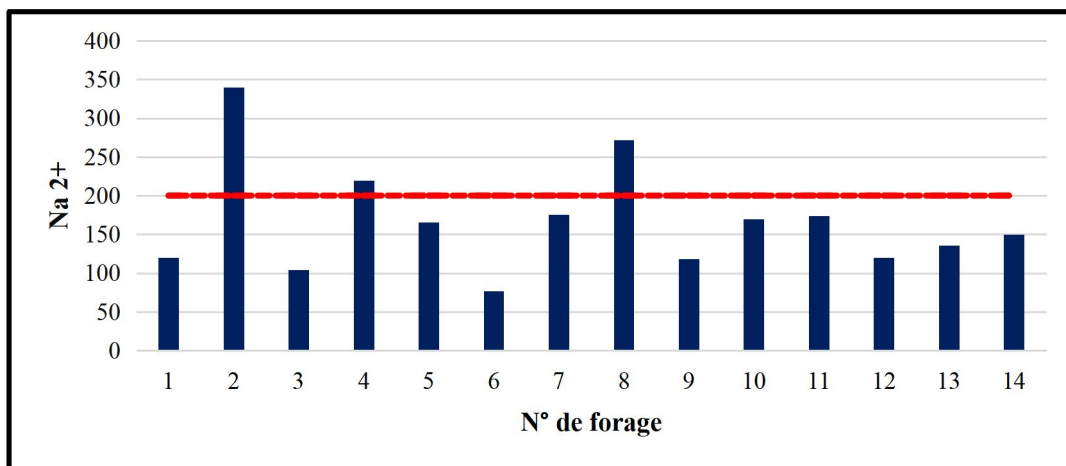


Figure N°32: Histogramme de Sodium de 14 forages.

Tableau N°27: Statistique de Sodium de 14forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Na ²⁺	mg/L	77	340	172,5	67,6330	200

D'après l'histogramme du Sodium (Na^+), nous constatons que La majorité des forages (11 sur 14) présentent des teneurs en sodium conformes à la norme algérienne (200 mg/L), tandis que 3 forages la dépassent, indiquant une possible minéralisation d'origine géologique.

- Un grand écart type observé (67.6330mg/L).
- Quantité minimale de sodium observée est (77 mg/L).
- Quantité maximale de sodium observée est (340 mg/L).
- Quantité moyenne de sodium observée est (172.5 mg/L).

II.4.2.4 Le Potassium (K^+)

Le potassium est naturellement présent dans les roches contenant des minéraux comme les feldspaths et les micas. Il peut se retrouver dans les eaux souterraines par dissolution. À fortes concentrations, il peut altérer la qualité et le goût de l'eau potable, et poser des risques pour la santé, notamment chez les personnes atteintes de troubles rénaux. Ainsi, sa surveillance régulière est essentielle pour prévenir toute contamination et garantir un usage sûr de la ressource.

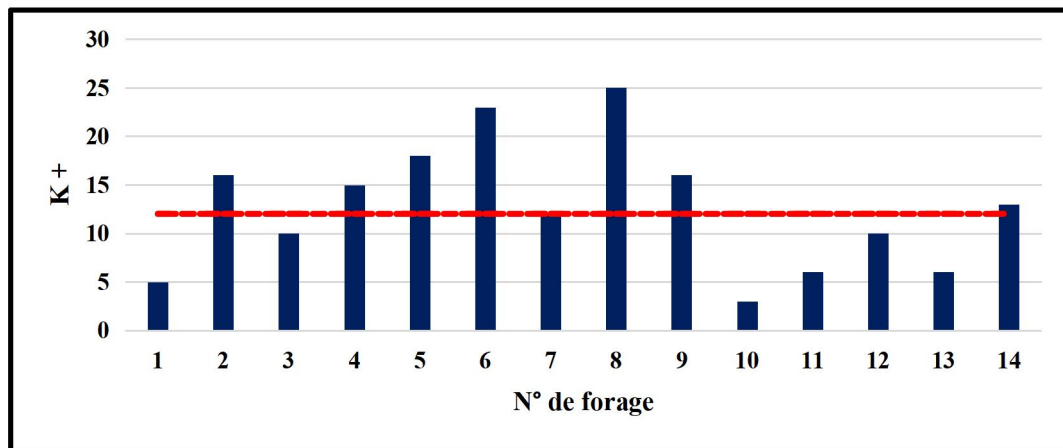


Figure N°33: Histogramme de Potassium de 14 forages.

D'après l'histogramme du potassium (K^+), Sur les 14 forages de Mekhadema, seul un forage sur deux (7/14) respecte la norme de 12 mg/L, tandis que l'autre moitié la dépasse.

- Forages conformes (≤ 12 mg/L) : 7 forages – N° 1, 3, 7, 10, 11, 12, 13. Les forages 1 et 7 sont exactement au seuil de 12 mg/L.
- Forages non conformes (> 12 mg/L) : 7 forages – N° 2, 4, 5, 6, 8, 9, 14, avec un pic à 25 mg/L (forage 8).

Tableau N°28: Statistique de Potassium de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
K	mg/L	3	25	12,875	6,3856	12

- Un grand écart type observé (6.3856 mg/L).
- Quantité minimale de potassium observée est (03 mg/L).

- Quantité maximale de potassium observée est (25 mg/L).
- Quantité moyenne de potassium observée est (21.875 mg/L).

II.4.3 Les Anions Majeurs

II.4.3.1 Bicarbonate (HCO_3^-)

Le bicarbonate est couramment présent dans les eaux souterraines. Il provient principalement de la dissolution du dioxyde de carbone (CO_2) et des roches carbonatées comme le calcaire et la dolomie. Bien qu'il n'ait généralement pas d'effet nocif sur la santé, une concentration élevée peut rendre l'eau légèrement alcaline et causer des problèmes de corrosion dans les réseaux de distribution. Sa surveillance reste donc importante pour préserver la qualité des infrastructures hydrauliques.

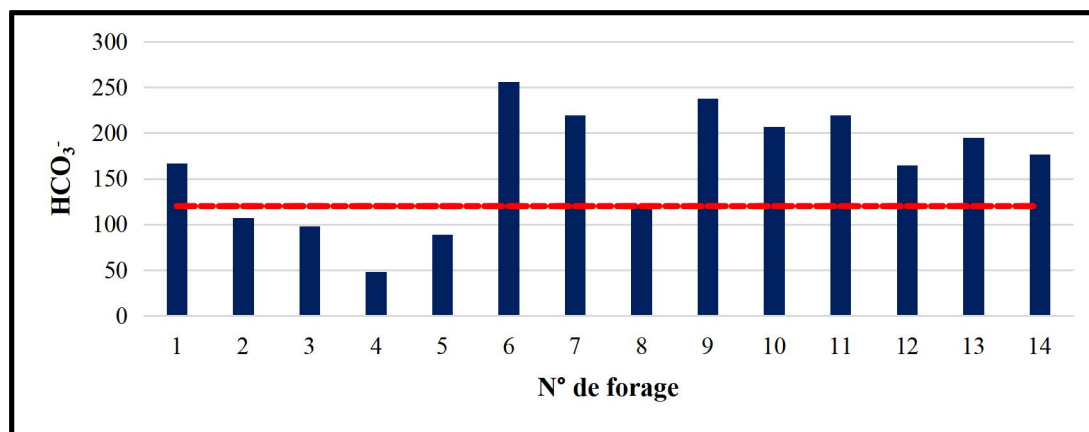


Figure N°34: Histogramme de Bicarbonate de 14 forages.

D'après l'histogramme du bicarbonate (HCO_3^-), Sur les 14 forages analysés, 5 forages respectent ou sont proches de cette limite, tandis que 9 forages dépassent nettement cette valeur. Cette forte minéralisation en bicarbonate est probablement liée à la dissolution des roches carbonatées de l'aquifère, ce qui peut influencer le pH et augmenter l'alcalinité de l'eau.

Tableau N°29: Statistique de Bicarbonate de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
HCO_3^-	mg/L	48	256	163,3	60,71426	120

- Un grand écart type observé (60.71426 mg/L).
- Quantité minimale de bicarbonate observée est (48 mg/L).
- Quantité maximale de bicarbonate observée est (256 mg/L).
- Quantité moyenne de bicarbonate observée est (163.3 mg/L).

II.4.3.2 Sulfate (SO_4^{2-})

Le sulfate est un composé courant dans les eaux souterraines, issu principalement de la dissolution de minéraux soufrés comme le gypse et la pyrite, ainsi que d'activités humaines

(exploitation minière, agriculture, industrie). À fortes concentrations, il peut altérer la qualité de l'eau potable en provoquant des goûts et odeurs désagréables et un effet laxatif chez les consommateurs. De plus, les sulfates peuvent causer des problèmes de corrosion, d'odeur et de précipitations dans les réseaux de distribution d'eau, ce qui nécessite une surveillance attentive.

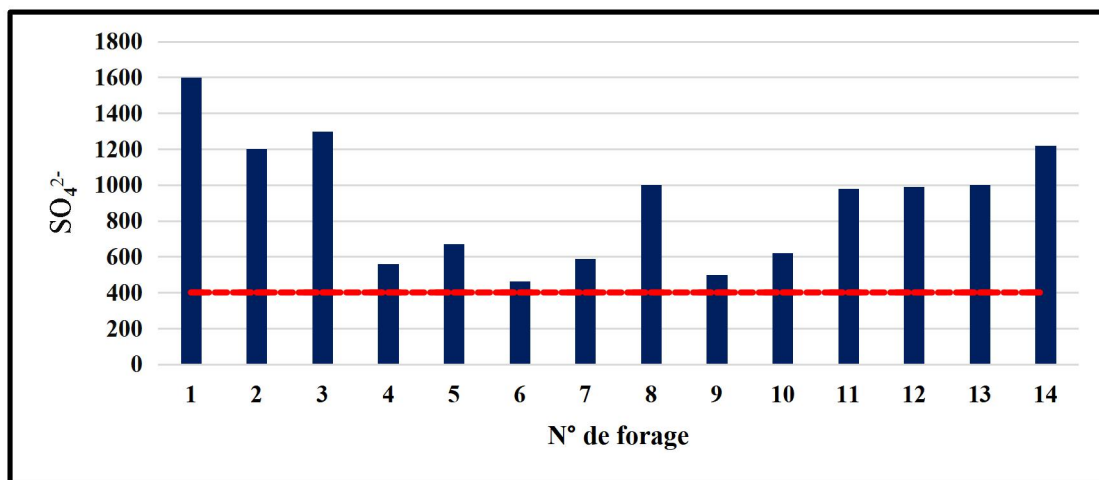


Figure N°35: Histogramme de Sulfate de 14 forages.

D'après l'historgramme des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}), tous les forages dépassent largement la norme algérienne de 400 mg/L. Cela signifie que la totalité des 14 forages est non conforme pour ce paramètre.

Tableau N°30: Statistique de Sulfate de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
SO_4^{2-}	mg/L	465	1600	922,5	334,71527	400

- Un grand écart type observé (334.71527 mg/L).
- Quantité minimale de sulfate observée est (465 mg/L).
- Quantité maximale de sulfate observée est (1600 mg/L).
- Quantité moyenne de sulfate observée est (922.5mg/L).

II.4.3.3 Chlorure (Cl⁻)

Les chlorures dans les eaux souterraines proviennent de sources **naturelles** (dépôts salins, halite, intrusions marines) et **anthropiques** (engrais agricoles, rejets industriels, sels de déneigement).

À fortes concentrations, ils peuvent :

- Donner un goût salé désagréable à l'eau potable,
- Avoir un effet laxatif,
- Nuire à certaines cultures sensibles au sel en agriculture,
- Provoquer une dégradation de la qualité des sols.

La surveillance du chlorure est donc essentielle pour protéger la santé humaine, l'agriculture et les ressources en eau.

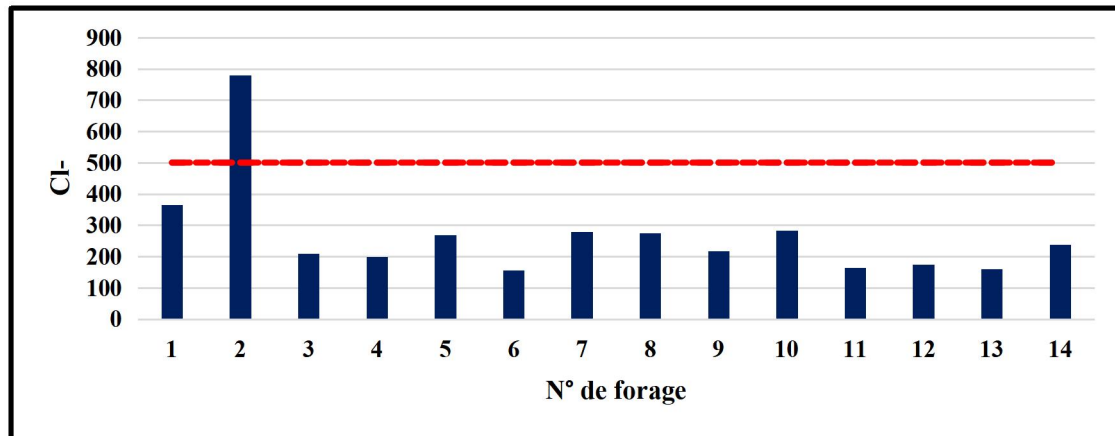


Figure N°36: Histogramme de Chlorure de 14 forages.

Selon l'histogramme de Chlorure nous observons que, 13 forages leurs résultats sont inférieurs à la norme et 01 forages leurs résultats sont supérieurs à la norme Algérienne.

Tableau N°31: Statistique de Chlorure de 14 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
Cl ⁻	mg/L	156	780	922,5	294,375	500

- Un grand écart type observé (294.375mg/L).
- Quantité minimale de chlorure observée est (156 mg/L).
- Quantité maximale de chlorure observée est (780 mg/L).
- Quantité moyenne de chlorure observée est (922.5mg/L).

II.4.3.4 Nitrate (NO₃⁻)

La contamination des eaux souterraines par les nitrates constitue une problématique environnementale préoccupante. Les nitrates, formés d'azote et d'oxygène, sont couramment employés comme fertilisants dans le secteur agricole.

En cas d'usage excessif ou de mauvaise gestion des engrais, ces composés peuvent s'infiltrer à travers le sol et atteindre les nappes phréatiques. Cette infiltration résulte souvent du lessivage des sols par les eaux de pluie ou d'irrigation.

Des niveaux élevés de nitrates dans l'eau souterraine peuvent engendrer des risques pour la santé humaine, notamment pour les nourrissons. En outre, ils peuvent également perturber les écosystèmes aquatiques en favorisant l'eutrophisation.

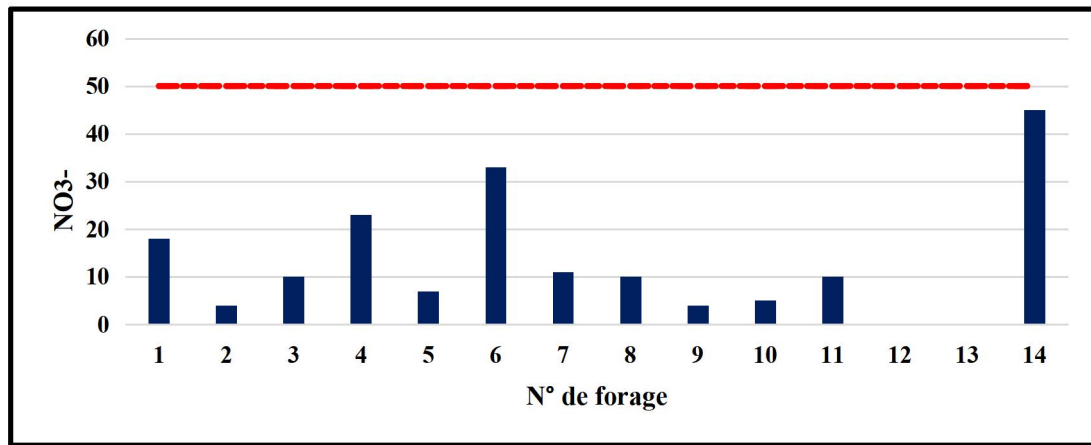


Figure N°37: Histogramme de Nitrate de 24 forages.

D'après l'histogramme du Nitrate les résultats sont inférieurs à la norme Algérienne.

Tableau N°32: Statistique de Nitrate de 24 forages.

Paramètre	U	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Norme Algérienne
NO ₃ ⁻	mg/L	0	45	14,0625	12,4778	50

- Un grand écart type observé (12.4778 mg/L).
- Quantité minimale de nitrate observée est (0).
- Quantité maximale de nitrate observée est (45 mg/L).
- Quantité moyenne de nitrate observée est (14.0625mg/L).

II.4.4 Analyse statistique des paramètres physico-chimique

o Matrice de corrélation

La matrice de corrélation est un outil statistique qui permet de représenter les relations linéaires entre plusieurs variables sous forme de tableau. Chaque cellule indique un coefficient compris entre -1 et +1, traduisant une corrélation négative, positive ou inexistante. Elle permet de résumer un grand volume de données et de repérer les liens significatifs, facilitant ainsi l'interprétation et la détection de structures cachées dans les données..

Tableau N°33: Résultats de matrice de corrélation.

Paramètres	T°C	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO3	SO4	Cl	NO3
T°C	1										
pH	-0,241	1									
CE	0,093	-0,459	1								
Ca	0,035	-0,346	0,108	1							
Mg	-0,210	-0,044	0,364	-0,136	1						
Na	-0,230	-0,269	0,289	0,492	0,322	1					
K	-0,249	0,306	0,076	-0,450	0,209	-0,308	1				
HCO3	-0,278	0,148	-0,173	-0,159	-0,073	-0,545	0,160	1			
SO4	0,474	-0,316	0,256	0,472	0,175	0,482	-0,370	-0,813	1		
Cl	-0,137	-0,246	-0,025	0,528	0,504	0,920	-0,185	-0,456	0,480	1	
NO3	0,368	0,131	0,202	-0,486	0,147	-0,770	0,239	0,511	-0,239	-0,611	1

o **Interprétation des résultats de Matrice de corrélation :**

L'analyse de la matrice de corrélation met en évidence plusieurs relations significatives entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines, traduisant diverses interactions géochimiques.

◆ **Corrélations positives marquantes :**

- Une forte corrélation entre le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-) ($r = 0,92$) suggère une origine commune, probablement liée à la dissolution de l'halite (NaCl).
- Le sulfate (SO_4^{2-}) est fortement corrélé au calcium (Ca^{2+}) ($r = 0,47$), indiquant une possible influence de la dissolution du gypse (CaSO_4).
- D'autres corrélations positives notables incluent :
 - o Na^+ et CE ($r = 0,41$) – reflétant leur contribution à la salinité.
 - o Cl^- et CE ($r = 0,33$).
 - o SO_4^{2-} et CE ($r = 0,46$).
 - o Na^+ et Ca^{2+} ($r = 0,49$).
 - o K^+ et pH ($r = 0,31$), ainsi que K^+ et Mg^{2+} ($r = 0,21$).

◆ **Corrélations négatives notables :**

- Une corrélation inverse forte entre le bicarbonate (HCO_3^-) et le sodium ($r = -0,55$) suggère une opposition entre milieux bicarbonatés et sodiques, potentiellement liée à des processus d'échange ionique.
- Le HCO_3^- montre aussi des corrélations négatives avec :
 - o Cl^- ($r = -0,46$),
 - o SO_4^{2-} ($r = -0,81$),
 - o Ca^{2+} ($r = -0,16$),
 - o K^+ ($r = -0,16$).
- Enfin, on note une corrélation négative entre le nitrate (NO_3^-) et le Na^+ ($r = -0,77$), ce qui pourrait refléter l'influence de différentes sources d'origine (agricole vs. Géologique).

II.5 Indice de Qualité de l'Eau (IQE) [Water Quality Index (WQI)]

L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) représente un outil permettant d'évaluer l'état global de l'eau dans une région donnée, en l'occurrence celle de Mekhadema. Il repose sur l'intégration de plusieurs paramètres physico-chimiques et biologiques afin de fournir une estimation de la qualité écologique de l'eau et de sa sécurité pour divers usages tels que l'alimentation humaine, l'irrigation, ou encore la protection de la faune aquatique.

□ Dans notre cas l'étude de qualité de l'eau de 14 forages Mekhadema, les valeurs calculées à la base de 10 paramètres sont montrées comme suite :

Tableau A -N° 34: Valeurs de IQE de 14 forages.

N°	Résultats de IQE
1	954,3860
2	216,8014
3	178,9736
4	153,8149
6	1303,5657
7	93,8763
8	915,5814
9	840,9150
10	926,5766
11	380,5571
12	459,7550
13	104,7575
14	100,5778

Tableau B -N° 35: Récapitulative de résultats de IQE

Intervalle de WQI	Qualité d'eau	Nombre de forage	Pourcentage %	Désignation de forages	Possibilité d'utilisation et son domaine
0-25	Excellente	0	0%	Néant	/
26-50	Bonne	0	0%	Néant	/
51-75	Modérée	1	7,14%	13	Eau potable avec traitement obligatoire/ Irrigation
76-100	Mauvaise	2	14,29%	7, 14	Une possibilité d'utilisation à l'irrigation avec des conditions fermes.
> 100	Très Mauvaise	11	78,57%	1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12	Utilisation interdite (Consommation humaine ou irrigation)

Vu aux résultats englobés dans le tableau ci-dessus nous analysons et interprétons les valeurs comme suite :

- 01 forage (7,14%), le forage N°13, présente une qualité d'eau modérée (IQE entre 51 et 75). L'eau nécessite un traitement avant consommation humaine, mais reste adaptée à l'irrigation.
- 02 forages (14,29%), les forages N°7 et 14, sont classés comme mauvaise (IQE entre 76 et 100), avec une possibilité d'utilisation pour l'irrigation sous conditions.
- 11 forages (78,57%) présentent une qualité d'eau très mauvaise (IQE > 100), ce qui rend leur eau inadapée à la consommation humaine ou à l'irrigation.

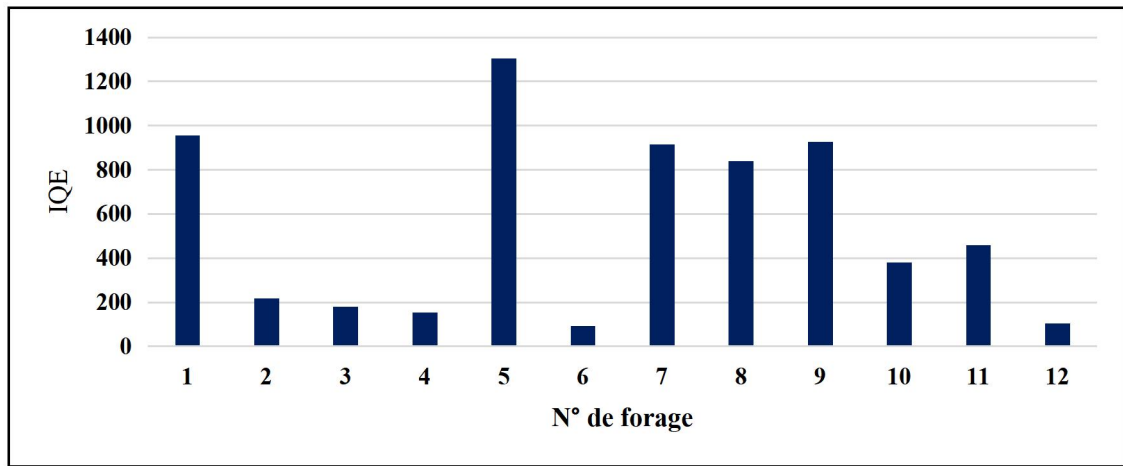


Figure N°38: Histogramme de IQE de 14 forages.

II.6 Classification hydro-chimique des eaux souterraines

II.6.1 Traitement des données par Diagramme

II.6.1.1 Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.)

Le Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.), conçu par le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon, constitue un outil essentiel dans l'analyse des données hydrochimiques. Ce programme, connu sous le nom de "Diagrammes", permet la réalisation d'analyses statistiques et graphiques, facilitant ainsi l'interprétation des processus géochimiques affectant les eaux souterraines.

Particulièrement adapté à la classification géochimique des eaux et des roches carbonatées, il offre diverses représentations visuelles, comme les diagrammes ternaires, qui permettent une lecture claire et approfondie des données.

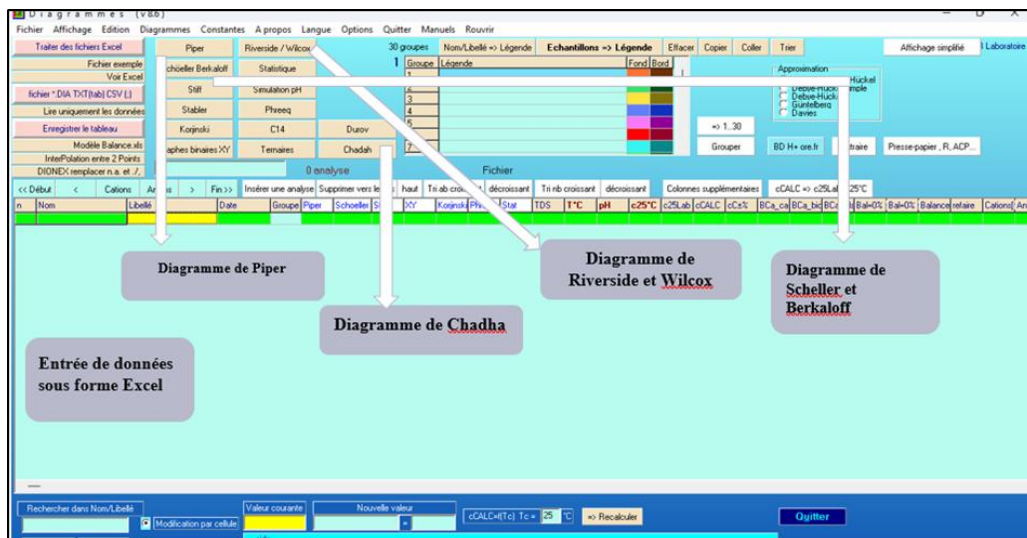


Figure N°39: Interface de logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A version 8.44).

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé la version 8.44 du logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.) pour élaborer différents types de diagrammes, notamment :

A - Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est un outil graphique couramment utilisé en hydrochimie pour l'interprétation des résultats analytiques des eaux souterraines ou superficielles. Il permet de représenter simultanément les concentrations relatives des principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) sous forme d'un graphique unique.

Ce diagramme comprend trois zones :

- Deux triangles distincts représentant séparément les cations et les anions.
- Un losange central où les coordonnées issues des deux triangles sont projetées pour offrir une synthèse visuelle.

L'un des intérêts majeurs de ce diagramme réside dans sa capacité à regrouper visuellement des analyses présentant des faciès chimiques similaires, ce qui le rend très utile pour le suivi temporel de la qualité de l'eau.

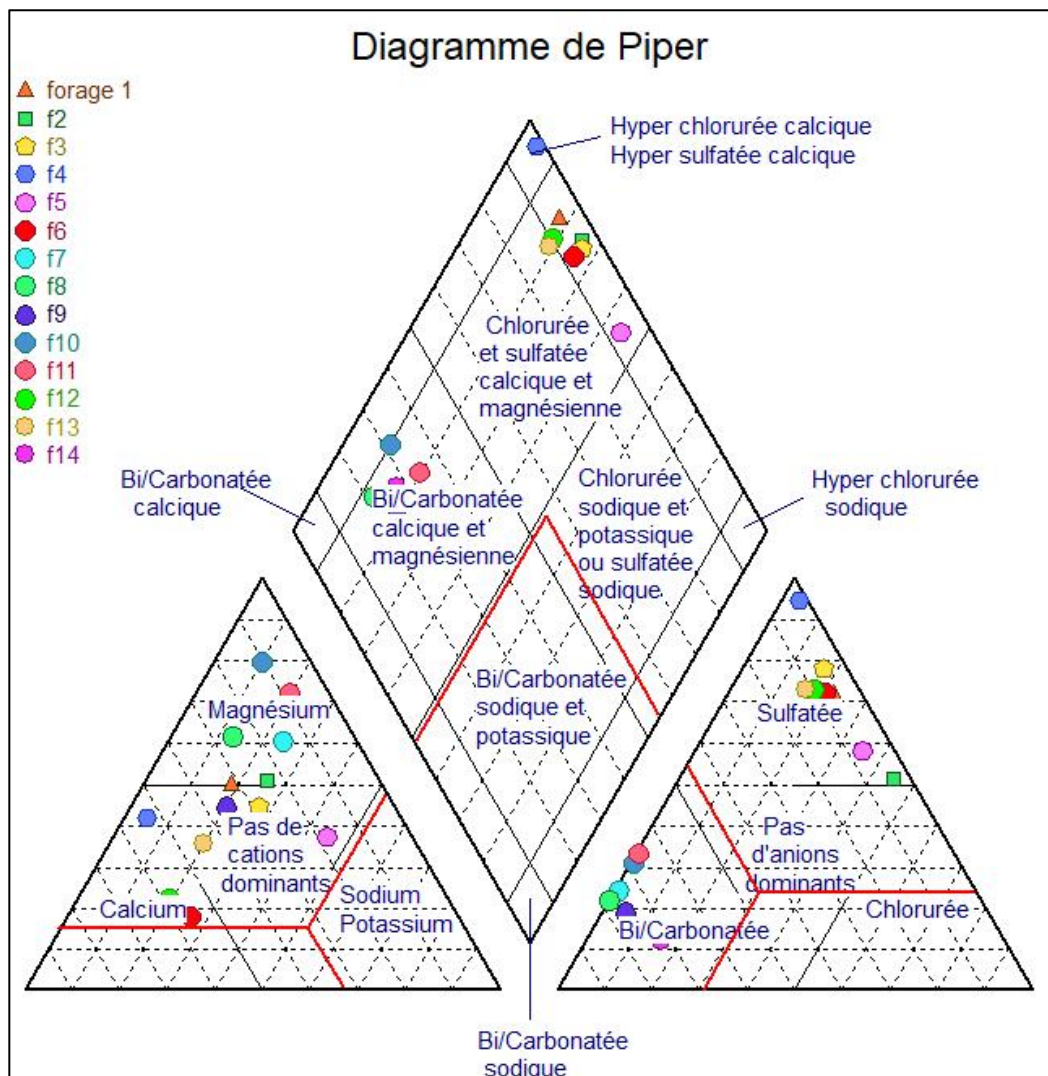


Figure N°40: Diagramme de Piper pour 14 forages de Mekhadema

o **Interprétation des résultats de diagramme de Piper :**

La figure N° 42 montre les faciès chimiques des valeurs analysés dans les 14 forages de Mekhadema selon le diagramme de Piper qui présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

Nous observons que l'ensemble des eaux des 14 forages étudiées, leurs faciès est caractérisé Par :

- **Cations dominants :** Comme le montre le triangle inférieur gauche, les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) sont les cations prédominants, avec un ordre d'abondance général :



- **Anions dominants :** De même, le triangle inférieur droit indique que les ions sulfate (SO_4^{2-}) et chlorure (Cl^{-}) sont les anions dominants, selon l'ordre suivant :



B- Diagramme de Schoeller et Berkaloff.

Le diagramme de Schoeller et Berkaloff, également connu sous le nom de diagramme de Schoeller, est un outil couramment utilisé en hydrochimie pour représenter et comparer les concentrations de différents ions dans des échantillons d'eau. Ce diagramme semilogarithmique permet de visualiser les faciès géochimiques des eaux et de comparer simultanément plusieurs échantillons.

Il est également utilisé pour comparer les résultats des analyses hydrochimiques avec des normes de qualité de l'eau et pour identifier des tendances spatio-temporelles dans les données.

Le diagramme de Schoeller et Berkaloff est un outil essentiel pour les hydrogéologues et les chimistes de l'eau, offrant une représentation claire et comparative des compositions ioniques des eaux naturelles.

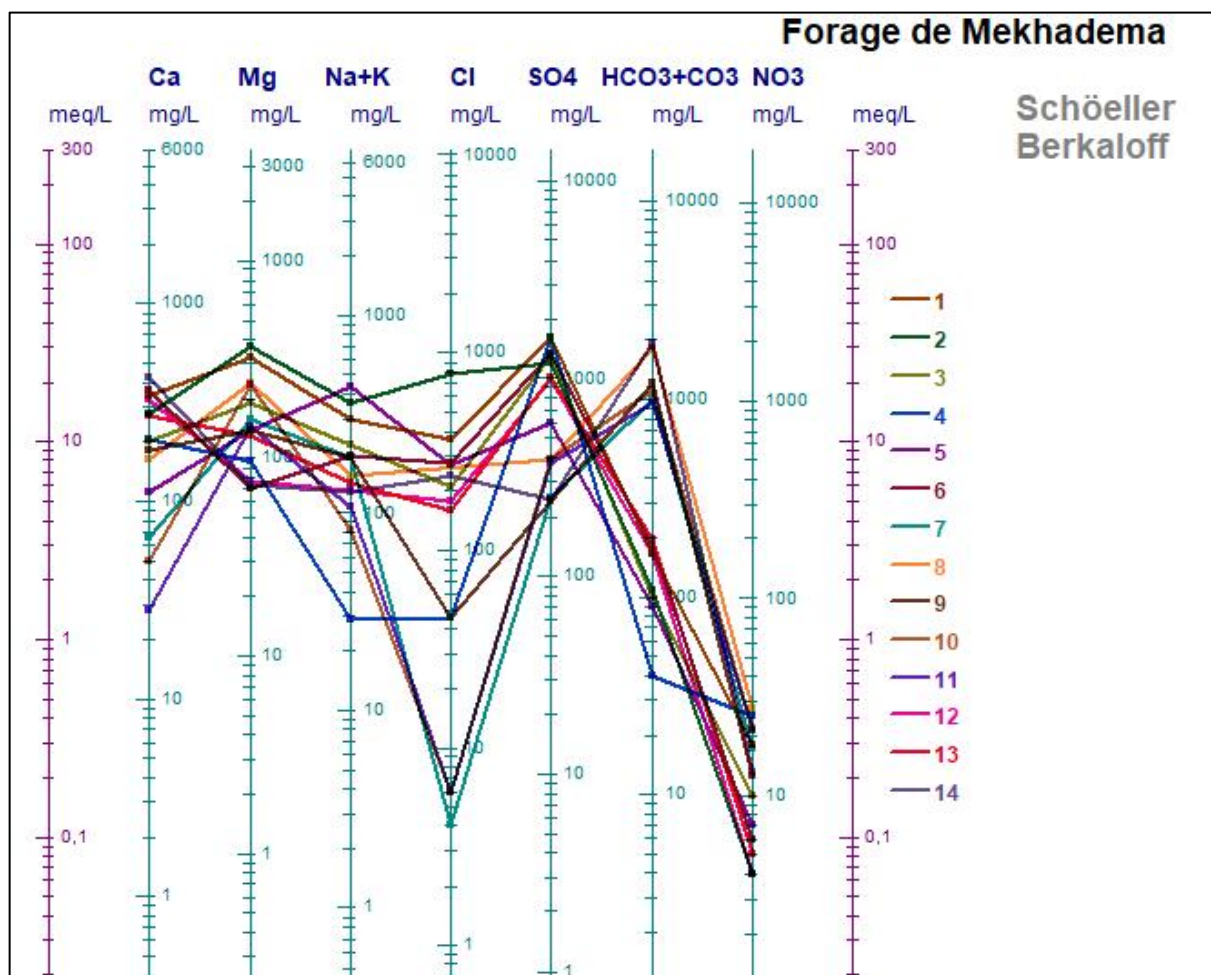


Figure N°41: Diagramme de Schoeller et Berkaloff pour 14 forages de Mekhadema.

• **Interprétation des résultats de diagramme de Schoeller et Berkaloff :**

Ce diagramme à échelle logarithmique met en évidence deux faciès chimiques dominants, confirmant ainsi les observations déjà établies à partir du diagramme de Piper.

- **Éléments dominants :** SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+}
- **Faciès chimiques :** Chloruré sodique, Sulfaté calcique magnésien

C - Diagramme de Riverside.

Le diagramme de Riverside constitue un outil analytique fondamental pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation. Il est largement utilisé par les spécialistes en gestion des ressources en eau, les ingénieurs agronomes et les experts en irrigation. Ce diagramme permet de juger rapidement de l'aptitude de l'eau à l'irrigation en tenant compte de deux paramètres essentiels : la conductivité électrique (CE), indicateur de salinité, et le rapport d'adsorption du sodium (SAR), indicateur de sodicité. Ces deux facteurs influencent directement la structure du sol et la productivité agricole.

Le diagramme associe les valeurs de CE et de SAR dans une grille de classification qui facilite l'interprétation de la qualité de l'eau. Afin de l'adapter aux réalités des zones arides, notamment sahariennes, une classe supplémentaire (C5) a été ajoutée pour inclure les eaux

très salines dont la conductivité dépasse 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, rendant ainsi le diagramme plus pertinent pour les conditions locales.

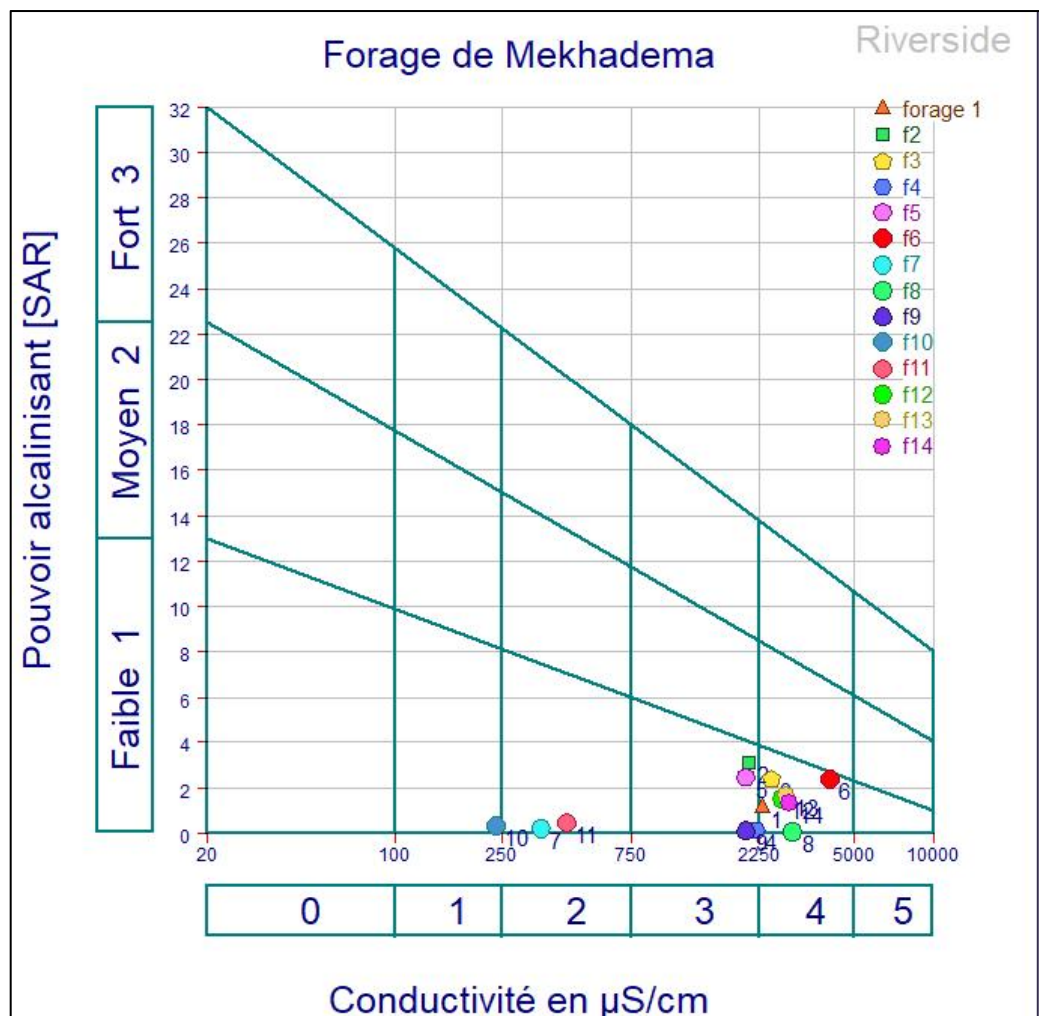


Figure N°42: Diagramme de Riverside pour les 14 forages de Mekhadema.

Tableau N°36: Les classes issues du diagramme de RIVERSIDE (CLEMANT et GALAND, 1979).

	Classes CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)				
	C1 0 - 250	C2 250 - 750	C3 750 - 2250	C4 2250 - 5000	C5 5000 - 10000
S1 0 - 10	C1S1	C2S1	C3S1	C4S1	C5S1
S2 10 - 18	C1S2	C2S2	C3S2	C4S2	C5S2
S3 18 - 26	C1S3	C2S3	C3S3	C4S3	C5S3
S4 > 26	C1S4	C2S4	C3S4	C4S4	C5S4

Tableau N°37: Interprétation des classes du diagramme de RIVERSIDE

Interprétation des Classes	
	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles
	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
	Eau de qualité très mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
	Eau déconseillée pour l'irrigation.

➤ **Interprétation des résultats de diagramme de Riverside :**

D'après le diagramme de Riverside, les eaux des 14 forages étudiés se répartissent principalement en deux classes :

1. Classe C4S1 : Représentée par la majorité des forages (ex. : F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F10, F13, F14...)

→ Cette classe correspond à une eau de qualité médiocre à mauvaise, à utiliser avec précaution, notamment dans les sols lourds ou pour les plantes sensibles.

→ Pour les sols légers et bien drainés, l'usage est possible avec un lessivage approprié et/ou un apport de gypse.

2. Classe C3S1 : Quelques forages appartiennent à cette classe (ex. : F8, F11, F12...)

→ Il s'agit d'une eau de qualité moyenne à médiocre, nécessitant également des précautions d'usage, comme un drainage efficace accompagné de lessivage et/ou d'un ajout de gypse.

D- Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox est un outil d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation, fondé sur l'analyse conjointe de deux paramètres principaux : le rapport d'absorption en sodium (SAR) et la conductivité électrique (CE) des ions dissous dans l'eau. Ces deux indicateurs permettent de déterminer le potentiel de dégradation des sols par accumulation de sodium et de sels dissous.

Le diagramme classe les eaux en cinq catégories qualitatives : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise. Cette classification facilite l'interprétation rapide de la qualité des eaux en fonction de leur impact probable sur les sols et les cultures, contribuant ainsi à une gestion plus rationnelle et durable de l'irrigation.

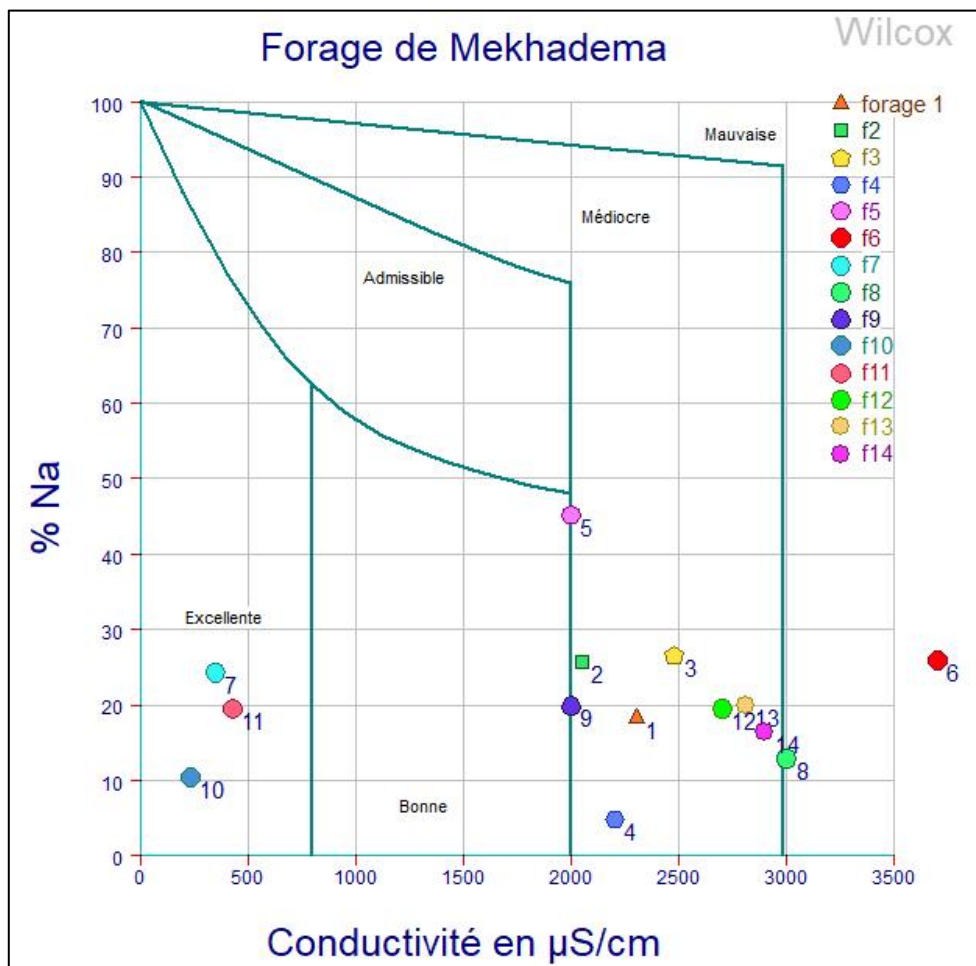


Figure N°43: Diagramme de Wilcox pour 14 forages de Mekhadema

D'après le diagramme de Wilcox, les eaux des 14 forages étudiés se répartissent en quatre classes de qualité pour l'irrigation :

- Un forage (F10) présente une eau de bonne qualité pour l'irrigation.
- Neuf forages (f1, f2, f3, f4, f7, f8, f9, f11, f13) présentent une eau de qualité admissible à médiocre.
- Trois forages (f5, f12, f14) présentent une eau de mauvaise qualité pour l'irrigation.
- Un forage (f6) se situe hors de la classification de Wilcox.

II.7 Les aptitudes des eaux d'irrigation

II.7.1 Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Le SAR (Sodium Adsorption Ratio) est un indicateur couramment utilisé en agriculture irriguée et en hydrologie pour évaluer le risque de sodicité lié à l'utilisation de l'eau d'irrigation ou à la composition chimique du sol. Il est calculé selon la formule suivante :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

où les concentrations des ions sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) sont exprimées en milliéquivalents par litre (meq/L).

Le SAR permet d'estimer la tendance de l'eau à favoriser l'accumulation de sodium échangeable dans le sol, un phénomène pouvant altérer la structure physique du sol. Des valeurs élevées de SAR sont généralement associées à un risque accru de sodicité, pouvant entraîner une dispersion des particules d'argile, une réduction de la perméabilité, une mauvaise infiltration de l'eau et, par conséquent, une baisse de la productivité agricole.

Tableau N°38: Résultats des SAR de 14 forages

ID DE FORAGE	SAR	<10	10-18	18-28	>28
1	6,6035	+			
2	18,9491		+		
3	14,3157		+		
4	0,7341	+			
5	14,7779		+		
6	12,7894		+		
7	1,4237	+			
8	0,6344	+			
9	1,0245	+			
10	2,1742	+			
11	3,0019	+			
12	8,4641	+			
13	9,5795	+			
14	7,3512	+			

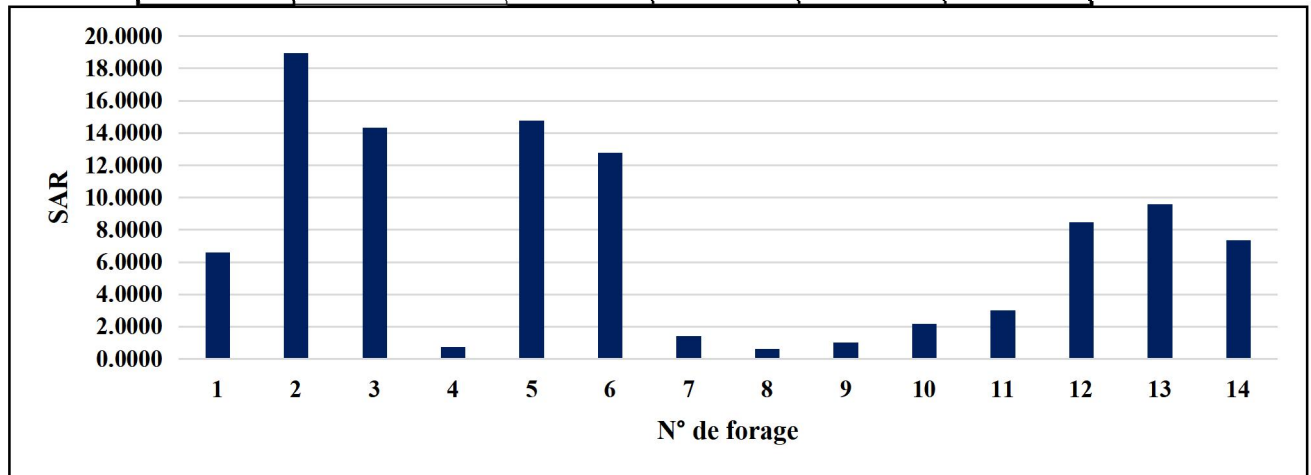


Figure N°44: Histogramme de SAR pour 14 forages.

La Figure N°46 illustrant la distribution des valeurs du Sodium Adsorption Ratio (SAR) pour les 14 forages de la région de Mekhadema révèle une variabilité notable de la sodicité des eaux souterraines.

Les valeurs les plus faibles (SAR < 10) sont observées dans plusieurs forages (tels que les N° 1, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14), indiquant une faible sodicité. Ces eaux sont adaptées à l'irrigation,

notamment sur des sols bien drainés.

Trois forages (N° 3, 5, 6) présentent des valeurs de SAR modérées (10–18), ce qui nécessite l'adoption de bonnes pratiques agricoles telles que l'amélioration du drainage et l'apport d'amendements (comme le gypse).

Un seul forage (N° 2) dépasse la valeur de 18 avec SAR = 18,95, classé comme ayant une sodicité élevée, ce qui peut affecter négativement la structure du sol.

Interprétation des résultats du SAR :

1. SAR faible (< 10) – 10 forages :

→ Forages concernés : 1, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14

► Ces eaux présentent un faible risque de sodicité et sont généralement adaptées à l'irrigation.

2. SAR modéré (10–18) – 3 forages :

→ Forages concernés : 3, 5, 6

► Ces eaux peuvent poser des problèmes dans les sols à texture fine sans gypse, surtout sans drainage adéquat.

3. SAR élevé (18–28) – 1 forage :

→ Forage concerné : 2

► L'utilisation pour l'irrigation nécessite drainage efficace, lessivage, et apports correctifs (gypse, matière organique).

4. SAR très élevé (> 28) – 0 forage

► Aucun forage n'atteint cette catégorie dans les 14 cas étudiés.

II.7.2 La teneur en sodium (Na%)

La teneur en sodium (Na%) est un paramètre utilisé pour quantifier la proportion de sodium présente dans une solution, en particulier dans l'eau d'irrigation ou dans les extraits de sol. Elle permet d'évaluer l'influence du sodium par rapport aux autres cations majeurs, notamment le calcium (Ca²⁺), le magnésium (Mg²⁺) et le potassium (K⁺).

Dans le domaine de l'analyse de la qualité de l'eau, cette teneur est exprimée en pourcentage de la somme totale des cations, fournissant ainsi une indication sur le risque potentiel de sodicité et ses effets sur la structure du sol.

La teneur en sodium est calculée selon la formule suivante :

$$Na\% = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+)} \times 100$$

Tableau N°39: Résultats des Na% de 14 forages

ID DE FORAGE	Na%	<20	20-40	40-60	60-80
1	31,0199		+		
2	35,6039		+		
3	36,0443		+		
4	8,7985	+			
5	63,2856			+	
6	30,8657		+		
7	46,3768			+	
8	27,8007		+		
9	37,1094		+		
10	22,0708		+		
11	38,0783		+		
12	24,4361		+		
13	26,0498		+		
14	20,5742		+		

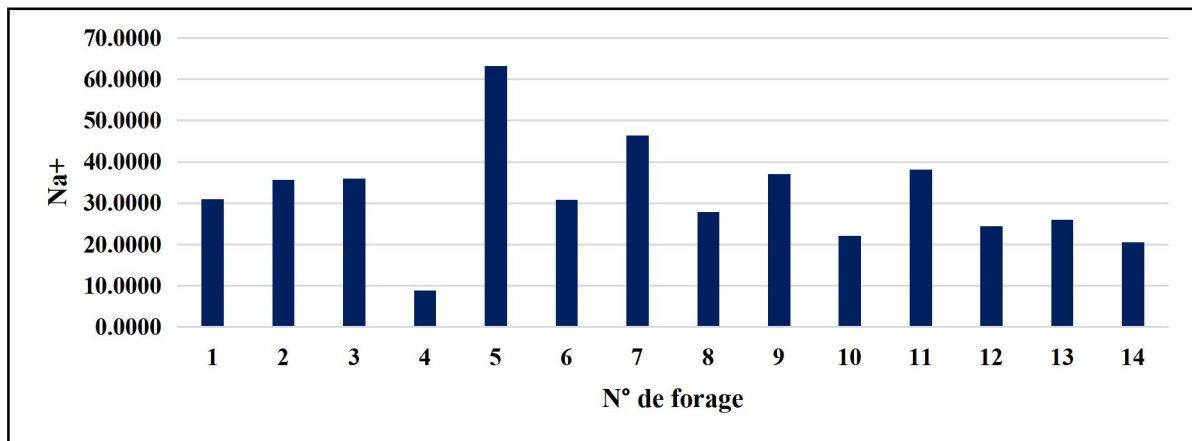


Figure N°45: Histogramme des Na% de 14 forages.

-Interprétation des résultats des Na% :

- L'analyse du Na% dans les eaux souterraines de 14 forages dans la région de Mekhadema a montré une variabilité modérée de la qualité d'eau pour l'irrigation :
- Un seul forage (n° 4) présente un Na% < 20 %, ce qui indique une excellente qualité pour l'irrigation.
- Neuf forages (n° 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 13) présentent un Na% entre 20 et 40 %, ce qui correspond à une bonne qualité pour l'irrigation, adaptée à la plupart des sols.
- Deux forages (n° 5 et 7) ont un Na% entre 40 et 60 %, ce qui reflète une qualité admissible, nécessitant plus d'attention dans les sols argileux ou mal drainés.

- Aucun forage n'a dépassé le seuil critique de 60 %, ce qui signifie qu'aucune eau fortement sodique n'a été détectée dans cet échantillon.

II.7.3 L'indice de perméabilité (PI)

L'indice de perméabilité (IP) est un paramètre complémentaire utilisé pour évaluer l'aptitude des eaux naturelles à l'irrigation. Proposé par Doneen en 1964, cet indice permet d'estimer l'effet potentiel de la qualité de l'eau sur les propriétés physiques du sol, en particulier sa perméabilité. En effet, l'usage prolongé d'eaux d'irrigation de mauvaise qualité peut entraîner une dégradation de la structure du sol, affectant ainsi sa capacité à absorber et à retenir l'eau. Cet indice tient compte de plusieurs facteurs chimiques tels que la concentration en sodium (Na^+), en bicarbonates (HCO_3^-), en calcium (Ca^{2+}) et en magnésium (Mg^{2+}). Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$PI = \frac{(Na^+ + Ca^{2+})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100$$

Tableau N°40: Résultats des PI de 14 forages

ID DE FORAGE	PI	<25	25-75	>75
1	13,8830	+		
2	35,0383		+	
3	34,3895		+	
4	4,6494	+		
5	25,5229		+	
6	32,0277		+	
7	11,2233	+		
8	9,2238	+		
9	9,3610	+		
10	16,1380	+		
11	20,9907	+		
12	24,9709	+		
13	27,5121		+	
14	25,4711		+	

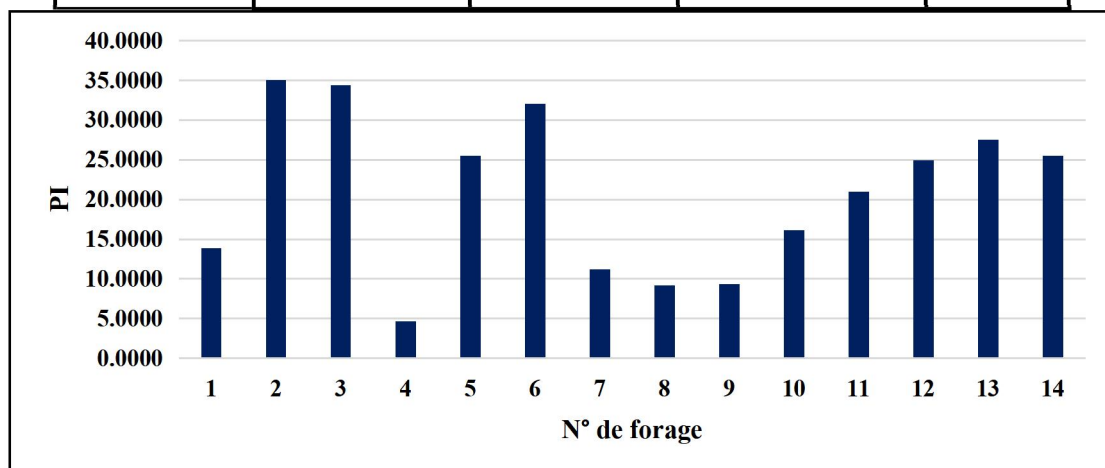


Figure N°46: Histogramme des PI de 14 forages.

Interprétation des résultats des PI :

- 08 forages présentent un PI inférieur à 25, ce qui peut indiquer un risque potentiel de diminution de perméabilité du sol lors d'une irrigation prolongée (forages : 1, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12).
- 06 forages ont un PI compris entre 25 et 75, indiquant une qualité modérée à acceptable pour l'irrigation (forages : 2, 3, 5, 6, 13, 14).
- Aucun forage n'a un PI supérieur à 75, ce qui signifie l'absence d'eaux de très haute qualité selon cet indicateur.

II.7.4 Le ratio de danger du magnésium (MHR)

Le MHR (Magnésium Hazard Ratio) est un indicateur utilisé en agronomie pour évaluer le risque potentiel associé à la présence de magnésium dans les eaux d'irrigation. Ce ratio est particulièrement important, car une teneur excessive en magnésium par rapport au calcium peut altérer la structure du sol et réduire sa perméabilité, affectant ainsi la croissance des plantes.

Le MHR se calcule selon l'équation suivante :

$$MHR = \frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+} + Ca^{2+}} \times 100$$

Tableau N°41: Résultats des MHR de 24 forages

ID DE FORAGE	MHR	<50	>50
1	48,6714	+	
2	56,7395		+
3	48,4758	+	
4	31,9361	+	
5	55,4763		+
6	15,8985	+	
7	70,2703		+
8	59,3730		+
9	43,4783	+	
10	82,5175		+
11	83,9080		+
12	18,9055	+	
13	32,6735	+	
14	14,8594	+	

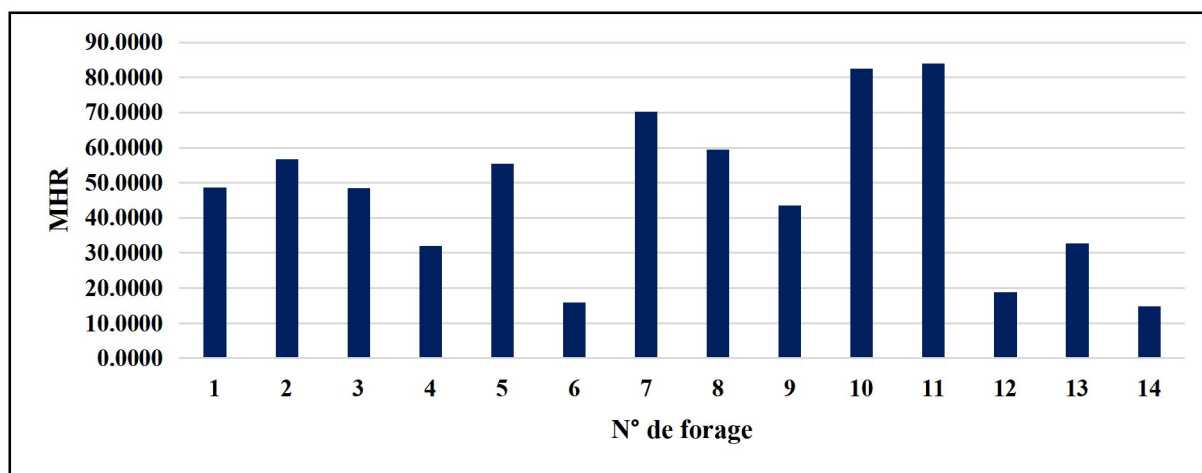


Figure N°47: Histogramme des MHR de 14 forages.

Interprétation des résultats de MHR :

- A majorité des forages (10 sur 14, soit environ 71,4 %) ont des valeurs de MHR inférieures à 50, indiquant un faible risque de sodicité et donc une bonne aptitude à l'irrigation.
- Quatre forages (f2, f5, f7, f8, f10, f11) présentent des valeurs de MHR supérieures à 50, suggérant un risque potentiel pour la structure des sols si cette eau est utilisée régulièrement sans précaution.

II.8 Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP a été réalisée sur les données de 24 forages (hors n°5, 25, 26, 28, 29) afin de réduire la dimensionnalité et d'identifier les principales sources de variabilité géochimique. Les 11 variables analysées incluent des paramètres physico-chimiques (T°C, pH, CE) et des ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-). Deux composantes principales, F1 (38,79 %) et F2 (17,99 %), expliquent ensemble 56,78 % de la variance totale, ce qui permet une interprétation fiable des processus dominants.

Tableau N°42: Variance totale expliquée

Facteur de la charge	Valeur propre	Variabilité (%)	Cumulé (%)
1	4,267	38,788	38,788
2	1,979	17,987	56,776
3	1,675	15,225	72,001
4	1,338	12,167	84,167
5	0,735	6,679	90,846
6	0,488	4,44	95,286
7	0,314	2,854	98,14
8	0,151	1,376	99,516
9	0,042	0,385	99,901
10	0,009	0,079	99,98
11	0,002	0,02	100

Nous apporterons une attention importante aux variables ayant une forte contribution positive ou négative à l'axe factoriel, ce qui facilitera la compréhension de la source de variabilité expliquée par les axes (Tableau N° 40).

Tableau N°43: Contributions des variables

Paramètres	Coefficients de F1	Coefficients de F2
pH	0,021	31,512
CE	0,671	4,666
Ca	10,150	4,841
Mg	13,433	1,230
Na	0,437	21,584
K	18,282	6,117
HCO ₃	5,170	7,991
SO ₄	9,995	2,517
Cl	12,652	7,935
NO ₃	16,238	8,893

1. Composante F1 (38,79 % de la variance)

- Minéralisation globale

Variables influentes positives : CE, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻

Variables influentes négatives : HCO₃⁻, NO₃⁻

Interprétation :

F1 oppose deux types d'eau :

Pôle positif : Eaux fortement minéralisées, riches en sels (Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻), probablement issues de la dissolution de gypse ou influencées par des intrusions marines.

Pôle négatif : Eaux bicarbonatées, plus douces, issues de l'altération des roches carbonatées.

La présence de NO₃⁻ suggère des apports anthropiques (activités agricoles).

2. Composante F2 (17,99 % de la variance)

- Processus géochimiques locaux

Variables influentes positives : Mg²⁺, SO₄²⁻

Variables influentes négatives : pH, K⁺

Interprétation :

Pôle positif : Indique une dissolution de formations sulfatées (gypse) ou des influences industrielles/agricoles.

Pôle négatif : Reflète des eaux plus acides, pauvres en K⁺, possiblement liées à l'oxydation de matière organique ou à des rejets anthropiques.

Conclusion : La composante F2 représente un gradient géochimique spécifique, opposant des eaux sulfatées/magnésiennes à des eaux acides et appauvries en potassium.

Projection des variables sur le plan factoriel (Figure N°50) :

La figure N°50, appuyée par les coefficients du Tableau N°43, met en évidence les tendances suivantes :

- Les variables CE, Na⁺, Cl⁻ et SO₄²⁻ sont fortement corrélées positivement à F1, traduisant une minéralisation élevée des eaux.
- À l'inverse, HCO₃⁻ et NO₃⁻ se situent dans le quadrant négatif de F1, illustrant une opposition aux eaux salines, typique des eaux bicarbonatées influencées par des processus naturels ou des apports anthropiques.
- Le quadrant positif de F2 est dominé par Mg²⁺ et SO₄²⁻, indiquant un enrichissement en ions sulfatés et magnésiens, possiblement lié à la dissolution de formations géologiques gypseuses.
- En revanche, pH et K⁺ s'alignent sur le quadrant négatif de F2, suggérant des eaux plus acides et moins riches en potassium.

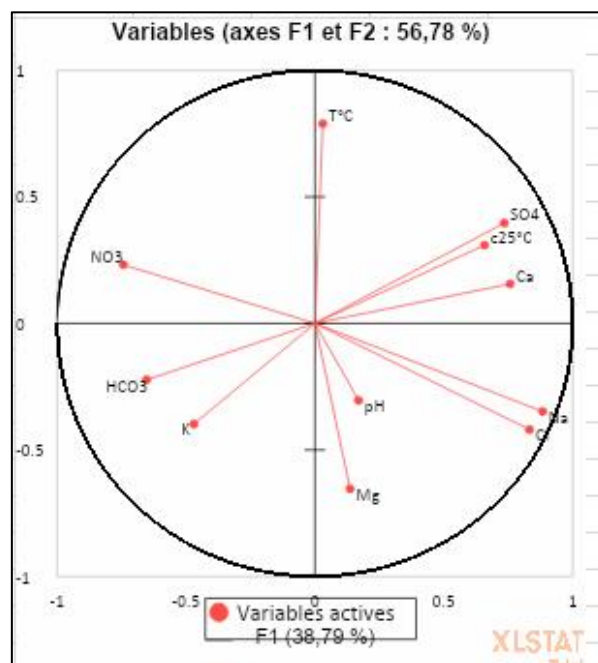


Figure N°48: Projection des variables sur le premier plan factoriel.

L'analyse en composantes principales (ACP) met en évidence deux processus géochimiques majeurs :

- F1 (Minéralisation globale) : traduit une opposition entre les eaux salines/sulfatées, riches en Na⁺, Cl⁻ et SO₄²⁻, et les eaux bicarbonatées, dominées par HCO₃⁻ et NO₃⁻.
- F2 (Processus locaux) : reflète la dissolution du gypse (présence de Mg²⁺ et SO₄²⁻) et des phénomènes d'acidification, associés à une baisse du pH et à une faible teneur en K⁺.

Ces résultats sont en accord avec les travaux de Subba Rao et al. (2012) et Yang et al. (2016), et mettent en évidence le rôle des interactions eau-roche et des influences anthropiques dans la détermination de la qualité hydrochimique des eaux.

II.9 Conclusion

L'évaluation physico-chimique des eaux souterraines issues de 14 forages dans la région de Mekhadema a révélé une forte minéralisation, avec des concentrations élevées en ions chlorures, sulfates, calcium et magnésium, dépassant souvent les normes algériennes (JORA 2014) et celles de l'OMS (2011).

L'indice de qualité de l'eau (IQE) a classé la majorité des échantillons comme étant de très mauvaise qualité, impropres à la consommation humaine sans traitement préalable. Concernant l'aptitude à l'irrigation, les eaux se situent principalement dans les classes C3S1 à C4S1, reflétant une salinité élevée et une qualité moyenne à médiocre pour l'agriculture, nécessitant des pratiques de lessivage et l'apport de gypse, notamment dans les sols peu perméables.

L'analyse en composantes principales (ACP) effectuée sur les données des 14 forages a permis de mettre en évidence deux axes principaux expliquant 56,78 % de la variance totale :

- F1 (38,79 %) traduit la minéralisation globale. Il est positivement corrélé à la conductivité électrique (CE), aux ions Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} et Cl^- , et négativement à HCO_3^- et NO_3^- , ce qui met en évidence une opposition entre les eaux salines fortement minéralisées et les eaux bicarbonatées plus douces.
- F2 (17,99 %) représente des processus géochimiques locaux, avec une contribution positive de Mg^{2+} et SO_4^{2-} , et négative de pH et K^+ . Cela traduit une influence probable de la dissolution du gypse et d'apports anthropiques, comme les effluents agricoles.

En somme, la qualité des eaux souterraines de Mekhadema est jugée médiocre à mauvaise, tant pour l'usage domestique que pour l'irrigation, et nécessite une gestion intégrée, un traitement approprié, et un suivi continu pour garantir une exploitation durable.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'étude hydrochimique menée sur les eaux souterraines de la région de Mekhadema (wilaya de Biskra), à partir de 14 forages, a permis d'évaluer leur qualité en vue d'une utilisation pour la consommation humaine et l'irrigation agricole. Les résultats ont mis en évidence une forte minéralisation, avec la prédominance des ions chlorures, sulfates, calcium et magnésium, dépassant dans plusieurs cas les normes de potabilité fixées par la JORA (2014) et l'OMS (2011).

L'indice de qualité de l'eau (WQI) appliqué aux 14 forages révèle que la majorité des échantillons sont classés comme étant de très mauvaise qualité, nécessitant un traitement préalable avant toute consommation humaine.

Concernant l'irrigation, l'interprétation des résultats selon les diagrammes de Riverside, Piper, et Wilcox montre que les eaux se répartissent entre les classes C3S1 et C4S1, indiquant une qualité moyenne à médiocre, et nécessitant des mesures correctives telles que le lessivage périodique et l'ajout de gypse, en particulier dans les sols à faible perméabilité.

Les indices complémentaires confirment cette tendance :

- SAR : la majorité des forages présentent un risque modéré à élever de sodicité.
- Na% : les résultats indiquent une qualité variant de bonne à admissible.
- PI : la plupart des forages se trouvent dans la classe moyenne, avec quelques cas inférieurs à 25.
- MHR : un seul forage dépasse le seuil critique de 50 %, les autres ne posant pas de risque significatif.

L'analyse en composantes principales (ACP) a révélé deux axes majeurs :

- F1 (38,79 %) traduit la minéralisation globale, avec une forte corrélation entre CE, Na⁺, Cl⁻ et Ca²⁺.
- F2 (17,99 %) met en évidence les effets de la dissolution du gypse et des apports anthropiques tels que les engrais et eaux usées.

En conclusion, les eaux souterraines de Mekhadema présentent une qualité globalement médiocre à mauvaise, impropre à la consommation humaine sans traitement, et limitée pour l'irrigation sans interventions techniques adaptées. Ces résultats appellent à la mise en place de stratégies de gestion durable, comprenant un suivi régulier, un traitement ciblé, et l'adaptation des cultures aux conditions de salinité.

Références Bibliographiques

➤ Ouvrages et Articles :

1. ANAT, Agence Nationale d'Aménagement de territoire, Algérie., 2003 - Schéma directeur des ressources en eau. Wilaya de Biskra.
2. ABHS, (2018). Réseau hydrographique de la wilaya de Biskra.
3. A.N.R.H, (1996). *Étude des grandes unités hydrogéologiques du Sahara Septentrional.*
4. ANRH (2011). *Les bassins versants de l'Algérie.*
5. Agence Régionale de Santé d'Auvergne, (2014). *La qualité de l'eau destinée à la consommation humaine en Auvergne.*
6. Ahcène, S.; Bachir, H.; Bourafai, S. (2021). *Hydrochemical Characteristics of Aquifers and Their Predicted Impact on Soil Properties in Biskra Region, Algeria.*
7. Abdel-Fattah, M.K., Mokhtar, A. & Abdo, A.I. (2021). *Application of neural network and time series modeling to study the suitability of drain water quality for irrigation: a case study from Egypt.*
8. Akhtar et al. (2021). *Biochars' adsorption performance towards moxifloxacin and ofloxacin in aqueous solution.*
9. Adhikary P, et al. (2010). *Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach.*
10. Awad et al. (2022). *Performance Evaluation of Solar-Powered Atmospheric Water Harvesting Using Different Glazing Materials.*
11. Balamurugan.P (2020). *Groundwater parameter on human health and irrigation indices in semi-arid India.*
12. Batarseh et al. (2021). *Groundwater quality for irrigation using IWQI and GIS.*
13. Belghitim. C. B (2013). *Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines à Meknès (Maroc).*
14. Belhadi A. et al. (2016). *Apport de la plasticulture à la dynamique agricole de la région de Ziban (Biskra).*
15. Bagnouls F. & Gaussen H. (1953). *Saison sèche et indice xérothermique.*
16. Boutouga F. (2012). *Ressources et gestion des eaux dans le Zeb Est de Biskra.*
17. Bouchemal F. (2017). *Diagnostic de la qualité des eaux souterraines à Biskra.*
18. Bradai et al. (2022). *Groundwater Irrigation Sustainance in the Middle Cheliff Plain.*
19. Boukhari M. (2008). *Juste prix de l'eau potable pour une gestion durable des ressources.*
20. Chebbah M. (2007). *Lithostratigraphie et sédimentologie de la région de Biskra.*
21. Chadha D.K. (1999). *A new diagram for geochemical classification of natural waters.*

22. Chelli L., Djouhri N. (2013). *Analyse des eaux de Béjaia et évaluation de leur pouvoir entartrant.*
23. Cosandey C., et al. (2003). *Les eaux courantes: Géographie et environnement.*
24. Dajoz R. (1971). *Précis d'écologie.*
25. DPSB (2022). *Monographie de la wilaya de Biskra.*
26. Degremont (2005). *Mémento technique de l'eau.*
27. Dubost D. (2002). *Les oasis du sud-est algérien.*
28. Doneen L.D. (1964). *Notes on water quality in agriculture.*
29. Djellouli Y. (1990). *Flores et climats en Algérie.*
30. Guergazi S., Achour B. (2005). *Étude de la qualité de l'eau souterraine à Biskra.*
31. Guertzou B. (2008). *Étude de la potabilité des eaux souterraines de Djelfa.*
32. Manahan S.E. (2005). *Environmental Chemistry.*
33. Rodier J. (2009). *L'analyse de l'eau.*
34. Todd D.K. (2001). *Groundwater Hydrology.*
35. Wilcox L.V. (1955). *Classification and use of irrigation waters.*
36. Walton W.C. (1970). *Groundwater Resource Evaluation.*
37. Verhille S. (2013). *Les indicateurs microbiens dans l'évaluation de l'eau potable.*
38. Savary P. (2010). *Guide des analyses de la qualité de l'eau.*
39. OMS (2011). *Directives de qualité pour l'eau potable.*
40. OMS (2017). *Directives de qualité pour l'eau potable.*
41. ONU (2006). *Eau, assainissement et développement durable.*
42. Piper A.M. (1944). *Graphical interpretation of water analysis.*
43. Richards L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.*
44. Saleh A., Al-Ruwaih F., Shehata M. (1999). *Hydrogeochemical Processes in Kuwait.*
45. Salifu M. et al. (2017). *Suitability of groundwater for irrigation in Ghana.*
46. Mediouni K. (1997). *Organisation et biodiversité algérienne.*
47. Morales F.J. et al. (1996). *Maillard reaction and food chemistry.*
48. Nagaraju et al. (2014). *Groundwater near mining area in India.*
49. Adimalla N., Qian H. (2019). *Groundwater quality index and health risk assessment.*
50. Subba Rao N. et al. (2012). *Geochemistry and health risk in Andhra Pradesh.*
51. Gugulothu et al. (2022). *Groundwater salinity in Andhra Pradesh, India.*
52. Hem J.D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water.*
53. Houillier P., Blanchard A., Paillard M. (2004). *Métabolisme du potassium.*
54. Halitim A. (1989). *Sols des régions arides d'Algérie.*
55. Halilet M.T. (1998). *Étude expérimentale du sable avec argile compactée.*

56. Harrat & Achour (2010). *Pollution des eaux de barrage.*
57. Giacobbe A. (1961). *Recherches écologiques sur l'aridité en Afrique du Nord.*
58. Gousskov H. (1964). *Carte géologique de Biskra.*
59. Gouaidia L. (2008). *Influence de la lithologie sur les eaux souterraines.*
60. Geological Survey. *Water-Supply Paper 2254.*
61. SCI, Environnement Canada. (2006). *Système canadien d'information sur l'eau.*
62. Tardath & Beaudry (1984). *Chimie des eaux.*
63. Stewart P. (1968). *Quotient pluvio-thermique et dégradation biosphérique.*
64. Jean-Louis Ballais (2010). *Hydrographie et piémont de l'atlas saharien.*
65. Chebbah A. (2007). *Log litho-stratigraphique synthétique.*
66. Durand M. (1958). *Carte pédologique de Biskra.*
67. Jean-Louis B. (2010). *Carte géomorphologique du Bas-Sahara.*
68. A.B.H.S. (2018). *Carte du réseau hydrographique de Biskra.*
69. ANAT (2003). *Esquisse géologique de la région de Biskra.*
70. ANRH (2011). *Répartition des points d'eau.*
71. ANRH (1980). *Carte piézométrique de la nappe du Quaternaire.*
72. A.N.R.H. (1996). *Carte piézométrique de la nappe des sables.*
73. Québec, Gouvernement (2003). *Fiches santé et eau potable.*
74. Hill M. (2004). *Understanding Environmental Pollution.*
75. Myrand P. (2008). *Techniques de captage d'eau souterraine.*
76. Kawagoshi Y. et al. (2016). *Anaerobic bacteria in saline wastewater.*
77. AGW-Net et al. (2006). *Manuel de gestion des eaux souterraines en Afrique.*
78. Yang W. et al. (2016). *Hydrochemical characteristics in Ordos, China.*
79. Giacobbe (1961). *Étude sur la zone aride d'Afrique du Nord.*
80. Weyer P.J. et al. (2001). *Nitrate in drinking water and cancer risk.*
81. Ballais J-L. (2010). *Les piémonts de l'Atlas saharien.*
82. Kelly W.P. (1940). *Permissible limits for saline irrigation waters.*
83. Paliwal K.V. (1967). *Irrigation with saline water.*
84. Stewart P. (1968). *Indices climatiques appliqués à l'environnement.*
85. SCI (2006). *Environnement Canada – SCI en ligne.*
86. Wilcox L V (1955). Classification and use of irrigation waters, vol 969. U.S. Department of Agriculture Circular, Washington, DC, 19 p.
87. WEYER, P. J., CERHAN, J. R., KROSS, B. C., HALLBERG, G. R., KANTAMNENI, J., BREUER, G., ... & LYNCH, C. F., 2001: Municipal drinking water nitrate level and cancer risk in older women: the Iowa Women's Health Study. *Epidemiology*, 12(3), 327-338.

88. Zakir et al., (2020). Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: a case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh
89. Reghis, B. (2024). Évaluation de la qualité des eaux souterraines à l'aide de l'indice de qualité de l'eau (WQI) et d'une analyse statistique multivariée. Cas de la région de Lioua
90. Ben Alia, (2018). Diagnostic agricole de la région d'El Ghrous (Wilaya de Biskra)
91. Malki, L., & Lahreche, I. (2022). Inventaire des maladies fongiques du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) de la région de Biskra, cas de «Bordj ben azzouz, El ghrous et Lioua
92. Naili, A., & Menidjele, Y. (2024). La Qualité physico-chimique des eaux utilisée dans les industries agro-alimentaires alimentaires (cas wilaya de Guelma)
93. Naouri, M., Hartani, T., & Kuper, M. (2015). "Mobilités des jeunes ruraux pour intégrer les nouvelles agricultures sahariennes (Biskra, Algérie)". *Cahiers Agricultures*, 24(6), 379–386. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0778>
94. Services aux Autochtones Canada (SAC). (s.d.). *Qualité de l'eau potable dans les communautés des Premières Nations*. Consulté le [2025], à l'adresse : <https://www.sac-isc.gc.ca/fra/1398369474357/1533667689697>
95. Eaufrance. (s.d.). Les eaux souterraines, des systèmes dynamiques. Consulté en juin 2025, à l'adresse : <https://www.eaufrance.fr/les-eaux-souterraines-des-systemes-dynamiques>
96. Marquita, K. H. (2004). *Environmental Science: Systems and Solutions*. Jones & Bartlett Learning.
97. Services aux Autochtones Canada (SAC). (s.d.). *Qualité de l'eau potable dans les communautés des Premières Nations*. Consulté le [2025], à l'adresse : <https://www.sac-isc.gc.ca/fra/1398369474357/1533667689697>
- Site internet consulté :
- 1- (<https://fr.oceancampus.eu/cours/7Mc/la-pollution-de-leau>)
 - 2- http://wilayabiskra.dz/?page_id=1673
- **Logiciels utilisés :**
- 1- EXCEL 2016
 - 2- DIAGRAMME : Version 8.44 (Roland SIMLER Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)
 - 3- XLSTAT 2025
 - 4- MAP
- **Cartes utilisées :**
- 1- Situation géographique de la commune de Mekhadema
 - 2- Carte pédologique de la région de Biskra (Durant, 1958).
 - 3- Carte du piémont de l'atlas saharien (Jean-Louis, B 2010)

- 4- Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra (A.B.H.S, 2018).
- 5- Esquisse géologique de la région de Biskra (ANAT, 2003).
- 6- Log litho-stratigraphique synthétique de la région de Biskra (CHEBBAH, 2007)
- 7- Répartition des points d'eau dans la wilaya de Biskra (ANRH, 2011).
- 8- Carte piézométrique de la nappe du quaternaire de Biskra (ANRH, 1980).
- 9- Carte piézométrique de la nappe des sables de Biskra (A.N.R.H., 1996)