

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : TECHNOLOGIE

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : Hydraulique Urbaine

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : BEN SELHOUB Aymen

BOUTERAA Abdelatif

Intitulé

*Caractérisation hydrochimique
et classification de la qualité des eaux
souterraines de la région Maadher –Boussaâda–
à l'aide des indices de qualité de l'eau*

Soutenu devant le jury composé de :

Dougha Mostefa

Université de M'sila

Président

Ghodbane Messaoud

Université de M'sila

Encadreur

Adjissi Omar

Université de M'sila

Co-Encadreur

Temim Djamel

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre professeur encadrant **M. GHODBANE Messaoud**, pour son accompagnement attentif, ses conseils éclairés et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Ses orientations pertinentes ont joué un rôle déterminant dans l'enrichissement de nos connaissances et le renforcement de nos compétences dans ce domaine.*

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble de nos enseignants qui ont jalonné notre parcours de formation par leur savoir et leur dévouement. Nous exprimons notre gratitude à nos familles et à nos amis pour leur soutien constant, leur encouragement et leur présence bienveillante. Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes, de près ou de loin, ayant contribué à notre formation et à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

À mes chers parents,

*Qui ne m'ont jamais ménagé leur soutien, leurs
sacrifices et leur amour inconditionnel.*

*À ceux qui ont toujours été mon pilier et ma source de
force, je dédie ce travail avec toute ma gratitude.*

À ma chère famille,

*Merci d'avoir toujours été à mes côtés et d'avoir cru en
moi.*

À mes amis,

*Je vous dédie ce travail en signe de fidélité et de
reconnaissance, pour votre soutien et vos
encouragements à chaque étape.*

*À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenu,
Cette réussite est le fruit de votre présence dans ma vie.*

Dédicace

À mes chers parents,

*Pour votre amour inépuisable, vos sacrifices silencieux et
votre soutien constant. Ce travail est le fruit de votre
présence à mes côtés.*

À mes sœurs bien-aimées,

*Pour votre tendresse, vos encouragements, et les sourires
que vous m'avez toujours offerts, même dans les moments
les plus difficiles. Vous êtes ma force silencieuse.*

À ma famille et à mes amis,

*Merci pour votre appui, votre patience et votre foi en moi
tout au long de ce parcours.*

*À toutes les personnes qui m'ont soutenu, de près ou de
loin,*

*Recevez à travers ce mémoire l'expression de ma profonde
reconnaissance.*

الملخص

يتناول هذا البحث دراسة نوعية المياه الجوفية في منطقة المعذر (ولاية المسيلة)، ويهدف إلى تحديد خصائصها الهيدروكيميائية وتصنيف مدى صلاحيتها للاستعمال في السقي والشرب، وذلك في ظل ظروف مناخية شبه جافة تعتمد فيها المنطقة بشكل كبير على المياه الجوفية كمصدر أساسي. اعتمدت الدراسة على تحاليل فيزيائية وكيميائية مخبرية، ورسوم بيانية (بايير، شوالر)، وتحليل إحصائي (ACP)، بالإضافة إلى مؤشرات نوعية المياه (WQI، SAR، Wilcox، NPI)، باستخدام برامج مثل ArcGIS و XLstat و Piper، أظهرت النتائج أن أغلب العينات المدروسة تتميز بملوحة مرتفعة وتوصيلية كهربائية عالية ودرجة صلابة كلية كبيرة، مع طابع كيميائي سائد من نوع كلوريد صوديوم. كما بين مؤشر WQI أن 60% من العينات تتراوح نوعيتها بين المتوسطة والرديئة للاستهلاك البشري، في حين أظهرت مؤشرات صلاحية المياه للسقي أن معظم العينات مقبولة إلى هامشية، مع خطر متزايد في المناطق ذات الملوحة المرتفعة. أما مؤشر تلوث النترات (NPI) فقد كشف عن وجود تلوث متوسط إلى مرتفع في عدة مواقع نتيجة الاستخدام المفرط للأسمدة الفلاحية. وتخلص الدراسة إلى ضرورة وضع استراتيجية لتسيير مستدام لهذه الموارد ومتابعة دورية للحد من المخاطر البيئية والصحية.

الكلمات المفتاحية:

المياه الجوفية، التحليل الهيدروكيميائية والإحصائي (ACP)، مؤشر نوعية المياه (WQI)، التلوث بالنترات، منطقة المعذر، المسيلة.

Résumé :

Le présent mémoire, réalisé dans la région d'El-Maadher (M'sila), vise à caractériser la qualité hydrochimique des eaux souterraines et à les classer selon leur aptitude à l'irrigation et à la consommation humaine, dans un contexte semi-aride marqué par une forte dépendance à cette ressource. L'étude repose sur des analyses physico-chimiques en laboratoire, des représentations graphiques (Piper, Schoeller), une analyse statistique (ACP) et des indices de qualité (WQI, SAR, Wilcox, NPI), avec l'appui de logiciels comme ArcGIS et XLstat Diagramme «Piper. Les résultats ont révélé que la majorité des eaux sont fortement minéralisées avec une conductivité élevée, une dureté totale importante et un faciès chimique dominant de type chloruré-sodique. L'indice WQI a montré que 73.33 % des échantillons sont de qualité moyenne à mauvaise pour la consommation humaine, tandis que les indices d'irrigation ont classé la plupart des eaux comme acceptables à marginales, avec un risque accru dans les zones à forte salinité. Le NPI a mis en évidence une pollution par les nitrates dans plusieurs sites, liée aux pratiques agricoles intensives. L'étude conclut à la nécessité d'une gestion durable et d'un suivi régulier de la ressource pour limiter les risques environnementaux et sanitaires.

Mots clés

Eaux souterraines, Analyse hydrochimique et statistique (ACP), Indice de qualité de l'eau (WQI), Pollution par les nitrates, région d'El-Maadher, M'Sila.

Abstract:

This thesis, conducted in the El-Maadher region (M'sila), aims to characterize the hydrochemical quality of groundwater and classify it according to its suitability for irrigation and human consumption, in a semi-arid context marked by heavy dependence on this resource. The study is based on laboratory physicochemical analyses, graphical representations (Piper, Schoeller), statistical analysis (PCA), and quality indices (WQI, SAR, Wilcox, NPI), supported by software such as ArcGIS and XLstat Diagram 'Piper. The results revealed that the majority of the waters are highly mineralized with high conductivity, significant total hardness, and a predominantly sodium-chloride chemical facies. The WQI index showed that 73.33% of the samples were of average to poor quality for human consumption, while the irrigation indices classified most of the waters as acceptable to marginal, with an increased risk in areas with high salinity. The NPI identified nitrate pollution at several sites, linked to intensive agricultural practices. The study concluded that sustainable management and regular monitoring of the resource are necessary to limit environmental and health risks.

Keywords

Groundwater, Hydrochemical and Statistical Analysis (ACP), Water Quality Index (WQI), Nitrate Pollution, El-Maadher region, M'Sila.

Table des matières

Introduction générale.....	4
Chapitre I Présentation géographique et conditions naturelles de la zone d'étude	6
I.1.Introduction.....	6
I.2 Aperçu géographique.....	6
I.2.1 Localisation géographique	6
I.2.2. Habitats et activités.....	7
I.2.3. Végétation.....	8
I.2.4. Types de Sol de la région d'étude	9
I.2.5. Relief	10
I.2.6. Ressources en eau.....	11
I.3. Hydrologie de la région	11
I.3.1. Réseau hydrographique de la zone d'étude.....	11
I.3.2. Climat	12
I.3.3. Les précipitations.....	12
I.3.4. Température :.....	13
I.3.5. Evapotranspiration potentielle (ETP) :.....	14
I.3.6. Les vents dominants.....	15
I.4. Caractéristiques morphométriques et physiques du Sous B.V de El-Maadher.....	16
I.4.1. Délimitation de la zone étudiée Dans le Sous B.V de El-Maadher.....	16
I.4.2 Surface	17
I.4.3. Périmètre	17
I.4.4. Indice de compacité de Gravelius.....	18
I.4.5. Courbe hypsométrique	19
I.4.6. Rectangle équivalent.....	21
I.4.6 Les indices de pente	21
I.4.7. Pente moyenne	22
I.4.8. Longueur du cours d'eau principal :.....	23
I.5. Les caractéristiques du réseau hydrographique :	23
I.5.1. Densité de drainage :	23
I.5.2. Dénivelée spécifique (DS)	24
I.5.3. Temps de concentration (Tc) :.....	24
I.5.4. Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc) :.....	24
I.5.5. Réseau hydrographique :.....	25
I.5.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du sous B.V de la zone d'étude	25
I.6. Conclusion	26

Chapitre II Aperçu géologique et hydrogéologique	28
II.1. Aperçu géologique.....	28
II.1.1.Cadre géologique générale.....	28
II.1.2. Géologie de la région d'étude.....	29
II.1.3. Géomorphologie du bassin.....	31
II.1.4.Stratigraphie.....	Erreur ! Signet non défini.
1.1.4.1.Le Secondaire....	32
1.1.4.2.Tertiaire	32
II.5.1. Identification des formations aquifères.....	33
II.2- Aperçu hydrogéologique	34
II.2.2.Etude de la piézométrie	35
II.2.2.2. Interprétation des cartes piézométriques.....	36
II.3-Conclusion	37
chapitre III caractérisation hydrochimique et classification de la qualité des eaux	
III-1. Introduction.....	40
III.2. Fiabilité des résultats des échantillons mesurés au laboratoire	41
III-3. Analyse hydrochimique générale des données	41
III.3.1. Le Potentiel d'hydrogène (pH) :	42
III-3. 2. La conductivité électrique (CE) :	43
III-3. 3. La dureté totale (TH) :	44
III.3.4. Le Calcium (Ca ⁺⁺) :	44
III.3.5. Le magnésium Mg ²⁺	45
III.3.6. Le sodium Na ⁺ :	46
III.3.7. Le potassium K ⁺ :	46
III.3.8. Les chlorure Cl ⁻ :	47
III.3.9 Les sulfate SO ₄ ²⁻ :	48
III.3.10 Les bicarbonates HCO ₃ ⁻ :	48
III.3.11 . Les nitrates NO ₃ ⁻ :	49
III-4. Faciès chimiques des eaux souterraines de la zone Maadher :	50
III-4.1. Diagramme de Piper.....	50
III-4.2. Diagramme de Schoeller – Berkloff :	51
III.5. Interaction eau-roche et processus hydrochimique	Erreur ! Signet non défini.
II.6. Niveaux de saturation minérale	55
III.6.1. Indice de saturation et équilibres chimiques	55
III.6.1. Variation de l'indice de saturation des minéraux dissous :	56
III. 7. Analyses de la qualité des eaux par la méthode statistique (ACP).....	57
III.7.1. Application de l'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude :	58

III.7.1.1. Corrélation des paramètres physico-chimiques :	58
III.7.1.2. Etude des liaisons significatives entre les éléments physico-chimiques.....	60
III.7.1.3. Corrélation entre les variables et les facteurs (Composantes)	61
III .8. Evaluation de la qualité d'eau par les Indices de qualité	63
III .8.1. Indices d'évaluation d'aptitude des eaux à l'irrigation :.....	63
III .8.2. Indice d'évaluation de la qualité de l'eau pour la consommation (WQI) :.....	69
III .8.2.1. Principe et méthode	69
III .8.2.2. Classification de la qualité des eaux souterraines de la région Maadher par (WQI)71	
III .9.Indice de pollution par les nitrates (NPI) :	77
Conclusion :.....	79
Conclusion générale.....	82
Références bibliographiques.....	89

Liste des figures

Chapitre I Présentation géographique et conditions naturelles de la zone d'étude		
Figure.1	Présentation géographique de la zone d'étude	07
Figure.2	Photos de plusieurs terres traitées par les Déchets animaux	08
Figure.3	Carte pédologique du Hodna (Boyadgifv 1975)	10
Figure.4	Carte 3D indiquant les principaux reliefs de la région d'étude	11
Figure.5	Précipitation moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018)	12
Figure.6	Température moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018).	14
Figure.7	Evapotranspiration de la région de El-Maadher, période (2009-2018)	15
Figure.8	Vitesse du vent moyenne mensuelle dans la station de El-Maadher, période (2009-2018).	16
Figure.9	Zone d'étude par satellite	16
Figure.10	Carte du sous bassin versant étudié	17
Figure.11	Carte des tranches d'altitudes du sous bassin versant	19
Figure.12	Courbe hypsométrique	21
Chapitre II Aperçu géologique et hydrogéologique		
Figure.1	Carte géologique du bassin El Hodna (Grine 2009)	29
Figure.2	Coupe géologique de la région d'El-Maadher	30
Figure.3	Carte géologique de la région d'étude	31
Figure.4	Carte de positions des forages étudiés (Février 2025)	37
Figure.5	La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudié (Février 2025)	38
Chapitre III caractérisation hydrochimique et classification de la qualité des eaux souterraines		
Figure 01	Localisation géographique des forages étudiés-Campagne février 2025.	42
Figure 02	Variation de pH dans les eaux des forages étudiées	44
Figure 03	Variation de CE dans les eaux des forages étudiées	44
Figure 04	Variation de la dureté totale dans les eaux des forages étudiées	45
Figure 06	Variation d'ion de calcium dans les eaux des forages étudiées	46

Figure 07	Variation d'ion de magnésium dans les eaux des forages étudiées	46
Figure 08	Variation d'ion de sodium dans les eaux des forages étudiées	47
Figure 09	Variation d'ion de potassium dans les eaux des forages étudiées	47
Figure 10	Variation d'ion de chlorure dans les eaux des forages étudiées	47
Figure 11	Variation d'ion de bicarbonates dans les eaux des forages étudiées	47
Figure 12	Variation d'ion de sulfate dans les eaux des forages étudiées	50
Figure 13	Variation d'ion de nitrates dans les eaux des forages étudiées	51
Figure 14	Faciès chimiques des eaux souterraines - Maadher- Diagramme de Piper -	51
Figure 15	Faciès chimiques des eaux souterraines – Maadher	52
Figure 16	Diagrammes de Gibbs des échantillons d'eau souterraine de Compagne 2025	54
Figure 17	Diagrammes de Gibbs des échantillons d'eau souterraine de Compagne 2025	56
Figure 18	Graphes bivariés de : a) SO_4^{2-} en fonction de Ca^{2+} b) Na^+ en fonction de Cl^- c) Na^+ en fonction de $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ d) $(HCO_3^- +SO_4^{2-})$ en fonction $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$	56
Figure 19	Indice de saturation minérale des eaux souterraines de la région de Maadher -Compagne Fév 2025 -	58
Figure 20	Cartes d'interpolation spatiale des indices de qualité de l'eau pour l'irrigation par méthode de krigeage ordinaire.	63
Figure 21	Classification de qualité d'eau des échantillons étudiée (Compagne 2025) à l'aide de WQI	63
Figure 22	Carte d'interpolation spatiale de WQI par méthode de krigeage ordinaire	68
Figure 23	Classification de niveaux de pollution des eaux souterraines à l'aide de l'indice de NPI	76

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Pages
Chapitre I Présentation géographique et conditions naturelles de la zone d'étude		
Tableau.1	Précipitation moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période 2009-2018...27	13
Tableau.2	:Température moyenne mensuelle de la région de Maadher, période 2009-2018...28	14
Tableau.3	: Evapotranspiration dans la région de Maadher, période (2009-2018)	14
Tableau.4	Vitesses moyennes mensuelles de la région de Maadher, période (2009-2018)	16
Tableau.5	Calcul des surfaces partielles et cumulées	19
Tableau .6	classification des Reliefs	23
Tableau .7	Principales caractéristiques morphométriques du sous B.V de la zone d'étude	25
Chapitre I		
Tableau.1	Les cordonnées points d'eau.	36
Chapitre I		
Tableau.1	Données statistiques des paramètres physico-chimiques, compagne février 2025	42
Tableau.2	Faciès chimiques des eaux selon la méthode de Schoeller – Berkaloff	53
Tableau.3	Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson	59
Tableau.4	Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Maadher -Compagne Fév 2025 –	60
Tableau .5	Ensembles des couples dépendants et indépendants.	66
Tableau.6	Corrélations entre les variables et les Composantes	61
Tableau.7	Pourcentage de variance	61
Tableau.8	Indices de qualité de l'eau d'irrigation de l'aquifère d'El Maadher -Compagne Février 2025-	62
Table . 9	Normes de l'OMS 2011	62
Tableau.10	Différentes propositions issues d'études scientifiques des poids (w_i) et poids relatifs (Rw'_i) des paramètres de qualité d'eau dans des régions semi-aride	67
Tableau.11	Différentes propositions issues d'études scientifiques des poids (w_i) et poids relatifs (Rw'_i) des paramètres de qualité de l'eau dans les régions semi-arides dominées par certains paramètres physico-chimiques	70
Tableau.12	Poids attribués et adoptés (w_i) et poids relatifs (Rw'_i) calculés des paramètres de qualité	73

Liste des Abréviations

OMS : Organisation mondiale de la santé

ADE : Algérienne des eaux

T : Température

pH : potentiel hydrogène

CE : conductivité électrique

Ca²⁺ : calcium

Mg²⁺ : Magnésium

HCO₃⁻ : Bicarbonate

Cl⁻ : Chlorures

SO₄²⁻ : Sulfate

TH: dureté totale

NO₃⁻: Nitrate

Na⁺: Sodium

K⁺: Potassium

TDS : Solides totaux dissous

FAO : Organisation d'alimentation et l'agriculture

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ACP : Analyse en composante principale

CAH : classification ascendante hiérarchique

SAR : pourcentage d'absorption du Sodium

Introduction générale



Introduction générale.

Dans les zones arides et semi-arides telles que la région d'**El-Maadher** (au nord-est de Boussaâda, wilaya de M'Sila), les eaux souterraines représentent la principale ressource en eau, surtout face à la rareté des précipitations et à l'irrégularité climatique. Ces eaux sont fortement sollicitées pour l'irrigation, notamment dans un contexte d'extension agricole croissante.

Afin de mieux comprendre les caractéristiques de cette ressource, une **approche hydrochimique** a été menée en février 2025 dans la région d'El-Maadher. Cette étude visait à **décrire la composition chimique des eaux souterraines**, à travers une **analyse hydrochimique détaillée**, ainsi qu'à **classer leur qualité** en s'appuyant sur différents **indices de qualité de l'eau**, adaptés aux usages domestiques et agricoles.

L'approche s'est appuyée sur plusieurs axes :

- Une analyse morphométrique du sous-bassin versant pour évaluer les conditions d'écoulement,
- Une étude géologique et hydrogéologique pour caractériser les formations aquifères,
- Une caractérisation hydrochimique des eaux souterraines à l'aide de diagrammes (Piper, Schoeller),
- Une **évaluation de la qualité de l'eau** selon des **indices spécifiques** (Wilcox, Richards, IWQI, etc.) pour déterminer leur aptitude à l'irrigation et à la consommation humaine.

Les traitements et visualisations ont été réalisés via les logiciels **ArcGIS, Surfer 10 et XLstat 23**. L'analyse a abouti à des résultats précis permettant une classification claire des eaux souterraines d'El-Maadher, tout en fournissant des recommandations pour leur **gestion durable**.

Chapitre I



**Présentation géographique
et conditions naturelles
de la zone d'étude**



Chapitre I Présentation géographique et conditions naturelles de la zone d'étude

I.1. Introduction

La zone d'étude se situe dans le bassin versant du Hodna, c'est une région steppique située à 130 km de la Méditerranée. Le climat est aride à semi-aride, très rigoureux, et la zone est entourée de montagnes. Au centre se trouve une sebkha, dépourvue de toute végétation et saturée en sel, dont le niveau d'eau varie au fil des saisons : il augmente en hiver et diminue en été. Depuis plus de vingt ans, cette région subit une forte évapotranspiration et une salinisation accrue des sols, exacerbée par la sécheresse et par un pompage intensif des eaux souterraines, en l'absence d'autres sources d'irrigation

I.2 Aperçu géographique

I.2.1 Localisation géographique

Le village d'El-Maadher est géographiquement situé dans la commune de Boussaâda, relevant administrativement de la wilaya de M'Sila, en Algérie.

✓ **Emplacement général et relation avec les zones environnantes:**

La région d'El-Maadher se trouve au nord-est de la ville de Boussaâda, à une distance approximative de 10 à 20 kilomètres. Il fait partie des vastes terres agricoles qui s'étendent au nord-est de la ville de Boussaâda, souvent désignées comme le "village agricole d'El Maadher" en référence à sa vocation première.

Une caractéristique majeure de sa localisation est sa proximité au Chott El Hodna. Les franges sud-ouest de ce grand lac salé touchent ces plaines, plaçant El-Maadher entre la ville de Boussaâda au sud-ouest et le Chott El Hodna au nord et au nord-est.

✓ **Coordonnées géographiques et altitude:**

Le village d'El-Maadher est situé entre les attitudes 35°13'09 et 35°19'00 Nord et les longitudes 04°10'00" et 04°07'00" Est. El-Maadher se trouverait donc dans un périmètre proche, avec une légère inclinaison vers le nord-est par rapport au centre-ville de Boussaâda. La région est majoritairement plaine, avec des altitudes variantes généralement entre 400 et 500 mètres au-dessus du niveau de la mer, ce qui est typique des Hautes Plaines algériennes dont elle fait partie.

Elle est limitée par :

Au Nord : par les extensions sud du Chott El Hodna et potentiellement la commune de Chellal.

À l'Est : par les territoires relevant des communes comme Maârif ou El Houamed, ou d'autres zones en direction de M'Sila.

Au Sud : par la ville de Boussaâda et ses agglomérations adjacentes.

✓ **Nature géologique et environnementale:**

Le paysage d'El-Maadher est dominé par des terrains plats et des plaines alluviales, parsemés de formations sableuses (dunes) et parfois de quelques collines rocheuses isolées, caractéristiques de la région présaharienne de l'Atlas Saharien. Le sol est principalement composé de sable et de dépôts alluviaux récents. En raison de sa texture sableuse et d'un couvert végétal naturel souvent clairsemé, la région est constamment vulnérable à l'érosion éolienne.

✓ **Activité économique:**

El-Maadher est avant tout une zone à vocation agricole, l'agriculture y est pratiquée notamment grâce à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation. La densité de population dans le village et ses environs est relativement faible.

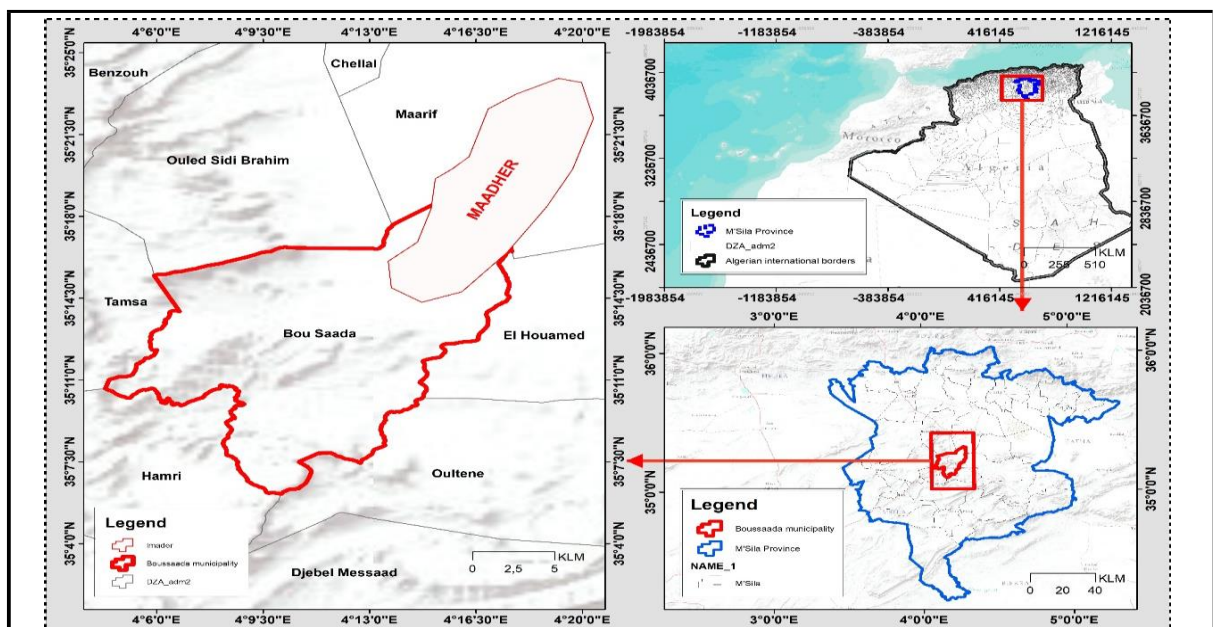


Figure 1.1 : Présentation géographique de la zone d'étude

I.2.2. Habitats et activités

La majorité de la population est concentrée dans les chefs-lieux communaux, tandis que seulement 4 % (159 555 habitants, RGPH 2008) vit en zone rurale. Les agriculteurs se regroupent principalement dans le village agricole d'El-Maadher. L'agriculture constitue l'activité économique dominante de la région et la principale source de subsistance pour les habitants.

La région bénéficie d'une vaste plaine irriguée située au nord-est de la ville de El-Maadher. Il y a, selon la direction des services agricoles (DSA), environ 42000 ares de terres arables, dont 50 % sont irriguées (Lasad 2022). El-Maadher est la zone avec la plus grande activité

agricole, selon la division des services agricoles de El-Maadher. Les terres de cette ville sont estimées bonnes pour l'agriculture sur plus de 2595 hectares, dont 2 299 sont irrigués, soit 88.59 % de la superficie totale cultivée (Annuaire statistique 2015). Cette plaine est devenue une zone agricole majeure irriguée par pompage des eaux souterraines depuis les années 1970. Ces cultures peuvent être cultivées sur ses sols argilo-sableux bruns et brun rougeâtre. Les engrais synthétiques et les déchets animaux sont fréquemment utilisés (une fois tous les 2 ans) pour avoir des récoltes de quantités et qualité supérieure. Ce qui rend la région célèbre pour la culture la culture de légumes tels que les carottes, les betteraves, les oignons et l'ail ainsi que les salades, les céréales, l'arboriculture et le fourrage, (Figure III . 2). Par ailleurs, la région dispose d'une importante richesse animale estimée à 28 420 têtes, qui soutient l'économie de la ville (Annuaire statistique 2015).



Figure I 2. Photos de plusieurs terres traitées par les Déchets animaux.

I.2.3. Végétation

La région sud du Chott El Hodna, constituée de massifs isolés, présente une végétation clairsemée dont la diversité dépend principalement de deux facteurs : le climat (semi-aride à aride) et les conditions édaphiques (sols salins et sableux) (Kaabeche, 1995). On y observe des formations forestières dispersées sur les reliefs, dominées par le pin d'Alep, le chêne vert et le genévrier de Phénicie (Kaabeche, 1990 ; Bord, 1981), tandis que la sebkha, dépourvue de toute couverture végétale, forme un contraste marqué (Ladgham & Zerguine, 2001).

Le Chott El Hodna concentre une flore représentative des plaines algériennes, notamment *Stipa tenacissima* (Halfa) et *Artemisia herba-alba* (Armoise). Les arbustes dominants incluent *Atriplex halimus* (Atriplex), *Zizyphus lotus* (Jujubier) et *Tamarix*

gallica (Tamaris) (Bord, 1981). La zone de R'mel, quant à elle, abrite des espèces psammophiles telles que l'Alfa (*Stipa tenacissima*), l'Ousara (*Salsola vermiculata*), l'Arta (*Calligonum comosum*) et le Rtem (*Retama raetam*) (Mimoune, 1995 ; Amel, 2021).

I.2.4. Types de Sol de la région d'étude

La composition pédologique de la région du Hodna reflète directement la nature des roches-mères sous-jacentes (Benchetrit, 1956). La présence dominante de lithoréliques calcitiques dans les sols recalcariifiés suggère un transport mécanique du calcaire sous forme de particules solides (cristaux de calcite, fragments rocheux), conduisant à la formation d'un "calcaire colluvial" par ruissellement (Belouam, 1976).

✓ **Caractéristiques des dépôts :**

Les séquences sédimentaires du Hodna sont majoritairement constituées de marnes, d'argiles, de grès et de poudingues. La profondeur variable du bassin influence la différenciation des faciès de surface. La présence systématique de sels et de gypse dans les argiles atteste d'un climat historiquement aride (Despois, 1953). Cette dynamique est marquée par l'existence d'une couche minérale caractéristique, dont l'expression morphologique centrale correspond à la sebkha.

Le sol sablonneux, de type dunaire, présente une surface constamment remodelée par le vent. Composé majoritairement de sables grossiers avec des traces d'argile et de sable fin, il contient principalement du gypse, de la calcite, du quartz et du sel. Cette couverture sableuse, caractéristique de la région de R'mel (sud du Chott El Hodna), domine presque entièrement la zone (Abdeslam et al., 2012 ; Despois, 1953).

Les sols calcaires, quant à eux, se distinguent par :

- Une forte teneur en calcaire et une saturation en ions Ca^{2+} ,
- Un pH alcalin (7,0–8,0),
- Une faible rétention d'eau due à l'absence de colloïdes (Benchetrit, 1956).

La carte des sols de la zone irriguée (Figure III.3) révèle une fertilité limitée et une faible capacité d'échange cationique (CEC), nécessitant des amendements organiques et une fertilisation pour atteindre des rendements agricoles satisfaisants.

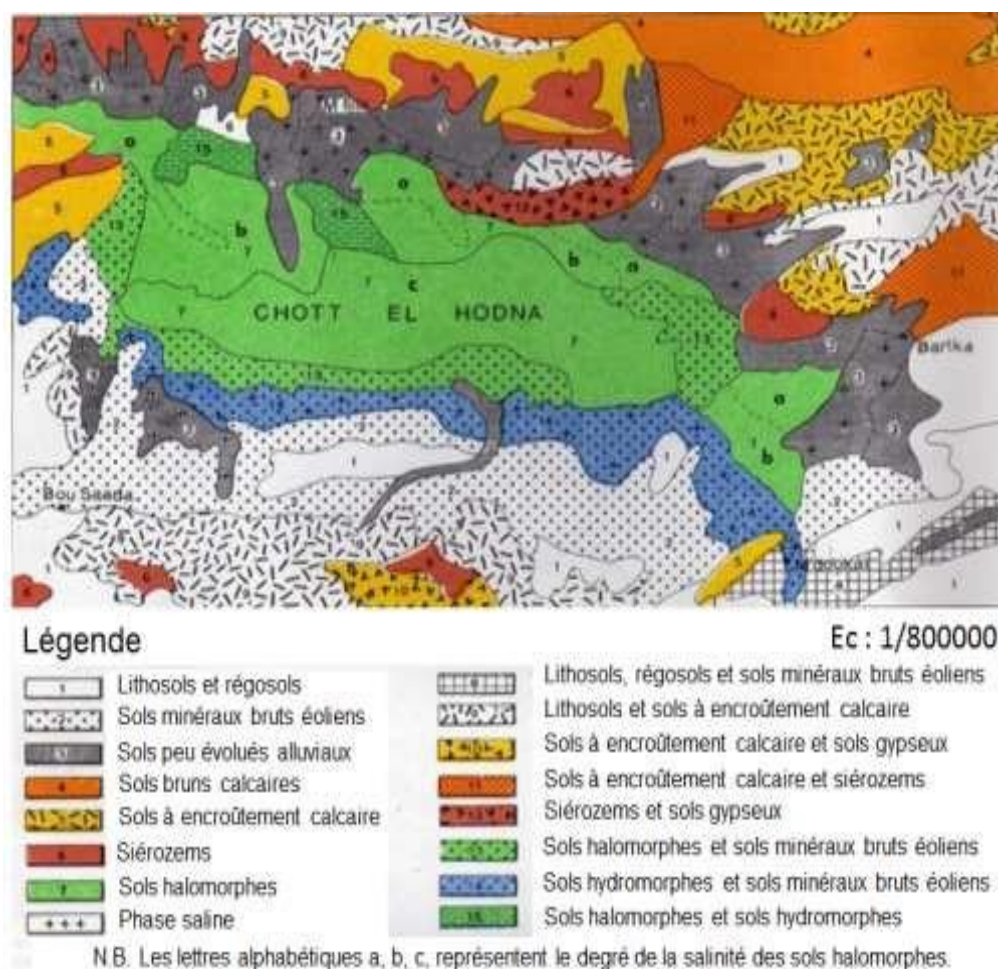


Figure I 3. Carte pédologique du Honda (Boyadgfv 1975).

I.2.5. Relief

Le relief de la région d'étude est caractérisé par la présence de chaîne de montagnes d'orientation variée surtout dans la partie sud et sud-ouest (Bord 1981).

- Djebel Gorehor côté Nord-ouest.
- Djebel Moubkhira côté Sud-ouest (772 m).
- Mont Kerdada côté sud (947 m).
- Djebel Menkeb (718 m) côté Sud-est de la zone d'étude.
- La plaine du village agricole au (El Maadher) de la zone d'étude.
- Les plaines de Chellal au nord et Maarif, Khoubana, M'Cif au centre de la zone d'étude.
- Le lac salé (Chott El-Hodna) au nord-est de la zone d'étude.
- Les vallées importantes qui traversent la zone d'étude :

Oued Boussaâda : Cette vallée traverse la ville de Boussaâda au pied du Djebel Kerdada et se jette dans la plaine du Nord.

- Oued Maiter : localisée à l'ouest de village de Boussaâda, formant un couloir

venteux animé par les vents Ouest et Nord, engendrant des champs de dunes. Il existe également des vallées de soutien comme Oued Roumana et El Mahkoub.

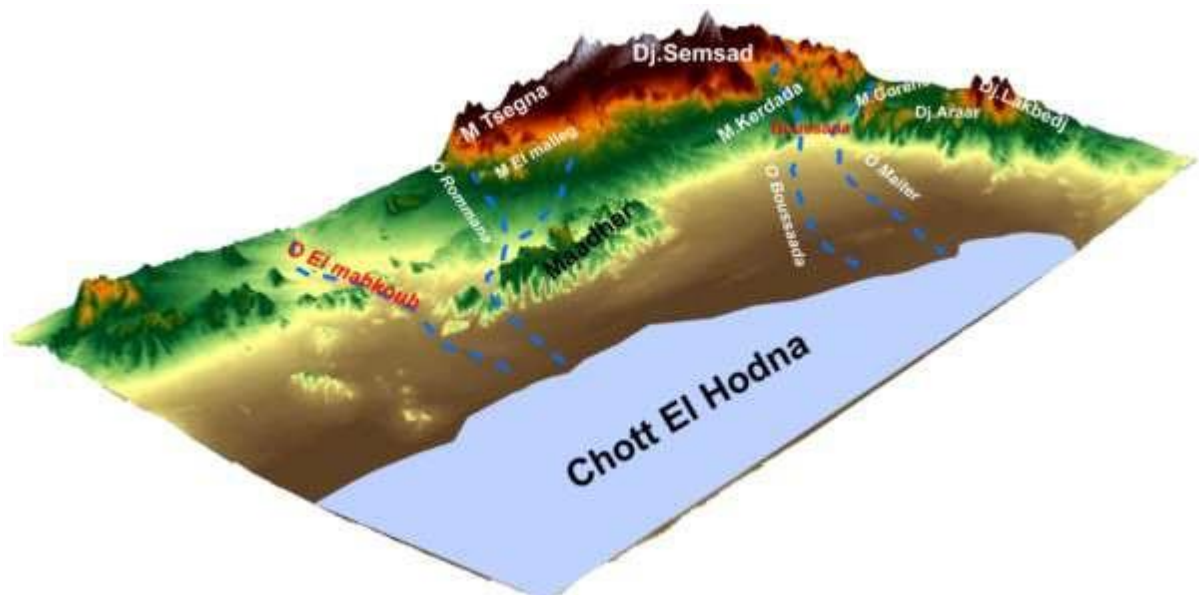


Figure I 4. Carte 3D indiquant les principaux reliefs de la région d'étude

I.2.6. Ressources en eau

Les eaux souterraines exploitables comprennent la nappe phréatique et la nappe captive, utilisées pour :

- L'irrigation Agricole
- Les besoins domestiques et industriels

Différences:

1. Première version : 12 mots (très synthétique)
2. Deuxième version : 20 mots (plus explicite)

I.3. Hydrologie de la région

Le bassin Hodna présente un régime hydrologique irrégulier, alimenté par 22 oueds intermittents. Ces cours d'eau, généralement secs en été, maintiennent l'équilibre hydrique du Chott qui s'assèche fréquemment (Ramsar, 2001).

I.3.1. Réseau hydrographique de la zone d'étude

Le bassin versant se caractérise par son réseau hydrographique (Guerra, 1998), avec un écoulement annuel concentré lors des crues et en hiver, suivi d'une longue période sèche. Le flux annuel moyen vers le Chott est estimé à 150 hm³ (Ladgham & Zerguine, 2001).

La zone comprend deux cours d'eau principaux :

1. **Oued Maiter** : Cours permanent à forte pente sud-ouest/nord-est, se jetant dans la Sebkha

2. **Oued Boussaâda** : Cours intermittent, alimenté avant 1980 par des sources gréseuses de l'Albien situées à 7 km en amont

Deux oueds secondaires au sud :

- Oued Roumana
- Oued el Mahkoub
- *Caractéristiques* : Écoulements temporaires déclenchés par les fortes pluies

Source : *Kebiche, 1994*

✓ **Améliorations** :

- Structure Claire et aerie
- Correction des fautes ("coule"/"avant")
- Chiffres clés mis en valeur (7 km, 1980)
- Localisations precise des elements
- Conservation des references

Les oueds transportent d'importantes quantités de sédiments en raison de la sécheresse prolongée et du manque de végétation (Belagoune, 2012). À l'ouest, les sources de Chellal, situées en bordure sud du synclinal de M'Sila, ont un débit inférieur à 10 l/s. La majorité provient de l'aquifère Albo-Aptien, tandis que d'autres, d'origine probablement Cénomaniennne, présentent un faciès chimique chloruré sodique. Ces sources semblent constituer des exutoires de la nappe captive (Ramsar, 2001).

I.3.2. Climat

Le Hodna présente un climat méditerranéen semi-aride à aride (Despois, 1953), marqué par une influence saharienne au sud (Ladgham & Zerguine, 2001). Cette zone, située à 100-120 km de la mer, est protégée des influences côtières par les massifs de l'Atlas tellien, mais exposée aux effets desséchants du désert en raison de l'altitude modérée de l'Atlas saharien (Despois, 1953).

Le régime climatique se caractérise par :

- **Une saison fraîche** (novembre à avril)
- **Une saison chaude et sèche** (mai à octobre) (Amel, 2021)

L'analyse s'appuie sur les données météorologiques de El-Maadher (2009-2018), montrant l'impact de ce climat sur les sols, la végétation et les ressources en eau.

I.3.3. Les précipitations

La station d'El-Maadher relève des précipitations annuelles moyennes de 150 à 250 mm dans le sud, caractérisées par :

- Une répartition irrégulière (temporelle et spatiale)

- Des orages rares (~10 jours/an)

(Données détaillées : Tableau I.1)

Tableau I.1 : Précipitation moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018).

Mois	Jan	fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sép	Oct	Nov	Déc
Pmoy	11	6.1	15.4	21.2	15.3	7.9	6.2	7.4	13.3	21.3	13.2	6.9

La figure I 4 montre l'évolution des précipitations montre une variation irrégulière ; les valeurs les plus élevées se trouvent en mois les plus pluvieux de mars, avril, mai et octobre, tandis que les valeurs les plus basses se trouvent en mois de juin, juillet et août. La moyenne annuelle des précipitations est de 145.2 mm.

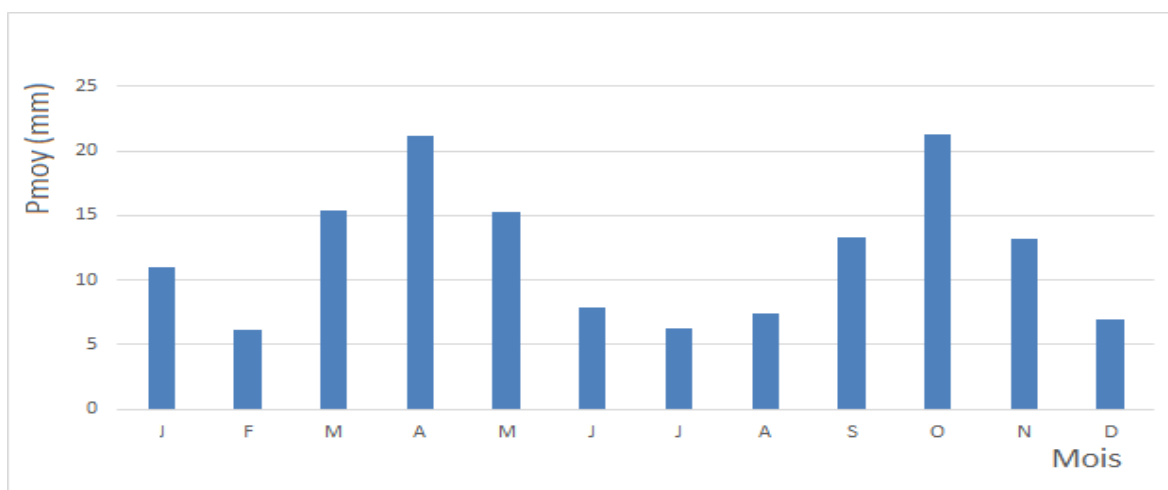


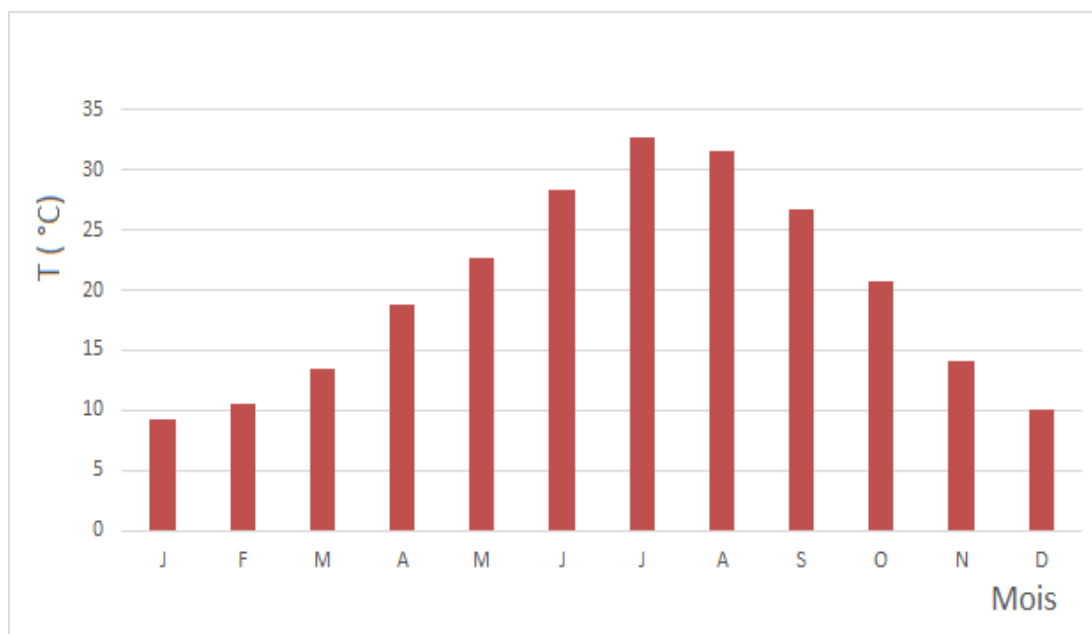
Figure I 5. Précipitation moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018)

I.3.4. Température :

La région du Hodna présente un climat méditerranéen marqué par de fortes amplitudes thermiques, avec des températures estivales atteignant 32,7°C en juillet et hivernales descendant à 9,3°C en janvier (Fig. I.5, Tab. I.2). Ces conditions climatiques, influencées par les courants chauds sud-orientaux (Despois 1953 ; Bord 1981), contrôlent l'évapotranspiration et le bilan hydrique, affectant directement les ressources en eau et la salinité des aquifères (Ozenda 1977). Les étés particulièrement chauds accentuent l'évaporation, tandis que la variabilité saisonnière des températures module les processus hydrologiques régionaux.

Tableau I.2:Température moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jeu	Jut	Aou	Sép	Oct	Nov	Dic
Vent (m/s)	2.5	3.24	3.41	3.2	2.94	2.24	2	2	1.59	1.19	2.3	2.14

**Figure 1.6.** Température moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018).

I.3.5. Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration, qui combine l'évaporation du sol et la transpiration des plantes, est influencée par divers facteurs climatiques et pédologiques (rayonnement solaire, température, vent, humidité relative, couverture végétale et état du sol) (Nguyen-Minh, 1966). L'analyse des données de la station de El-Maadher (2009-2018) révèle une évapotranspiration plus élevée durant les mois estivaux (juin, juillet et août), comme en témoignent le Tableau I.3 et la Figure I.6, reflétant l'impact des conditions climatiques saisonnières sur le cycle hydrologique local.

Tableau I. 3: Evapotranspiration dans la région de El-Maadher, période (2009-2018)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc
------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	-----	-----	-----	-----	-----

ETP (mm)	60	70.8	100.3	131	184.8	234	267.96	261.5	158.2	116.7	70.8	51.5
----------	----	------	-------	-----	-------	-----	--------	-------	-------	-------	------	------

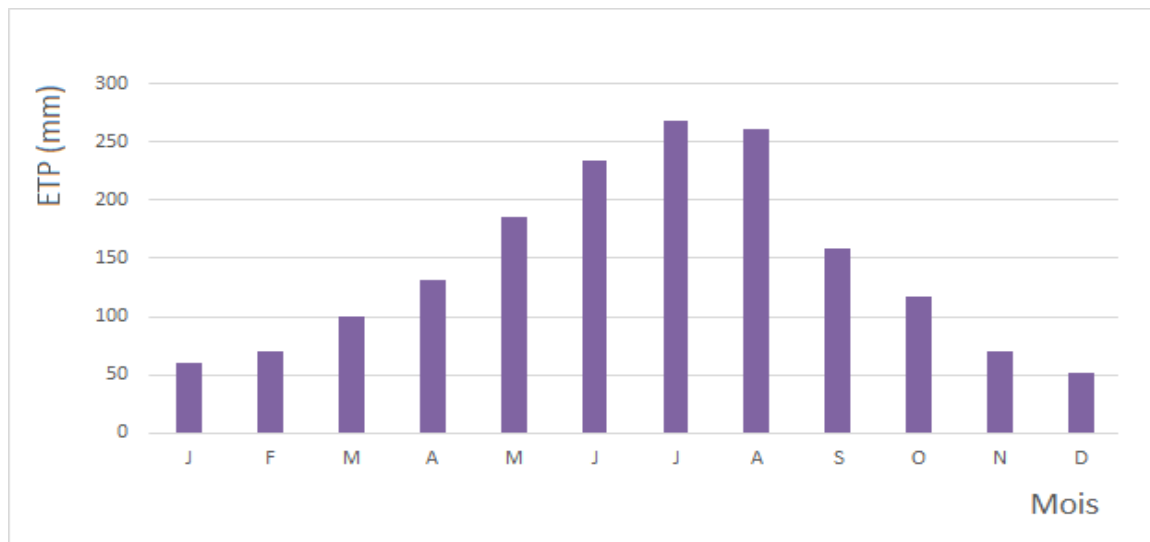


Figure I. 7 : Evapotranspiration de la région de El-Maadher, période 2009-2018.

I.3.6. Les vents dominants

La région d'étude connaît des vents violents et tourbillonnants, principalement orientés sud-est et nord-ouest/nord-est, transportant fréquemment des tempêtes de sable parfois accompagnées de pluie. Le régime éolien présente une nette saisonnalité : des vents chauds et étouffants en provenance du sud-ouest dominant en été, tandis que l'hiver est marqué par des vents froids et secs du nord-est. Ces phénomènes atteignent leur paroxysme en hiver et au printemps, où des épisodes venteux intenses peuvent persister continuellement pendant plusieurs semaines.

Les vents dominants proviennent principalement du nord-ouest (25%) et du nord (23%), responsables de l'accumulation des dunes dans le sud de la dépression du Hodna (secteur nord/nord-ouest du village) et de leur orientation NW-SE. Les flux d'air occidentaux (20%) s'engouffrent dans le corridor de l'Oued Maîter entre les djebels Gorehor et Moubakhera (Dechaicha, 2010). L'analyse des vitesses extrêmes révèle une périodicité des vents violents : 20 ans pour les vents à 180 km/h et 50 ans pour ceux atteignant 200 km/h dans la passe de El-Maadher (Fig. I.7). Les données 2009-2018 (Fig. III.13) montrent que les vitesses moyennes

maximales se concentrent de février à mai.

Tableau I.4 : Température moyenne mensuelle de la région de El-Maadher, période (2009-2018)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jeu	Jut	Aou	Sép	Oct	Nov	Dic
Vent (m/s)	2.5	3.24	3.41	3.2	2.94	2.24	2	2	1.59	1.19	2.3	2.14

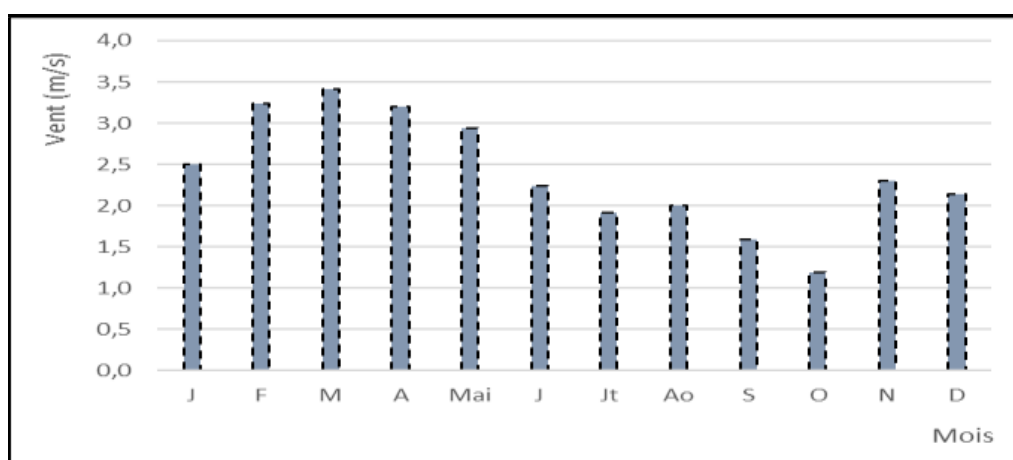


Figure I.8 : Vitesse du vent moyenne mensuelle dans la station de El-Maadher, Période (2009- 2018)

I.4. Caractéristiques morphométriques et physiques du Sous B.V de El-Maadher

I.4.1. Délimitation de la zone étudiée Dans le Sous B.V de El-Maadher

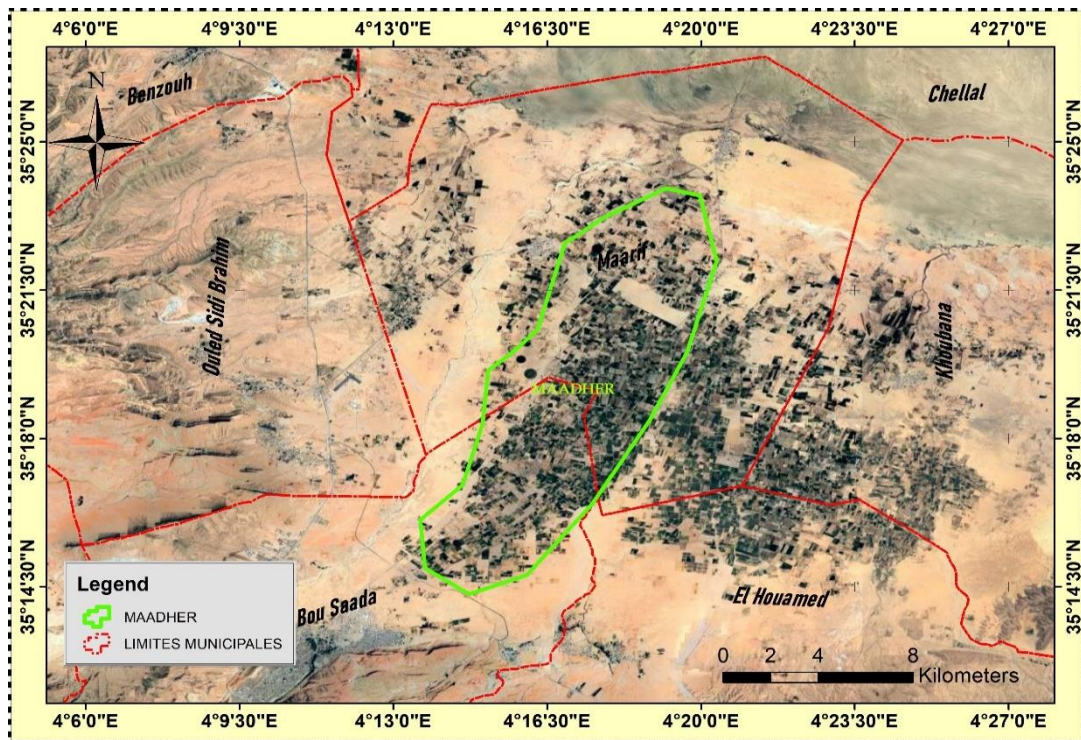


Figure. I.9. Zone d'étude par satellite

I.4.2 Surface

Le bassin versant, zone de collecte des précipitations alimentant les cours d'eau, couvre une superficie (A) de **188,83 km²** (mesurée par digitalisation sous ArcGIS). Délimité par la ligne de partage des eaux, son étendue influence directement les débits. Les méthodes modernes (logiciels SIG : ArcGIS, Global Mapper, MapInfo) remplacent avantageusement les techniques traditionnelles (planimètre) pour ce calcul.

I.4.3. Périmètre

Le périmètre du bassin versant (50,7 km pour le sous-bassin de El-Maadher, mesuré sous ArcGIS) correspond à la ligne continue joignant les points topographiques les plus élevés, matérialisant ainsi ses limites irrégulières. Bien qu'il ne conditionne pas directement l'écoulement hydrologique, sa mesure précise peut être réalisée par curvimètre ou via des logiciels SIG spécialisés (ArcGIS, etc.).



*Figure. I.10. Carte du sous bassin versant étudié***I.4.4. Indice de compacité de Gravelius**

L'indice de compacité (K_p), développé par Roche (1963), est un paramètre clé caractérisant la forme du bassin versant et son impact sur la réponse hydrologique. Calculé par la formule $K_p = 0,28 \times (P/\sqrt{A})$ où P est le périmètre (km) et A la surface (km²), cet indice compare la forme réelle du bassin à un cercle de même superficie. Lorsque K_p approche 1, le bassin présente une forme quasi-circulaire favorisant des temps de concentration courts et des crues rapides à l'exutoire. À l'inverse, un indice élevé (>1,5) révèle un bassin allongé générant des écoulements

plus lents et des hydrogrammes étalés. Cet outil essentiel en hydrologie permet d'anticiper le comportement des crues et d'optimiser la gestion des bassins versants.:

$$KG = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

KG : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km².

Le coefficient de Gravelius du sous B.V du El-Maadher est de 1,23.

Lorsque KG est proche de 1 le bassin versant est de forme quasiment circulaire

- Lorsque le KG supérieur à 1 bassin versant est de forme allongée. Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

$KG = 1$	forme d'un cercle
$KG = 1,12$	forme d'un carré
$KG > 1,12$	forme d'un rectangle

D'après *KG* obtenu, le sous bassin versant du El-Maadher est de forme allongée.

I.4.5. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique, outil fondamental pour caractériser le relief du bassin versant, représente graphiquement la relation entre les altitudes (en ordonnée) et les surfaces cumulées correspondantes (en abscisse). Cette analyse morpho métrique, réalisée par planimétrage digital sous Arc GIS des surfaces inter-isohypses, a permis d'établir : (1) les données quantitatives de distribution altimétrique (Tableau I.5), et (2) la cartographie détaillée des courbes de niveau du sous-bassin étudié (Figure I.11), fournissant ainsi une représentation complète de la topographie de la zone.

Tableau I.5 : Calcul des surfaces partielles et cumulées

Altitude (m)	Altitude moyenne (m)	Surfaces partielles		Surfaces cumulées	
		Si (Km ²)	%	Sic (Km ²)	% Sic
900-1000	950	5,00	2,65	5,00	2,65
800-900	850	9,60	5,08	14,60	7,73
700-800	750	18,14	9,61	32,74	17,34
600-700	650	37,63	19,93	70,37	37,27
500-600	550	66,20	35,06	136,57	72,32
400-500	450	52,26	27,68	188,83	100,00
Somme	4200	188,83	100,00	188,83	100,00

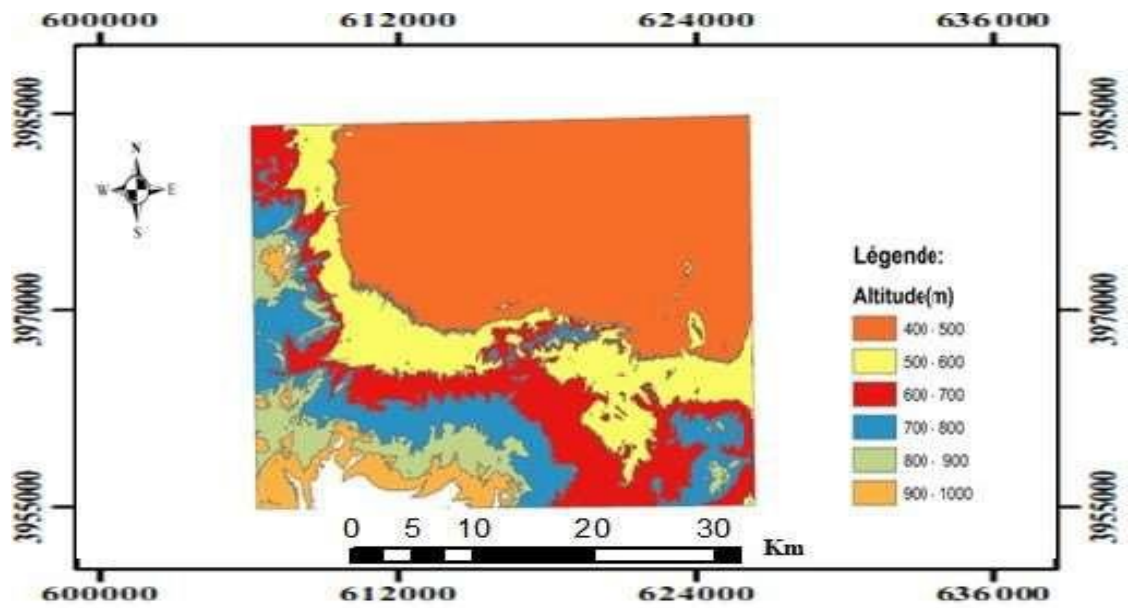
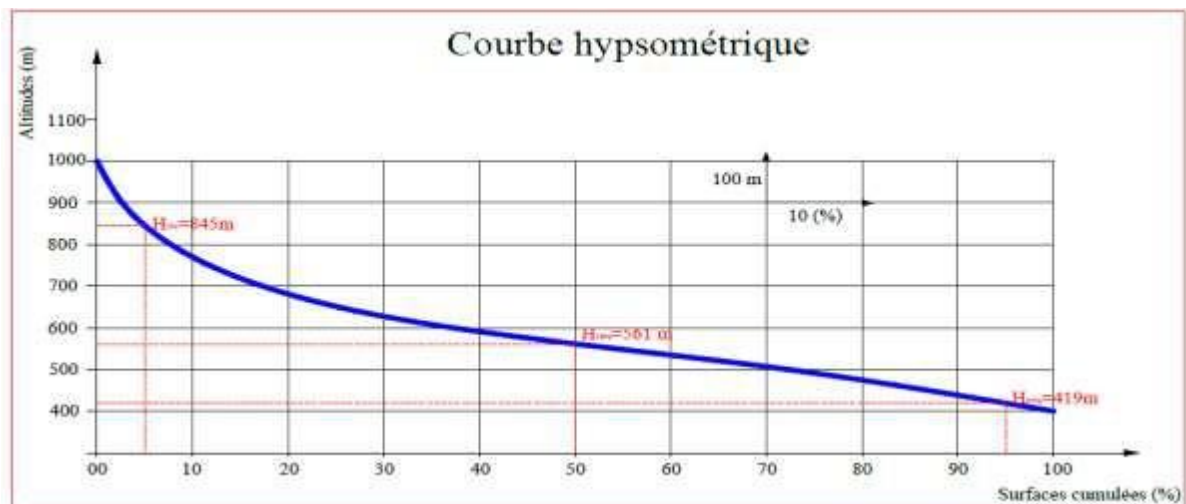


Figure I.11. Carte des tranches d'altitudes du sous bassin versant

La courbe hypsométrique représentée en figure I.11, montre que 92.27 % de la surface totale du sous bassin versant est comprise entre les altitudes 400 et 800 m. Au-dessous de 800 m le pourcentage des surfaces est très faible par rapport à la surface totale. Il est de l'ordre de 7,73 %.



Les altitudes au-dessus de 500 m occupent une surface de l'ordre de 72.32%. D'après la courbe hypsométrique, on peut déduire que la pente est relativement assez moyenne.

A partir de cette courbe, on détermine :

* L'altitude à 95% de la surface, $HR_{95R} = 419$ m

* L'altitude à 5% de la surface, $HR_{5R} = 845$ m

* L'altitude médiane, $H_{50} = 561$ m

L'altitude moyenne est définie aussi par la formule suivante :

$$\bar{h} = \frac{\sum S_i \cdot \bar{H}_i}{S}$$

D'où :

S : surface totale du bassin versant S_i : surface partielle

\bar{H}_i : L'altitude moyenne entre deux courbes niveaux $\bar{h} = 591.79$ m

I.4.6. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent (Gravelius) est une représentation simplifiée du bassin versant qui conserve ses caractéristiques essentielles (superficie, périmètre, indice de compacité et répartition altimétrique). Cette transformation géométrique convertit le bassin en un rectangle dont les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés, tout en préservant les paramètres climatologiques, pédologiques et de couverture végétale. Selon Roche (1963), l'allongement du rectangle influence directement l'efficacité du drainage, avec des formes plus allongées présentant un drainage moins efficace. Les dimensions précises de ce rectangle sont calculées à l'aide de formules spécifiques.

$$L = \sqrt{A} \frac{K_c}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$L = \sqrt{A} \frac{K_c}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en Km ;

l : Largeur du rectangle équivalent en Km ;

KC : Indice de compacité ;

L'application de la relation précédente nous donne une longueur du rectangle équivalent du sous

B.V de l'ordre de 17.86 Km et sa largeur l est de : 7.42 Km.

I.4.6 Les indices de pente

Le but de ces indices est de Caractériser les pentes d'un bassin versant et de comparer le bassin versant ente eux.

a/Indice de pente Roche : ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le l'autre, il est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n S_i (H_i - H_{i-1})$$

L : Longueur de rectangle équivalent (m) Si : Surface partielle correspondante (%).

Soit: $I_p = 0.17$

b/Indices de pente globale

Les reliefs des bassins versants sont classés d'après l'indice de classification de l'Orstom suivant :

$I_g < 0.002$	relief très faible.
$0.002 < I_g < 0.005$	relief faible.
$0.005 < I_g < 0.010$	relief assez faible.
$0.010 < I_g < 0.020$	relief modéré.
$0.020 < I_g < 0.050$	relief assez fort

Où :

I_g : indice globale de Roche D : dénivelée totale (m).

$$D = H_{95} - H_5 = 845 - 419 = 426 \text{ m}$$

Donc l'indice de pente globale du sous bassin versant est de : $I_g = 0.023$; d'après I_g obtenu le sous bassin versant est de relief modéré.

I.4.7. Pente moyenne

C'est une caractéristique majeure des bassins versants qui donne des indications sur leur topographie. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse à laquelle l'eau rejoint l'exutoire du bassin, et donc le temps de concentration. Elle a un impact direct sur le régime d'écoulement au sein du bassin versant. En effet, plus la pente est importante, plus le temps de concentration des eaux de ruissellement, aussi bien dans les affluents que dans le cours principal, sera court. Ainsi, le bassin réagira plus rapidement aux précipitations. Les fortes pentes peuvent générer des écoulements torrentiels susceptibles de provoquer des crues destructrices.

Selon Roche (1963), la pente moyenne d'un bassin versant est définie comme la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires, dans lesquelles la ligne de plus

grande pente est considérée constante. Une approximation de cette pente moyenne peut être

$$P_m = \frac{1}{A} \sum D_i$$

calculée à partir de la relation suivante :

Avec :

P_m : Pente moyenne du bassin versant en ‰

l : Largeur du rectangle équivalent en km

D_i : Différence de niveau entre deux courbes consécutives

A : Surface élémentaire en km².

La pente moyenne du bassin versant de El-Maadher est d'environ 22,3 ‰. Pour son calcul, la forme de la courbe hypsométrique n'est pas prise en compte. Cette courbe représente la surface comprise entre les courbes de niveau en fonction des altitudes associées, et elle fournit des indications sur la pente ainsi que sur le modelé du relief.

I.4.8. Longueur du cours d'eau principal :

La longueur du cours d'eau principal correspond à la distance mesurée le long du tracé sinueux reliant l'exutoire à la ligne de partage des eaux, en suivant systématiquement le segment de rang le plus élevé. En cas de bifurcation, et par extension jusqu'à la limite topographique du bassin versant, cette longueur est exprimée en kilomètres. Lorsque les deux segments au point de bifurcation appartiennent au même ordre, c'est celui qui draine la plus grande superficie qui est retenu.

I.5. Les caractéristiques du réseau hydrographique :

I.5.1. Densité de drainage :

La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la superficie du bassin versant. Pour un bassin de superficie A , elle correspond à la longueur totale de l'ensemble des cours d'eau, quels que soient leurs ordres, rapportée à cette superficie A . La densité de drainage s'exprime en km/km² ou en km⁻¹.

Avec :

i : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km².

La longueur totale des cours d'eaux du BV du El-Maadher est de : $\sum L_i = 150.44 \text{ Km}$ Et leur surface $A = 132,48 \text{ km}^2$

$$\text{Donc : } D_d = 1.13 \text{ Km/Km}^2$$

La densité de drainage est influencée par plusieurs facteurs, notamment la géologie (structure et lithologie), les caractéristiques topographiques du bassin versant, ainsi que les conditions climatiques et atmosphériques. En général, les zones constituées de roches perméables

présentent une densité de drainage faible, tandis que celles formées de roches imperméables affichent une densité plus élevée.

I.5.2. Dénivelée spécifique (DS)

L'indice Ig décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction du paramètre (Ds).

$$D_s = D/L * \sqrt{A} \longrightarrow D_s = 23.85 \sqrt{132.48} = 274.51 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelée spécifique du bassin de Bou-Saada se trouve dans la classe R5 : caractérisée par un relief assez fort (tableau I 6).

Tableau I 6. Classification des Reliefs

R1	Relief très faible	05 < D _s < 10 m
R2	Relief faible	10 < D _s < 25 m
R3	Relief assez faible	25 < D _s < 50 m
R4	Relief modéré	50 < D _s < 100 m
R5	Relief assez fort	100 < D_s < 250 m
R6	Relief fort	250 < D _s < 500 m
R7	Relief très fort	500 < D _s < 750 m

I.5.3. Temps de concentration (Tc) :

Le temps de concentration correspond à la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant atteigne l'exutoire. Il peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,54}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

On obtient :

Tc= 3.43 heures Avec :

A : Superficie du sous bassin = 132,48 km² ;

Lp : Longueur du talweg principale = 21,430 km ; Hmoy =700m

Hmin = 400m.

I.5.4. Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc) :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{L}{T_c}$$

Avec :

Vitesse d'écoulement de l'eau en m/s (V_c)

Langueur du talweg principal : 21,430 km = 21430 m (L)

Temps de concentration 3.43 heures = 12348 S (T_c) Donc : $V_c = 1.73\text{m/s}$

I.5.5. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de El-Maadher est principalement constitué de deux oueds : l'oued Maitar, qui prend naissance sur le versant sud du djebel Moubakhria, et l'oued El-Maadher, qui provient du djebel Kerdada. Les eaux de pluie qui s'écoulent dans ces deux oueds finissent par se déverser dans le chott du Hodna.

I.5.6. Récapitulatif des caractéristiques principales du sous B.V de la zone d'étude

Le tableau I 7, résume les caractéristiques principales du bassin versant de l'El-Maadher.

Tableau I 7. Principales caractéristiques morphométriques du sous B.V de la zone d'étude

Caractéristiques morphométriques	Resultants	Unite	Observation
Surface	188.83	Km ²	-----
Périmètre	50,7	Km	-----
Altitude max	1000	m	-----
Altitude Moyenne	700	m	-----
Altitude min	400	m	-----
Indices de Gravelius	1,23	-----	Form allongée
Indices de pent global	0.023	m/Km	Relief modéré
Longueur du rectangle equivalent	17.86	Km	-----
Largeur du rectangle equivalent	7.42	Km	-----
Longueur du cours d'eau principal	21,43	Km	
Pente Moyenne	22,3	m/Km	-----

Dénivelée spécifique	254,71	m	-----
Densité de drainage	1,13	Km ⁻¹	Réseau moins dense
Temps de concentration	3,43	hours	
Vitesse décollement d'eau	1.73	(m/s)	

I.6. Conclusion

Le sous-bassin versant de El-Maadher se distingue par un climat semi-aride à aride, marqué par des étés très chauds et secs, et des hivers très froids. Il présente une vaste superficie, une forme allongée, un relief modéré, une pente moyenne, une faible densité de drainage et une longueur importante de cours d'eau.

La zone d'étude se caractérise par des reliefs marqués, comprenant de vastes plaines agricoles entourées de montagnes au sud et à l'ouest. Elle est traversée par un réseau d'oueds, parmi lesquels les oueds Boussaâda, Maiter et Roumana sont les plus importants. Les sols, majoritairement sablonneux et argilo-sableux, soutiennent une diversité d'activités agricoles. L'eau souterraine constitue la principale ressource pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation dans la région. Ce chapitre offre ainsi une vue d'ensemble complète de la région étudiée.

Chapitre II



Aperçu géologique et hydrogéologique



Chapitre II Aperçu géologique et hydrogéologique**II.1. Aperçu géologique**

L'étude géologique permet d'identifier les formations perméables détritiques ainsi que les formations résistantes, fissurées ou karstiques, susceptibles de constituer des aquifères, en plus des formations imperméables qui jouent le rôle de toit ou de substratum. Elle précise également leurs épaisseurs et leur étendue. L'analyse tectonique apporte des informations sur la géométrie des différents aquifères de la région. Les familles de failles, à l'origine de fossés d'effondrement ou de soulèvement, modifient la disposition des couches géologiques, caractérisant ainsi chaque type de nappe et favorisant une possible communication entre les aquifères.

II.1.1. Cadre géologique générale

Le bassin du Hodna est situé entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, caractérisé par une grande complexité tectonique (Figure II 1). Au début du Miocène, le Hodna s'est constitué avec une partie de la chaîne de montagnes nord et est. Après cet épisode marin unique, le bassin s'est progressivement rempli de sédiments continentaux Mio-pliocènes issus de l'érosion des reliefs voisins (Despois 1953).

Les dépôts mio-pliocènes de la dépression se sont mélangés aux matériaux issus de l'érosion des collines situées au nord-est et au nord-ouest, correspondant aux limons transportés par les rivières descendantes (Despois, 1953). Le Mio-Pliocène du mont Meharga, au nord-est de El-Maadher (Figure II-2), témoigne de l'érosion et des falaises auxquelles ces montagnes ont été soumises (Despois, 1953). La ligne de dunes, qui traverse El-Maadher le long de la bordure du Chott Hodna vers Mdoukal, est composée de sables quartzeux riches en matériaux argileux (Bernard et Ficheur, 1902 ; Kaabeche, 1990).

La région située au sud du Chott est formée par des dépôts mio-pliocènes ainsi que par des formations quaternaires anciennes et récentes, caractérisées par des alternances de marnes gréseuses et de conglomérats (Guiraud, 1970 ; Bernard et Ficheur, 1902).

La sebkha constitue une zone de collecte des eaux de ruissellement et de décantation des particules solides (Kaabeche, 1990). Elle est recouverte d'une mince couche salée sur des argiles noirâtres, lesquelles se transforment rapidement en sables argileux bruns. Certains profils ont révélé un horizon salin cristallisé, irrégulier et d'une épaisseur comprise entre 10 et 40 mm, se développant entre 30 et 70 cm de profondeur (Guiraud, 1970).

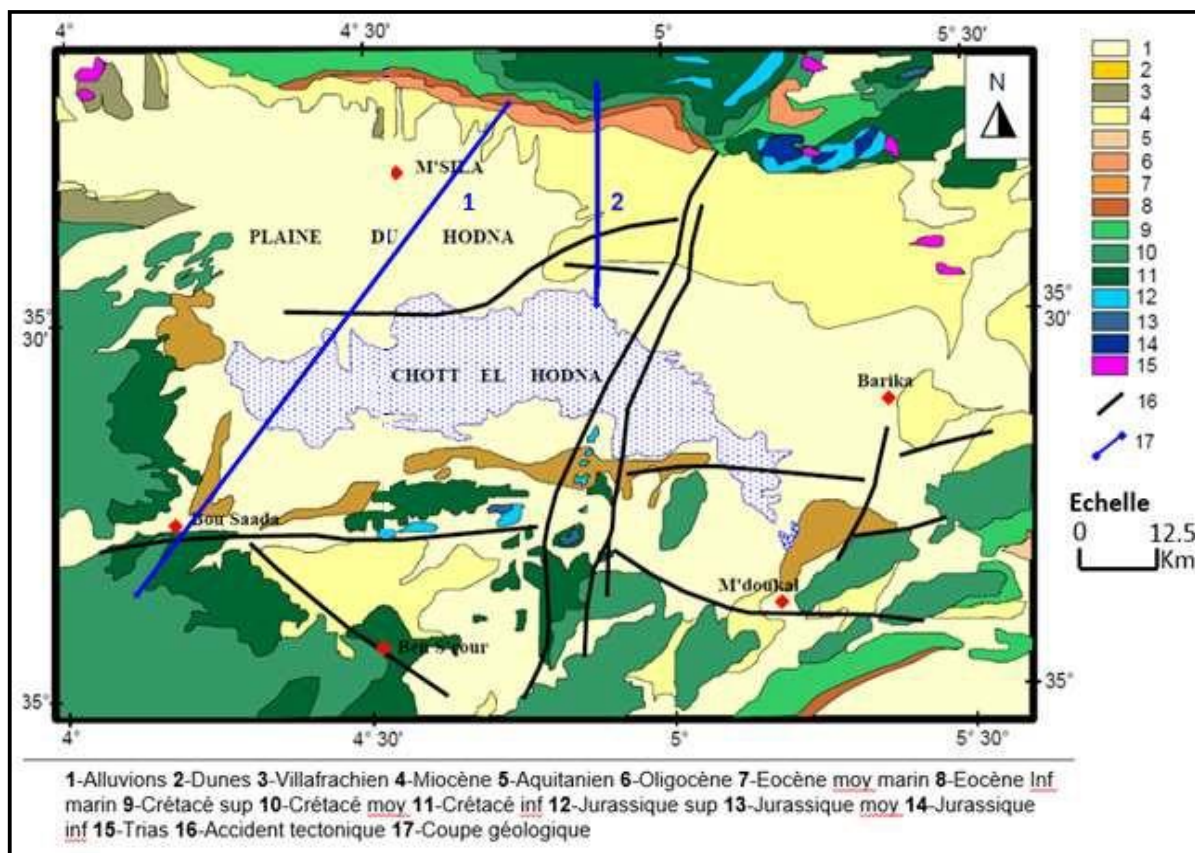


Figure II 1. Carte géologique du bassin El Hodna (Grine 2009).

II.1.2. Géologie de la région d'étude

Dans cette section, nous présentons les formations géologiques majeures de la zone d'étude, ce qui permet également d'évaluer la qualité des eaux, car les propriétés chimiques des eaux souterraines résultent des interactions entre l'eau et les roches.

Au début du Miocène et du Pliocène, le bassin du Hodna s'est formé suite à la collision entre l'Atlas saharien et l'Atlas tellien. Durant le Quaternaire récent, la plaine alluviale du bassin s'est constituée par le comblement progressif des cours d'eau (Grine, 2009).

Au sud du Chott El Hodna, se trouve la plaine agricole de Maadher, composée d'alluvions récentes et anciennes, ainsi que de dépôts fins dépassant parfois 10 cm d'épaisseur, avec une texture allant du limon gris aux teintes ocre. Certaines zones présentent également des sols sableux (Abdellaoui et Benchenite, 2012).

La région est caractérisée par d'importantes structures géologiques, où les formations sont imbriquées, déformées et traversées par de nombreux accidents tectoniques (Figure II-3).

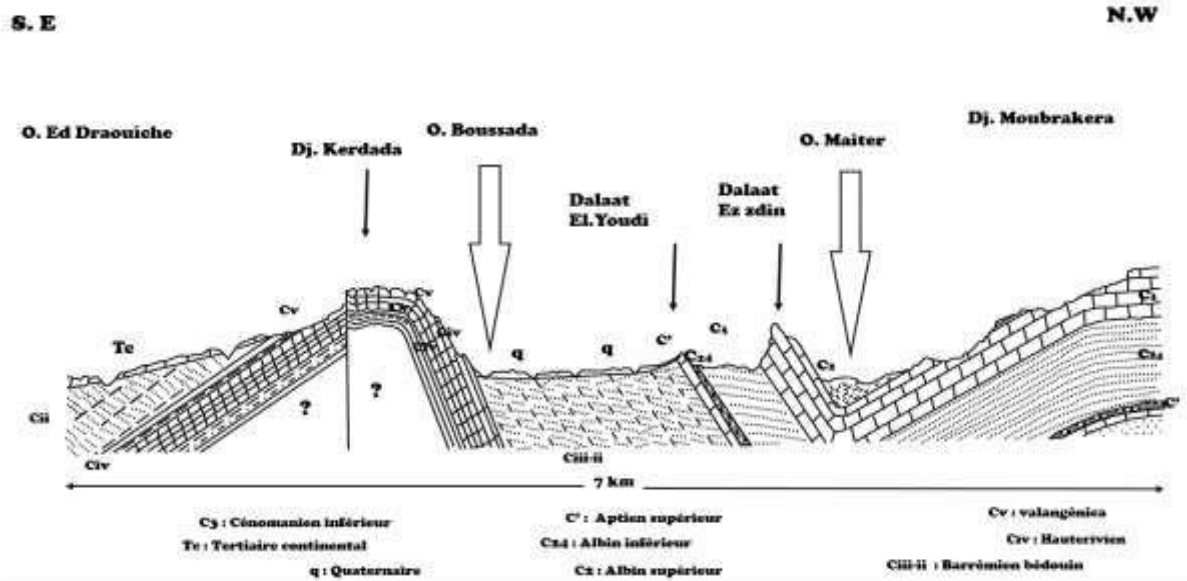


Figure II 2. Coupe géologique de la région de El-Maadher.

Des affleurements crétaqués sont présents dans la zone (Figure II-4) (Zerrouki et Lazib, 2013). Le secteur d'El-Maadher se caractérise par des dépôts alluviaux récents et anciens, riches en sable, dont l'épaisseur peut atteindre 10 cm par endroits.

Des dunes de sable, issues de l'érosion des grès, se développent dans les oueds Maiter et Tamsa. Ces dépôts se superposent aux formations du Cénomanien, de l'Aptien supérieur et de l'Albin supérieur situées au nord-ouest de El-Maadher, jusqu'au mont Moubakhera (Figure II-3). Ces formations, d'une épaisseur supérieure à 200 mètres, sont riches en calcaires, dolomies et marnes (Abdellaoui et Benchenite, 2012)

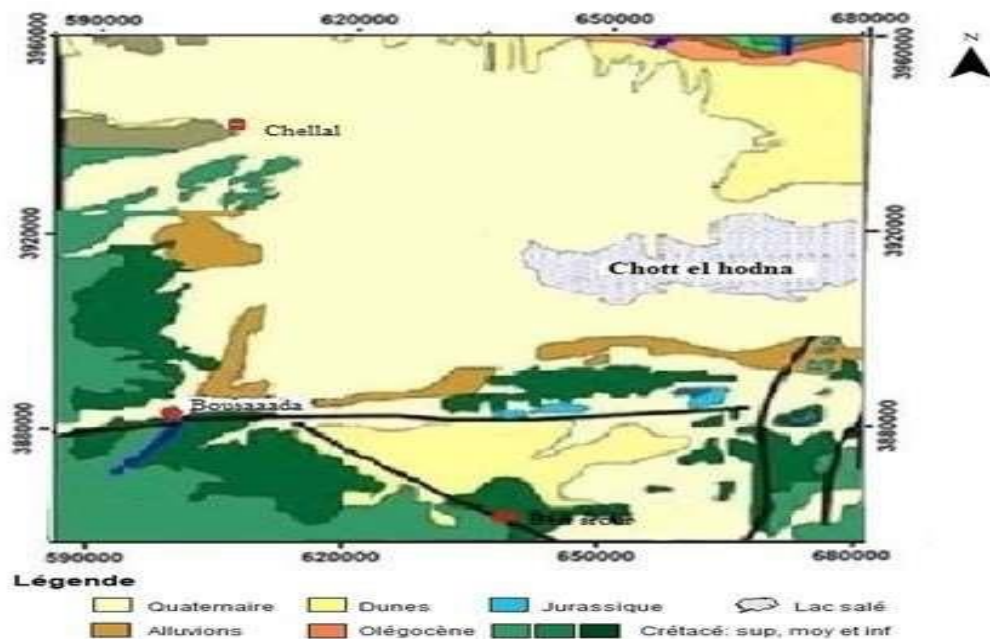


Figure II 3. Carte géologique de la zone d'étude

II.1.3. Géomorphologie du bassin

Le bassin du Hodna se distingue par des sols sédimentaires d'origine alluvionnaire, colluvionnaire ou éolienne, situé entre deux grandes formations géologiques : l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. L'étude géomorphologique descriptive est organisée autour de quatre unités principales :

- ***Unité 1 : cône et glacis d'accumulation à matériau grossier***

Cette unité correspond aux dépôts quaternaires anciens et moyens, que l'on retrouve principalement au piedmont méridional des monts du Hodna (au nord du Chott), ainsi qu'à l'est, au piedmont des djebels Belezma et Metlili. Elle se caractérise par la présence de croûtes et de gros galets calcaires, ainsi que de croûtes gypseuses (Benguesmia, 2009).

- ***Unité 2 : Glacis d'accumulation et d'épandage fin***

Elle renferme les glacis du quaternaire récent, et caractérisé par des enrichissements essentiellement calcaires sous forme diffuse, ainsi que des enrichissements calcaro-gypseux ou uniquement gypseux.

Les matériaux du quaternaire récent étant plus fin que ceux du moyen et ancien, du fait que les accumulations se superposent au lieu de s'emboîter (croûtes, blocs...) (Benguesmia 2009).

- ***Unité 3 : Les formes à matériaux éoliens***

Cette unité comprend les glacis du Quaternaire récent, caractérisés par des enrichissements principalement calcaires sous forme diffuse, ainsi que par des enrichissements calcaro-gypseux ou exclusivement gypseux. Les matériaux du Quaternaire récent sont plus fins que ceux des périodes moyenne et ancienne, car les accumulations se superposent plutôt que de s'emboîter (croûtes, blocs...) (Benguesmia, 2009).

- ***Unité 4 : Les étendues d'accumulation calcaro-gypseuse***

Composée d'argiles gypso-salines, cette unité constitue un milieu transitoire où s'accumulent des dépôts argileux récents, formant des dépôts alluvionnaires du Quaternaire. La plus grande partie de la région est couverte par des glacis d'accumulation et de débandage composés de matériaux fins, correspondant aux glacis du Quaternaire récent. Ces derniers présentent des accumulations riches sous forme diffuse ainsi que des dépôts calcaro-gypseux ou gypseux (Ladgham et Zerguine, 2001).

II.1.4 Stratigraphie

La série stratigraphique du bassin du Hodna s'étend du Trias jusqu'au Quaternaire ancien et récent. Les formations post-triasiques du bassin sont décrites dans l'ordre chronologique (Grine, 2009). De manière générale, les formations géologiques anciennes sont peu représentées dans la région. Toutefois, dans la partie nord, on observe quelques formations primaires fines, constituées de roches sédimentaires et volcaniques altérées.

II.1.4.1 Le Secondaire

Trias : On trouve des affleurements de pseudo-diapirs à Djebel Kerdada, principalement composés d'argiles gypsifères grises et de blocs de dolomie.

Jurassique : D'importants accidents tectoniques ont provoqué l'apparition d'affleurements jurassiques au centre et à l'est des monts du Hodna. Ces formations sont dominées par des roches carbonatées telles que le calcaire, le grès, la marne et la dolomie (Kieken, 1961).

Crétacé : La période crétacée, avec ses diverses formations, est présente dans plusieurs secteurs du bassin du Hodna, notamment au sud et au nord du Hodna ainsi qu'à El-Maadher, Maadid, Ain Rich, Sidi Aïssa et Berhoum. En général, le Crétacé est caractérisé par des alternances et des variations d'épaisseur de calcaires, marnes grises, dolomie et argiles (Kieken, 1962 ; Helali, 2016).

II.1.4.2 Tertiaire :

Paléocène : Dans la partie méridionale des monts du Hodna, les couches paléocènes se disposent en bandes plus ou moins parallèles, généralement inclinées vers le bassin de M'Sila. Elles sont constituées de marnes stratifiées recouvertes de pyrite (Tanétiens) et de marnes calcaires phosphatées (Montien), ainsi que de fines couches de calcaires argileux et de silex (Grine, 2009).

Éocène : L'Éocène de la région se divise en deux parties : le Yprésien, composé de calcaires d'environ 15 m d'épaisseur, suivi par des couches d'argilo-calcaires et de marnes indurées d'environ 20 m, puis des calcaires noirs phosphatés d'une épaisseur d'environ 70 m. Le Lutétien est constitué de marnes brunes gypseuses et calcaires.

Oligocène : Cette formation est constituée de grès fins émiétés, de marnes rougeâtres et blanches, ainsi que de grès à ciment argileux, avec une épaisseur d'environ 200 mètres

(Kieken, 1962).

Miocène : Le Miocène se compose de trois cycles

Le 1^{er} cycle est composé de marnes grises, de grès et de marnes gréseuses rouges.

Le 2^{ème} cycle est constitué par l'alternance de marnes et de grès grossiers stratifiés croisés. Le 3^{ème} cycle est constitué d'une série de conglomérats de marnes et de grès.

Mio-Pliocène : Il s'agit du tertiaire continental et est constitué de pouding et argiles sableuses Orange (Bousaada et Ain Rich).

Pliocène : Les différentes couches du Pliocène supérieur, moyen et inférieur sont en contact direct les unes avec les autres. Elles apparaissent de l'ouest vers l'est, notamment autour de M'Sila et de Berhoum. L'épaisseur totale de cette formation est de plusieurs dizaines de mètres. Le Pliocène est globalement constitué de conglomérats de grès, de marnes sableuses, ainsi que de galets bien roulés mêlés à des marnes (Glaçon, 1970).

II.1.4.3 Quaternaire

Le Quaternaire, d'origine continentale, se subdivise en trois phases : ancien, moyen et récent.

Le Quaternaire ancien, souvent mêlé au Pliocène supérieur sous forme de conglomérats et de sables, se situe au nord de Berhoum. Il est constitué de dépôts argilo-sableux rouges fins d'une épaisseur de 2 à 3 mètres, recouverts par une couche calcaire cimentée par un matériau rose très résistant de 3 à 4 mètres d'épaisseur (Grine, 2009).

Le Quaternaire moyen comprend des couches irrégulières d'une épaisseur variant de 15 à 20 mètres, composées de galets, de calcaire caillouteux, de blocailles et de colluvions plus ou moins rougeâtres (Grine, 2009).

Le Quaternaire récent se situe principalement dans la plaine du Hodna, particulièrement visible au sud sur l'axe de Maârif et M'Cif, où il se divise en trois niveaux : Soltanien I, Soltanien II et Rharbien. Il est constitué de galets, sables, graviers, marnes, limons, argiles et gypses (Helali, 2016).

II.1.5 Identification des formations aquifères

Le bassin du Hodna compte cinq aquifères distincts et complètement indépendants les uns des autres, bien qu'ils soient regroupés dans la zone du Chott (Derekov, 1973). Chaque aquifère est composé d'une couche supérieure perméable, généralement formée de grès et de conglomérats, surmontant une couche imperméable datant du Miocène, constituée de

cristaux de gypse et d'argile verte. Ces caractéristiques confèrent à ces couches des propriétés hydrogéologiques incompatibles entre elles (Savornin, 1908).

Dans la zone d'étude, on distingue un aquifère mixte, qui contient réellement deux aquifères avec points de contact : un aquifère superficiel, essentiellement constitué des formations quaternaires, et un aquifère profond, principalement formé par les dépôts mio-pliocènes (Amel, 2021).

II.2- Aperçu hydrogéologique

Les formations aquifères de la région d'étude sont constituées de sables, calcaires, argiles et marnes, s'étendant du Quaternaire au Mio-pliocène jusqu'au Crétacé. En 1967, les eaux de la nappe phréatique présentaient une salinité élevée, avec une concentration moyenne en solides dissous totaux (TDS) de 4,2 g/l (FAO, 1967). Cet aquifère est renouvelable et se recharge principalement par infiltration directe des précipitations, par les eaux d'irrigation ainsi que par l'infiltration des eaux d'oueds (ANRH, 2006).

L'aquifère profond est composé de marnes, d'argiles et de conglomérats intercalés issus du Tertiaire continental (Mio-pliocène et Crétacé) (Figure II 6). Cette formation, d'une épaisseur comprise entre 100 et 400 m, est ancienne et revêt une grande importance pour la région. L'eau qu'elle contient est de bonne qualité, avec une salinité inférieure à celle de la nappe phréatique, affichant une moyenne de TDS de 0,8 g/l (ADE, 2019). Son alimentation provient principalement des formations profondes environnantes.

Les frontières entre l'aquifère phréatique et l'aquifère profond restent souvent imprécises, car elles ne sont pas délimitées par une couche continue à faible perméabilité, mais plutôt par des lentilles discontinues présentant une perméabilité variable (Abdeslam et al., 2012). De ce fait, une communication peut s'établir entre ces deux nappes, rendant possible la contamination de l'aquifère profond à partir des eaux superficielles (Abdeslam et al., 2012).

La nappe de l'Albien remonte vers la surface, s'étendant vers l'ouest ainsi qu'en profondeur dans la zone du Chott où elle est alimentée. Elle s'écoule ensuite dans les formations tertiaires, nourrissant les sources telluriques telles qu'Ain Diss, Ain Koucha et Ain Zira (Derekov, 1973).

II.2.1 Etude de la piézométrie

La piézométrie représente la synthèse de l'étude hydrogéologique et joue un rôle clé dans la compréhension du comportement hydrodynamique de l'aquifère, ainsi que dans la définition de la configuration des conditions aux limites de la nappe.

Pour établir la carte piézométrique et mieux comprendre le fonctionnement des nappes dans la zone d'étude, nous avons basé sur une campagne de mesures réalisée par les services de l'ANRH en Mars 2021 pour 19 points d'eau et piézomètres de mesure, implantés dans l'aquifère superficiel (Tableau II.1 et figure. II.4).

Tableau II 1. Les coordonnées et niveaux piézométriques des points de mesure

Points de mesures	X	Y	Z	Niveaux Piézométriques
1	634289	3933164	403	343
2	629204	3931076	403	333
3	629445	3931591	404	334
4	629916	3930933	401	331
5	634409	3934897	407	347
6	630331	3931465	402	332
7	612715	3937122	430	385
8	622471	3919624	410	383,8
9	619832	3907479	451	381
10	628401	3938783	425	375,1
11	634443	3938779	414	349
12	646504	3894842	596	526
13	634058	3886576	765	675
14	660072	3913660	402	332
15	618770	3901795	478	408
16	621320	3900210	500	430
17	621776	3899773	505	435
18	621333	3899872	504	434
19	621536	3898739	519	449

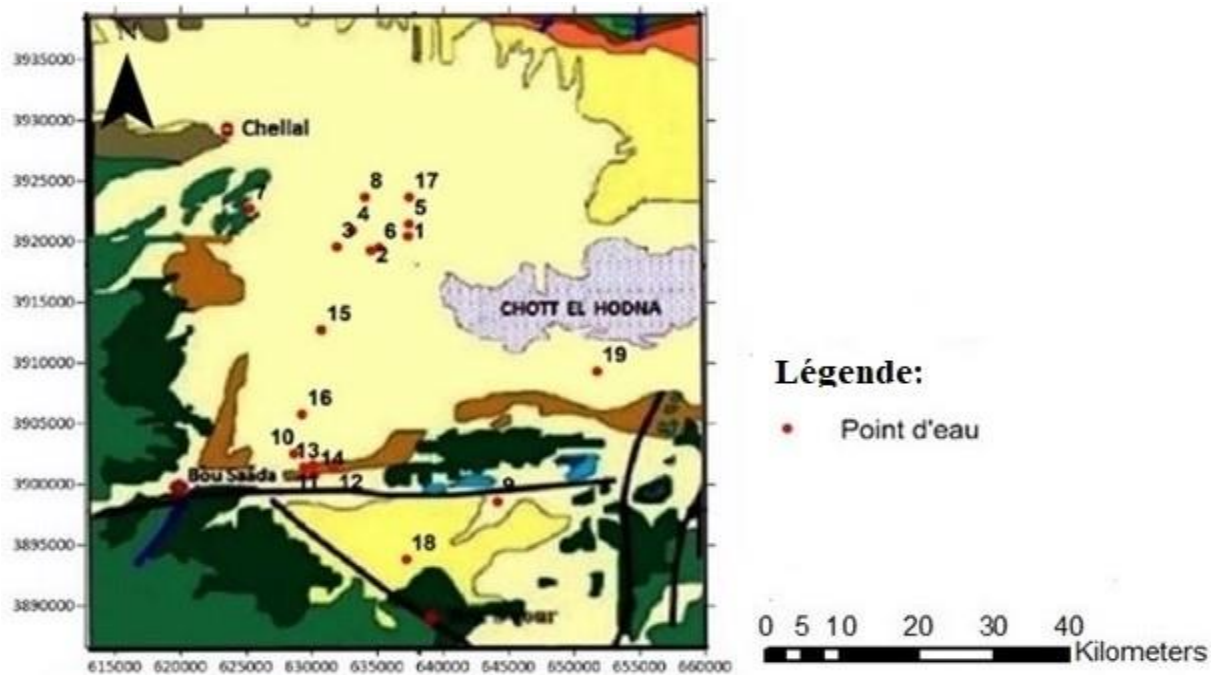


Figure II 4. Carte de positions des points de mesure piézométriques

II.2.2 Interprétation de la carte piézométrique

L'établissement de la carte piézométrique a été effectué par le logiciel surfer.10. L'analyse morphologique de la surface piézométrique doit obligatoirement passer par l'habillage de la carte piézométrique qui consiste à tracer les lignes de courant, le fléchage de ces lignes de courant, repérer les axes principaux des flux et les lignes de partage des eaux souterraines délimitant les bassins hydrogéologiques.

L'examen de la carte piézométrique (Figure II. 5) permet de dire que la nappe a un écoulement orienté suivant trois directions vers la dépression (Chott-El-Hodna) et à partir de trois parties.

- La première partie (Centre de la zone d'étude) : est caractérisée par un gradient hydraulique décroissant de plus en plus en allant vers la dépression (Chott-El-Hodna) et l'écoulement est de direction Sud vers le Nord.
- La deuxième partie (Est) : est caractérisée par des courbes serrées, ce qui correspond à un gradient hydraulique fort et l'écoulement est de direction Sud vers le Nord-est.
- La Troisième partie (Nord-ouest) : est caractérisée par des courbes moyennement serrées, ce qui correspond à un gradient hydraulique moyen décroissant de plus en plus en allant vers la dépression (Chott-El-Hodna) et l'écoulement est de direction Nord-ouest vers le Sud-est.

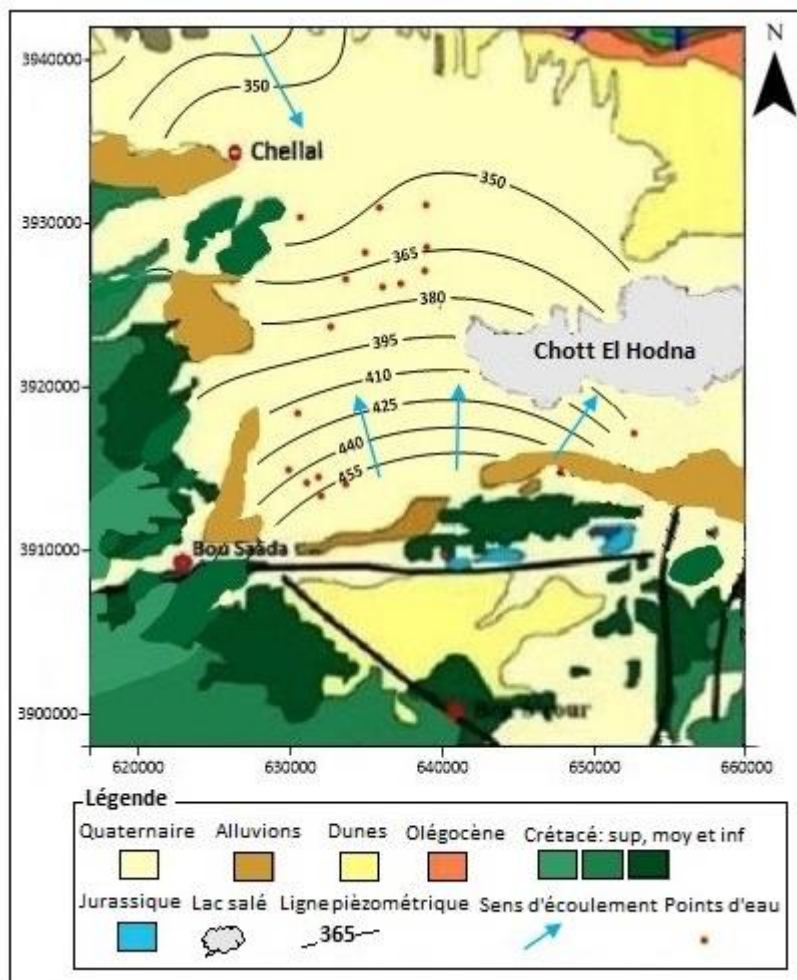


Fig. II.5 : La Carte piézométrique du sous B.V de la zone étudiée (Mars 2021)

II.3-Conclusion

La formation géologique de la zone étudiée est le résultat d'une succession d'événements depuis le Crétacé jusqu'au Miocène et au Quaternaire, lui conférant une grande complexité. Le Miocène se distingue par une alternance d'argiles, de marnes et de grès, tandis que l'Oligocène est caractérisé par des alternances de calcaires et de grès. Le Crétacé, quant à lui, est composé de formations gréseuses et carbonatées. Des dépôts alluvionnaires variés ont été apportés par les oueds. Cette géologie particulière crée des conditions propices à l'accumulation des eaux souterraines.

La zone abrite deux aquifères hydrogéologiques superposés, séparés par une couche d'argiles plastiques, de marnes et d'argiles sableuses. Cette couche joue un rôle protecteur essentiel en prévenant l'intrusion d'eau salée dans les aquifères profonds, malgré l'existence de zones de contact formant une nappe mixte. La nappe phréatique est principalement constituée de sables, graviers, galets argileux et argiles sableuses (Mio-Plio-Quaternaire). La nappe

profonde, quant à elle, débute avec des argiles et marnes miocènes au nord, puis évolue vers des formations grésos-carbonatées du Crétacé (Barrémo-Bédoulien, Albien) au sud.

L'analyse de la carte piézométrique de la zone révèle plusieurs points clés:

Des zones à fort écoulement, avec des directions principales orientées Sud-Nord, Sud-Est et Nord-Ouest-Sud-Est.

L'alimentation de l'aquifère superficiel provient des massifs périphériques de la plaine, d'où partent les axes d'écoulement, lesquels convergent vers la dépression du Chott-El-Hodna.

Chapitre III



Caractérisation hydrochimique et classification de la qualité des eaux souterraines de Maadher-Boussaâda



Chapitre III Caractérisation hydrochimique et classification de la qualité des eaux souterraines

III-1. Introduction

La composition chimique de l'eau présente dans l'environnement naturel peut varier considérablement. Ceci est déterminé par les caractéristiques géologiques du sol d'où il est extrait et aussi par les matières polluantes qu'il a pu croiser durant son écoulement. Par conséquent, la qualité des eaux souterraines est déterminée par leur composition quantitative et qualitative en matières suspendues et dissoutes, qu'elles soient de nature organique ou minérale (Jain et al. 2005). Toutefois, cette qualité peut être compromise si des éléments extérieurs entrent en interaction avec l'aquifère. Il en va ainsi des substances indésirables ou même toxiques qui rendent les eaux souterraines non potables et nuisibles pour diverses applications, y compris comme eau potable. L'exploitation excessive des ressources naturelles et l'accroissement des activités humaines ont entraîné de sérieux problèmes de qualité de l'eau souterraine (Foster et al. 1995).

Dans ce contexte une approche pour la caractérisation et l'appréciation des processus hydrogéochimiques (Origine et évolution spatio-temporelle) des eaux souterraines exploitées de l'aquifère mixte de la région Maadher situé au Nord-est de Boussaâda, a été effectuée sur les résultats d'analyses des eaux d'une campagne de prélèvement de 30 échantillons d'eau, extraies des forages de profondeurs varient de 80 à 120 m, en février 2025 par laboratoire de qualité de l'algérienne des eaux (ADE) (Figure III 1). L'étude et le l'analyse des résultats des données sont effectués par les méthodes graphiques et statistiques telles que ; Diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff, les graphes bivariés, la méthode statistique (ACP), les indices de classification de qualité des eaux pour l'irrigation et l'indice de qualité de l'eau pour la potabilité.

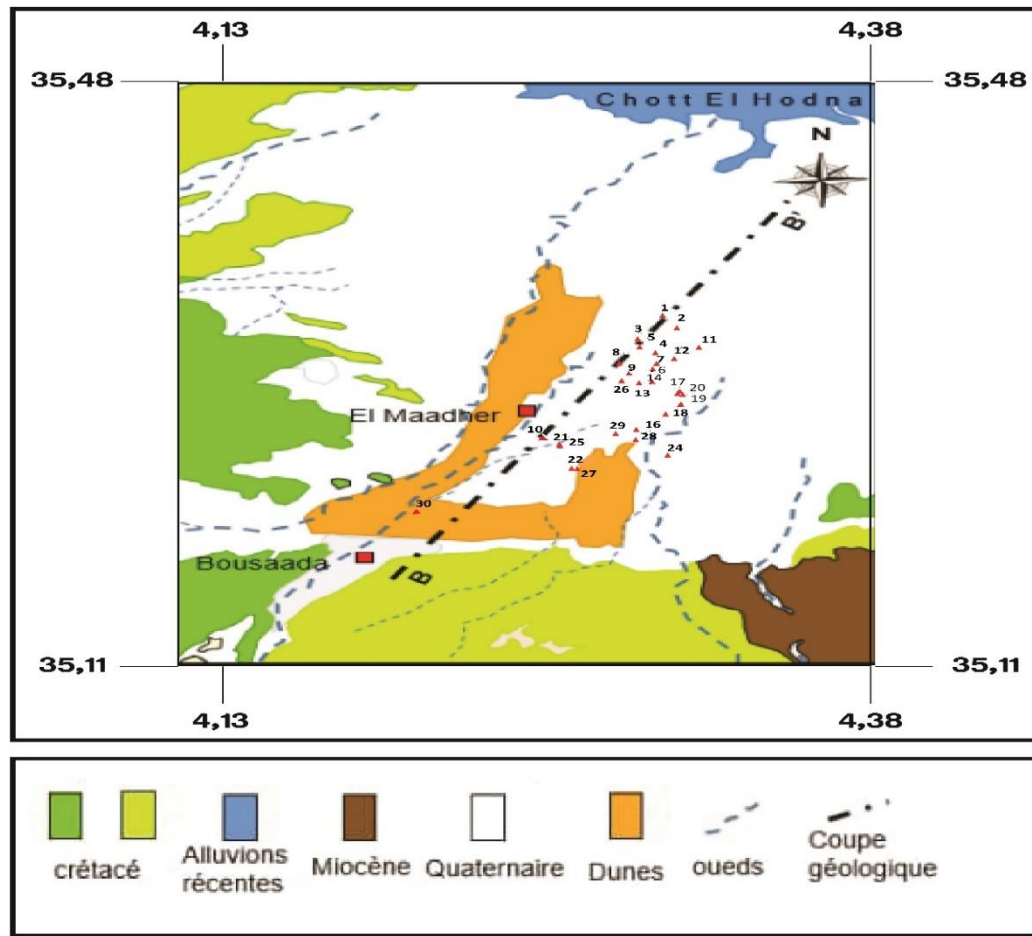


Figure III 1. Localisation géographique des forages étudiés-Campagne février 2025.

III.2. Fiabilité des résultats des échantillons mesurés au laboratoire

Pour apprécier la qualité des résultats des analyses chimiques des échantillons d'eau, une vérification a été faite par l'analyse de la balance ionique selon la formule suivante :

$$\text{Balance ionique (en \%)} = [(\sum \text{cations} - \sum \text{anions}) / (\sum \text{cations} + \sum \text{anions})] * 100. \text{ (meq/l).}$$

Le résultat donne une valeur acceptable inférieure à 8% (10 à 15% - Cüneyt, 2002) et Les eaux analysées présentent en générale un équilibre ionique.

III-3. Analyse hydrochimique générale des données

Les données permettent de calculer les paramètres statistiques des éléments chimiques des eaux souterraines : Minimum ; Maximum ; Moyenne ; Ecart type et le coefficient de variation pour chaque éléments chimique (Tableau III 1). Ces paramètres sont comparés aux normes de l'OMS et Algériennes (2011).

Variable	Norme Algérienne (2011)	Norme OMS 2011	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)
T (°C)	25	/	23,00	30,30	25,93	1,81	0,07
pH	6.5 – 8.5	6.5-9.5	6,54	7,89	7,34	0,40	0,06
CE	2800	1500	934,00	3420,00	2061,10	556,42	0,27
TH	200	500	1,32	1650,00	904,71	304,16	0,34
TDS	/	1000	507,00	3420,00	2007,13	644,39	0,32
Ca	200	75	108,22	521,04	221,74	85,28	0,38
Mg	150	100	36,46	131,25	89,71	24,93	0,28
Na	200	200	42,78	196,91	95,66	36,80	0,38
K	12	20	5,10	8,10	6,40	0,76	0,12
HCO ₃	/	300	149,50	317,00	199,09	40,98	0,21
Cl	500	250	149,45	600,00	219,43	94,66	0,43
SO ₄	400	250	250,00	905,00	579,50	161,30	0,79
NO ₃	50	50	12,00	407,00	137,39	103,31	0,75

Tableau III 1. Données statistiques des paramètres physico-chimiques, compagne février 2025

T en (°C), CE en (µS/cm), pH sans unité, les autres paramètres en (mg/l)

III.3.1. Le Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH est une mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes H⁺ d'une solution, représente l'acidité ou l'alcalinité du milieu aqueux. Le pH d'une solution correspondant à la concentration $[H^+] = -\log_{10}(H^+)$. Cependant le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique de l'aquifère et du bassin versant traversé (Dussart, 1966 ; Bermond et Vuichard, 1973). Dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 alors que dans les eaux tièdes, celui-ci doit être compris entre 5 et 9 (Hcefler, 2007).

Selon les résultats obtenus (Figure III.2), les eaux souterraines présentent un pH variant de 6,54 à 7,89. Les valeurs de pH mesurées à différents points d'eau se situent dans la plage

recommandée pour l'aptitude nutritionnelle par l'Organisation mondiale de la santé, qui est de 6,5 à 9,5.

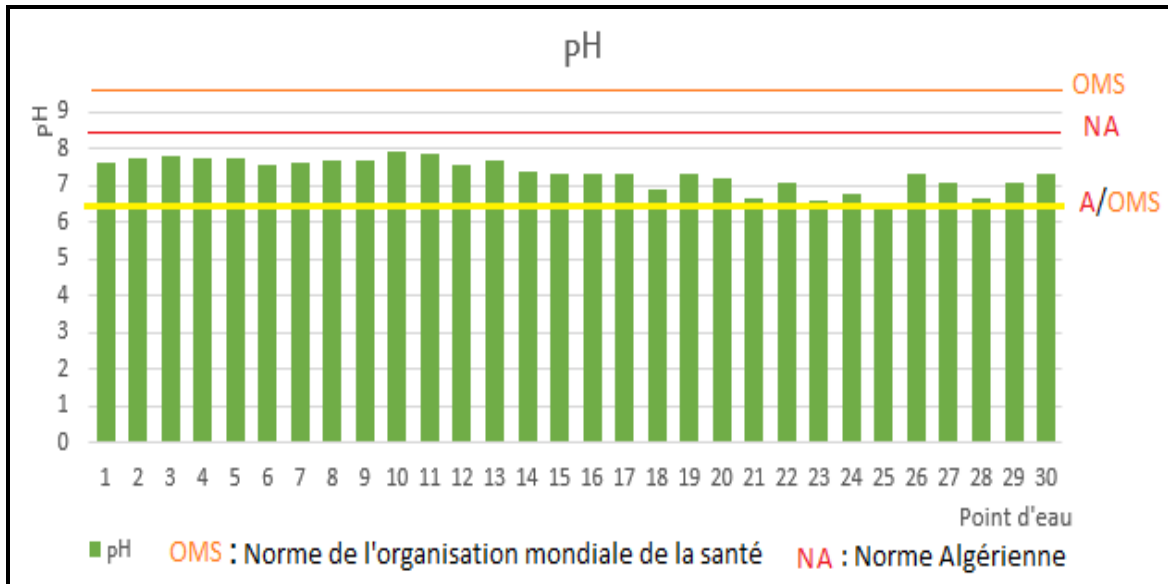


Figure III.2. Variation de pH dans les eaux des forages étudiées

III-3. 2. La conductivité électrique (CE) :

D'après les valeurs de la conductivité électrique et la norme de l'OMS (Figure III.3). On remarque que 93,33% des eaux de la zone Maadher ont des concentrations élevées à très élevées, avec une valeur maximale de 3420 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux sont considérées plus conductrices et plus minéralisées.

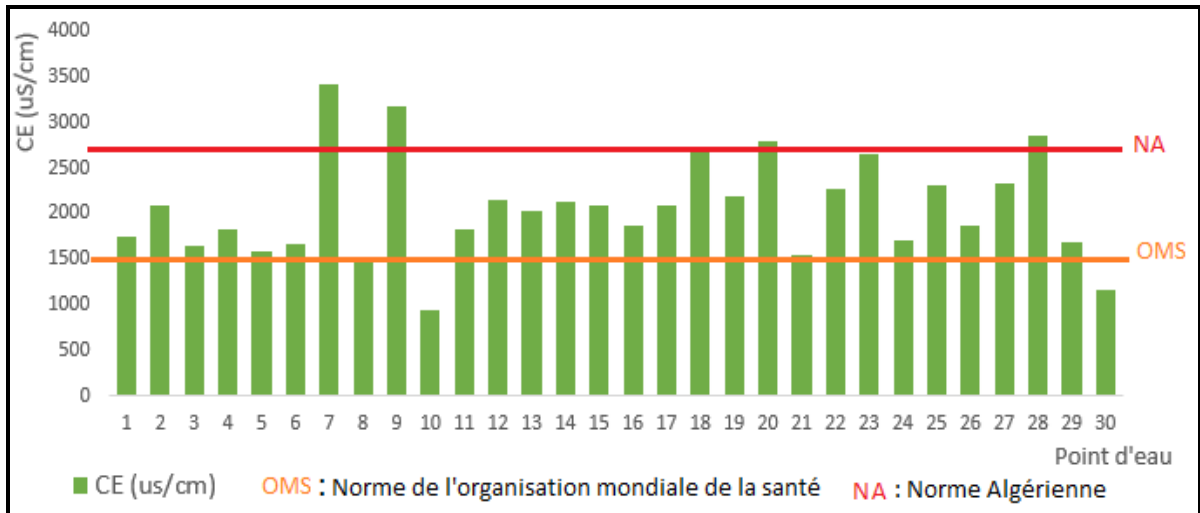


Figure III.3. Variation de CE dans les eaux des forages étudiées

III-3. 3. La dureté totale (TH) :

La dureté d'une eau traduit sa teneur globale en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). Elle est exprimée en (ppm ou mg/l) de $CaCO_3$, en degrés français ou en meq/l (Figure III.4). Nous remarquons que plus de 93% des eaux ont une dureté élevées à très élevées et dépassant la norme de l'OMS (Figure III-3).

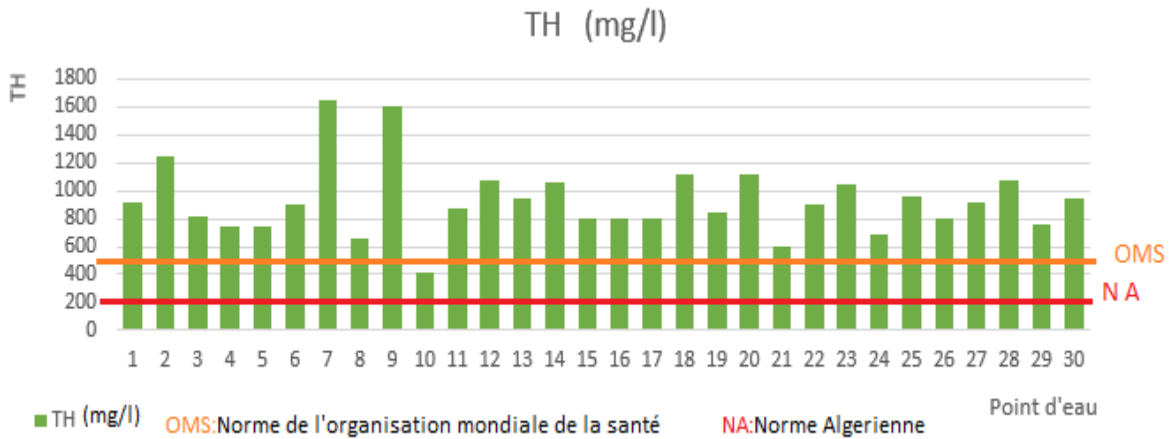
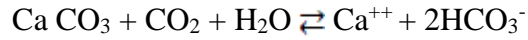


Figure III-4. Variation de la dureté totale dans les eaux des forages étudiées

III.3.4. Le Calcium (Ca^{++}) :

Le calcium est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates, fréquent dans les roches sédimentaires sous forme aussi de carbonates ; calcite, dolomite et aragonite. Il provient

principalement de la dissolution des roches carbonatées sous l'effet de la présence du gaz carbonique. Par ailleurs, le calcium peut également être issu des formations de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles selon l'équation suivante :



L'analyse des résultats (Figure III.5) montre que toutes les valeurs excèdent la norme de l'OMS (75 mg/l). 53,33% des eaux dépassent la norme limite Algérienne (200 mg/l) et caractérise les eaux des forages (1, 2, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 18, 20, 23, 25, 28 et 30), probablement à cause de : La dissolution des roches carbonatées, l'impact des formations gypseuses et le flux des eaux souterraines (Figure III-5).

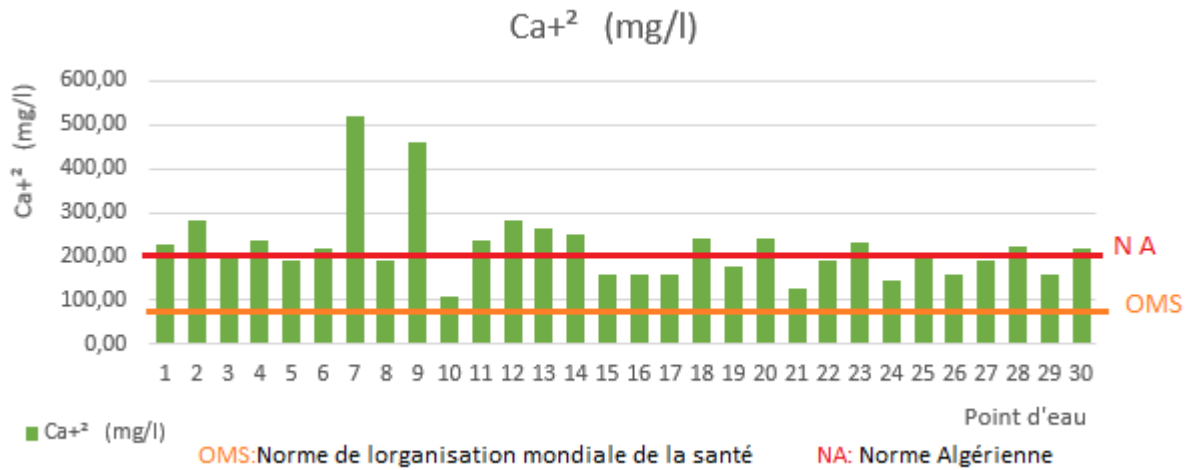


Figure III-5 Variation d'ion de calcium dans les eaux des forages étudiées

III.3.5. Le magnésium Mg^{2+}

La teneur en magnésium dépend, comme celle du calcium, de la composition des roches sédimentaires traversées par l'eau. Son origine est liée à :

- ✓ L'altération des roches magnésiennes sous l'action de l'acide carbonique (H_2CO_3).
- ✓ La dissolution des minéraux tels que les carbonates, bicarbonates et magnésite (MgCO_3), libérant ainsi le magnésium sous forme soluble.

D'après la (Figure III-5), 100 % les eaux de la zone d'étude présentent des concentrations en magnésium inférieures à la norme Algérienne (150 mg/l). Cependant 30% des eaux forages (2, 9, 14, 20, 22 ; 23, 25, 27, 28) dépassent la norme limite de l'OMS (100mg/l).

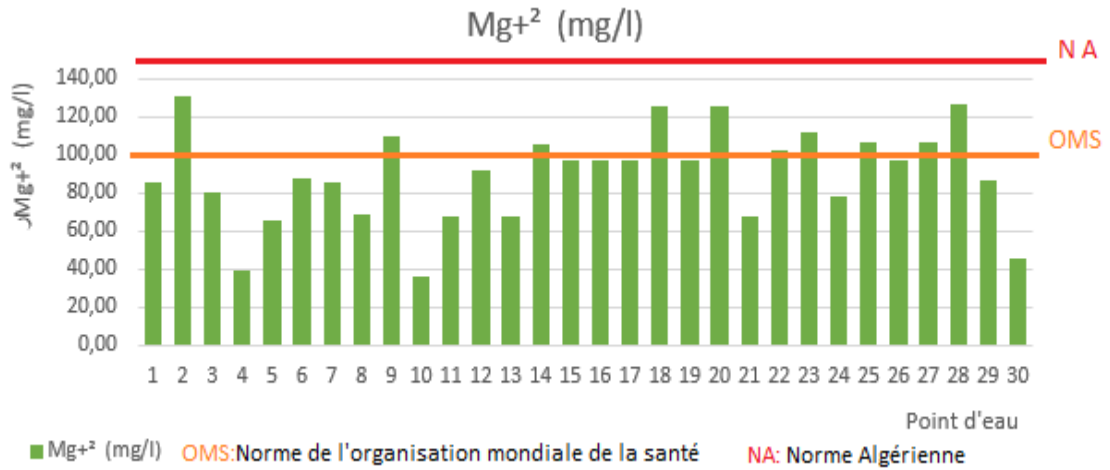


Figure III.5 Variation d'ion de magnésium dans les eaux des forages étudiées

III.3.6. Le sodium Na⁺ :

Le sodium est un élément extrêmement répandu dans l'environnement naturel, notamment dans l'eau de mer, et il trouve également son origine dans le lessivage ou la percolation des sols salins. Sa fonction dans l'irrigation est cruciale du fait de son impact sur la perméabilité des terres.

L'examen de la figure III .6, montre que la totalité des eaux ont un niveau de sodium dans la norme de la potabilité (200mg/l).

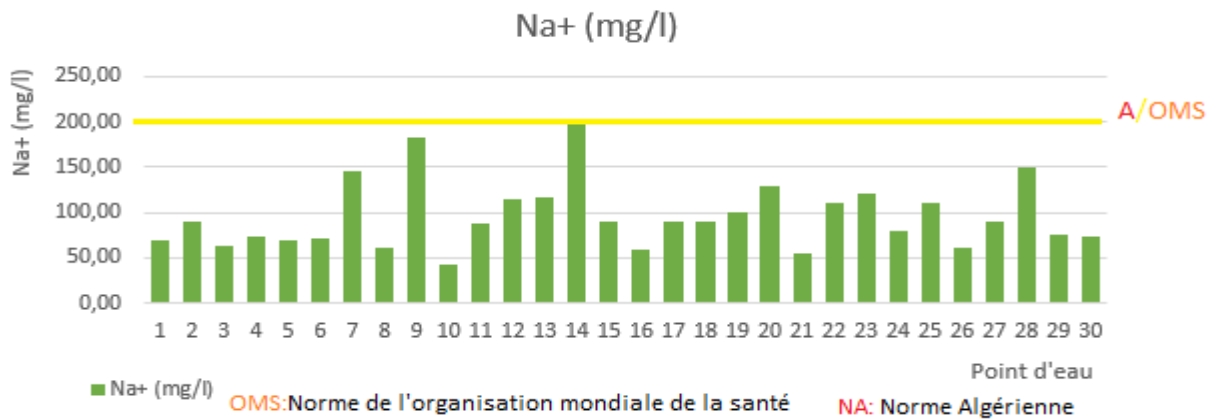


Figure III-6 Variation d'ion de sodium dans les eaux des forages étudiées

III.3.7. Le potassium K⁺ :

Selon l'OMS, la concentration autorisée de potassium est de 20 mg/l. Si cette limite est dépassée, l'eau peut acquérir un goût déplaisant. L'examen du graphique (Figure III-8)

indique que toutes les eaux de la zone Maadher présentent des teneurs en potassium en dessous de la norme de l'OMS, oscillant entre 5,1 et 8,1 mg/l.

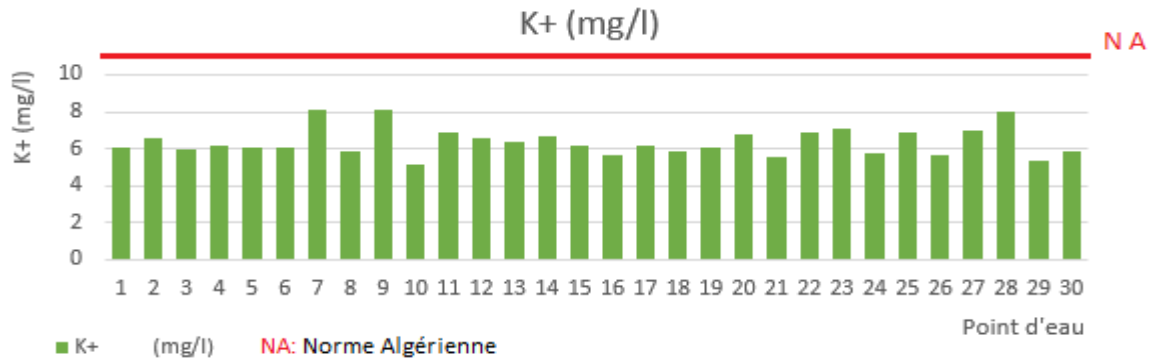


Figure III-7 Variation d'ion de potassium dans les eaux des forages étudiées

III.3.8. Les chlorure Cl⁻ :

Les chlorures peuvent être issus d'une incursion d'eau salée, ou résultent de l'intervention humaine via le dégel des routes, ou encore par la pollution des eaux résiduaires. Ils peuvent aussi résulter de la dissolution des sels par le lessivage des sols salins. Les chlorures ajoutent une saveur désagréable et soulèvent la question de la corrosion dans les tuyaux et les réservoirs.

L'absence des rejets industriels et la distance par rapport à la mer suggèrent une provenance géologique liée aux formations salifères, argileuses et marneuses du Trias.

Selon la Figure III.8, la majorité des eaux de la zone Maadher présentent des concentrations en chlorures inférieures à la limite maximale autorisée par l'OMS et Algérienne (250, 500 mg/l), à l'exception de 20% des eaux des forages ; 2, 7, 9, 12, 13, 14 dépassant la limite de l'OMS et 6.66% des eaux des forages ; 7 et 9 dépassant la limite Algérienne. Cela probablement dû à la dissolution des sels par lessivage des sols salins, l'évacuation et la percolation des eaux usées, notamment issues d'un grand nombre de fosses septiques dans la région, ainsi qu'à l'intrusion d'eaux salines .

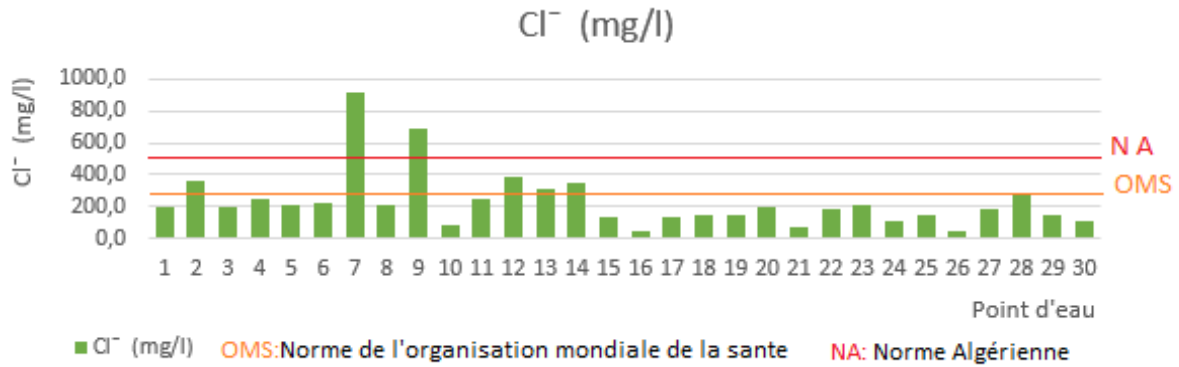


Figure III-8 Variation d’ion de chlorure dans les eaux des forages étudiées

III.3.9 Les sulfate SO₄²⁻ :

Les sulfates présents dans l'eau souterraine proviennent de la dissolution du gypse (CaSO₄ 2H₂O), de l'emploi des fertilisants chimiques, et du lessivage des sols argileux et marneux. Elles sont également issues des eaux résiduaires industrielles. En outre, l'oxydation du H₂S et des oxydes de soufre libérés dans l'air provoque, lors des précipitations, une acidification des lacs et rivières, ainsi qu'une hausse de la concentration en sulfates. Une forte teneur en sulfates peut entraîner des problèmes gastro-intestinaux ; elle peut également altérer le goût de l'eau et provoquer la formation de dépôts persistants dans les chaudières.

Suite à l'étude des résultats des analyses chimiques et statistiques (Figure III-9), on constate que 83,33 % des eaux de la zone d'étude dépassent la norme de l'Organisation mondiale de la santé OMS (400 mg/l), avec une valeur maximale de 905 mg / l.

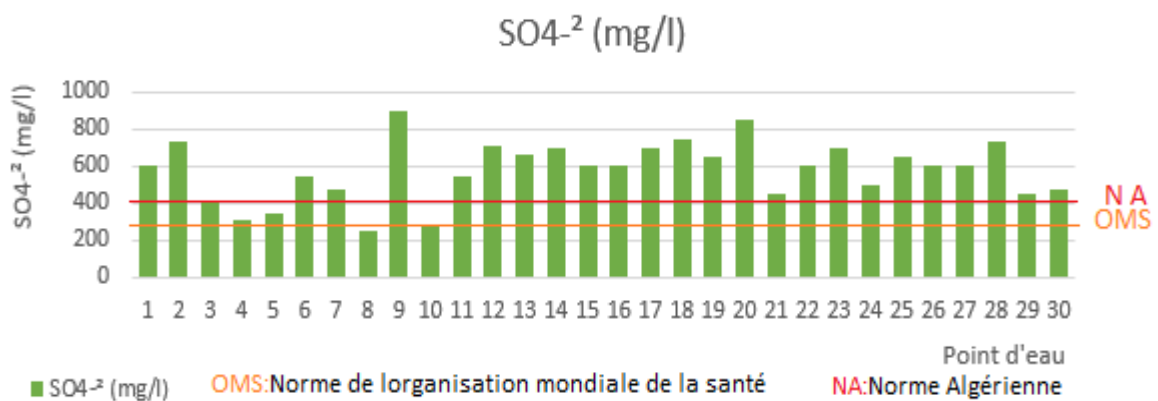
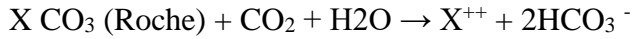


Figure III-9 Variation d’ion de bicarbonates dans les eaux des forages étudiées

III.3.10 Les bicarbonates HCO₃⁻ :

Les bicarbonates proviennent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le dioxyde de carbone, conformément à l'équation générale ci-dessous :



Ces éléments trouvent leur source principale dans la dissolution des roches carbonatées, ce qui implique que leur concentration dans l'eau est conditionnée par les paramètres suivants:

- ✓ Niveau de CO₂ dissous ;
- ✓ Température de l'eau ;
- ✓ pH de l'eau.

D'après la figure III 10, le point d'eau 30 affiche le taux le plus élevé de bicarbonates avec 317 mg/l, tandis que la valeur la plus basse est relevée au point d'eau 7 avec 149,5mg/l.

Cette hausse est essentiellement attribuée à la dissolution des roches carbonatées et au lessivage des sols sédimentaires (Figure III-10).

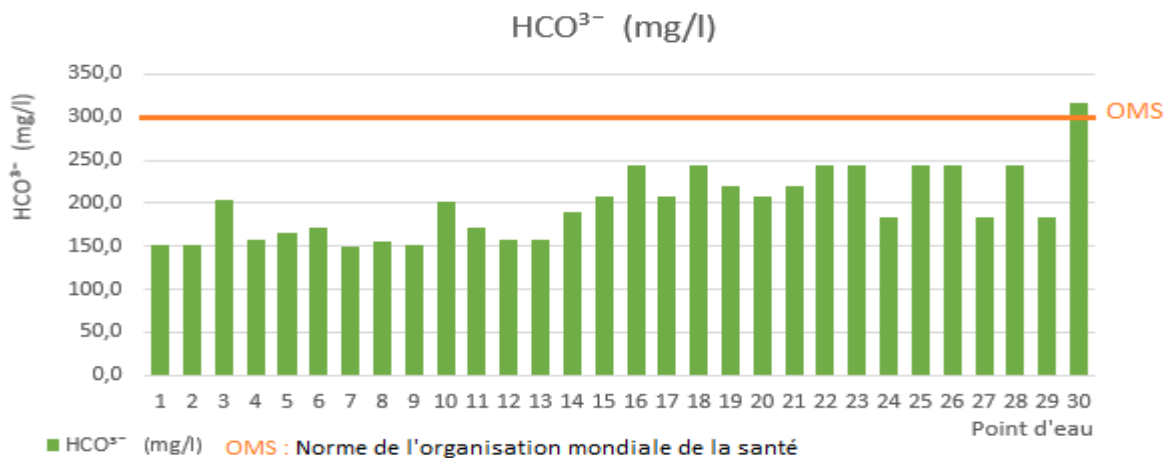


Figure III-10 Variation d'ion de sulfate dans les eaux des forages étudiées

III.3.11 . Les nitrates NO₃⁻ :

Les nitrates sont des substances naturelles que l'on retrouve dans tous les écosystèmes. Ils sont cruciaux pour la croissance des plantes, mais peuvent être préjudiciables aux végétaux et aux animaux en cas de surabondance. De plus, les nitrates font partie

intégrante de certains engrais chimiques et organiques comme le fumier. Les cours d'eau, les lacs et les étangs peuvent renfermer des nitrates venant de différentes sources, y compris les zones agricoles où l'utilisation d'engrais est courante, les fermes d'élevage et les pâtures, sans oublier les stations d'épuration des eaux usées. Cela suggère une provenance majoritairement agricole (engrais, élevage) et urbaine (égouts). On évalue la concentration de nitrates dans l'eau potable en termes de volume d'azote qu'ils contiennent ou en fonction de la quantité d'oxygène et d'azote. Les seuils autorisés pour les nitrates dans l'eau potable sont fixés à 50 mg/l, exprimés en mg/l de nitrate NO_3 , lorsque l'oxygène est mesuré sous forme d'azote. Un niveau trop élevé de nitrates, qui dépasse les normes établies, peut représenter un risque pour la santé des êtres humains, notamment pour les bébés.

Les résultats obtenus à partir de la Figure III-11, montrent que 86.66% de la totalité des eaux de la zone d'étude présentent des concentrations en nitrates dépassant la norme établie par l'OMS (50 mg/l) et les valeurs extrêmes sont enregistrées aux points d'eau 7 et 8, avec (400 et 407mg/l). Cette hausse est majoritairement attribuée à l'emploi d'engrais (engrais chimiques, fumiers, etc.), l'utilisation des eaux usées (fosses septiques) et le lessivage des sols agricoles durant la saison des pluies.

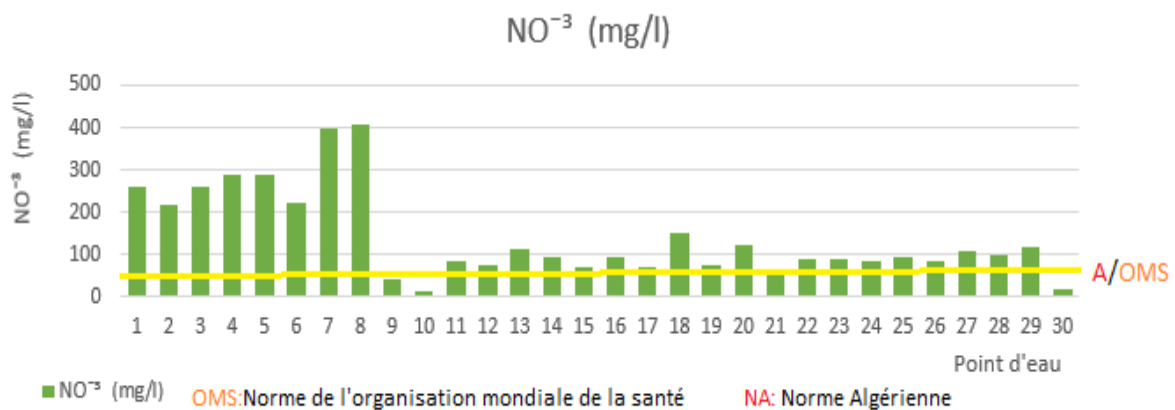


Figure III-11 Variation d'ion de nitrates dans les eaux des forages étudiées

III-4. Faciès chimiques des eaux souterraines de la zone Maadher :

III-4.1. Diagramme de Piper

La détermination des faciès chimiques des eaux souterraines de la zone Maadher a été effectué par le diagramme de piper et celui de Schoeller – Berkaloff.

Le diagramme de Piper est fréquemment utilisé pour illustrer les classifications de l'eau ainsi que les évolutions de la qualité de l'eau pour des ensembles d'échantillons (Dalton et al. 1978).

L'étude du faciès chimique des eaux souterraines dans la région de Maadher (campagne de février 2025) à l'aide du diagramme de Piper (Figure III-12), a montré la dominance de la famille du Faciès chimique : *Chloruré et sulfaté Calcique et magnésien*

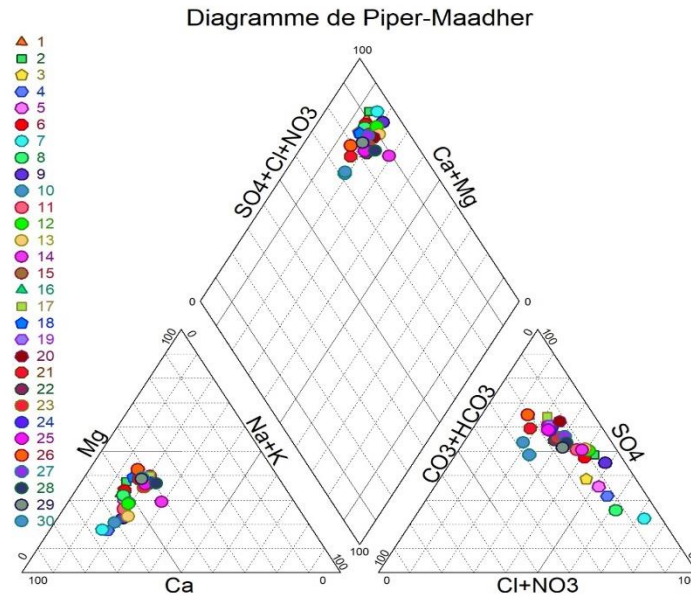


Figure III-12. Faciès chimiques des eaux souterraines - Maadher- Diagramme de Piper –

III-4.2. Diagramme de Schoeller – Berkloff :

Le diagramme de H. Schoeller (1932), révisé par Berkloff en 1952, est constitué de sept échelles logarithmiques verticales représentant les principaux ions analysés dans l'eau. Les données ont été représentées sur le diagramme (Figure III-13).

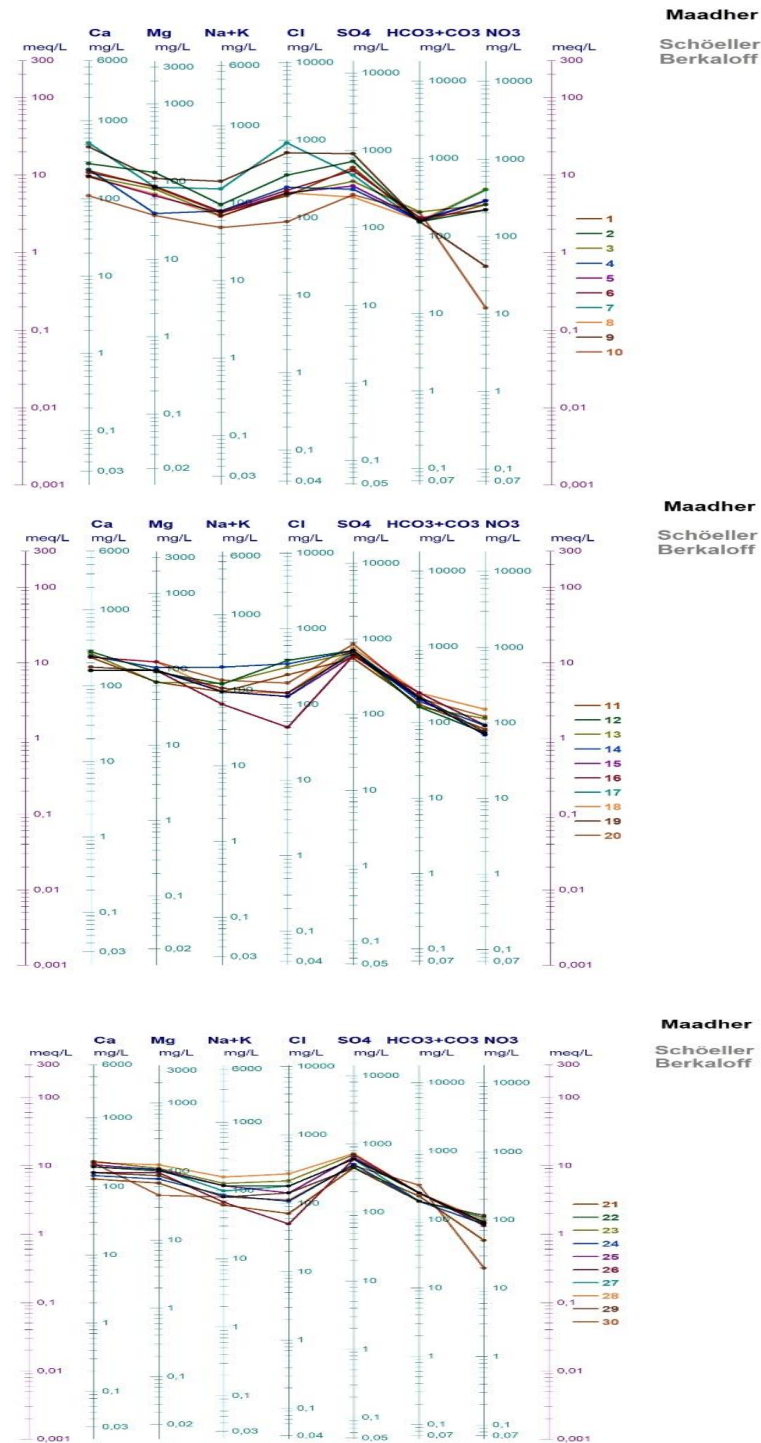


Figure III-13 Faciès chimiques des eaux souterraines – Maadher -Diagramme de Schoeller-Berkaloff -

L'analyse des résultats obtenus par la classification de diagramme de Schoeller - Berkaloff, révèle que les eaux de la zone d'étude présentent deux familles de faciès chimiques distinctes. La première famille est caractérisée par un faciès Sulfaté avec

86,67% de la totalité des points d'eau. La deuxième famille est de faciès Chloruré avec 13,33% de la totalité des points d'eau (Tableau III 2).

Tableau III 2. Faciès chimiques des eaux selon la méthode de Schoeller – Berkaloff

Compagne chimique Octobre 2024	Faciès chimiques		Effectif	Pourcentage (%)	
	Familles de Faciès Chimiques	Famille des Sulfaté		Sulfaté calcique	22
Sulfaté magnésien			4	13,33	
Famille des Chloruré		Chloruré calcique	4	13,33	13,34

III.5. Interaction eau-roche et processus hydrochimique

L'évolution de la chimie des eaux souterraines est analysée à l'aide du diagramme de Gibbs (1970). Cette technique permet de décrire le processus d'affinités de concentration chimique apparaissant dans les ressources en eaux souterraines. D'après Gibbs, la nature et la composition des eaux souterraines sont principalement contrôlées par trois types de facteurs : dominance de l'évaporation, dominance de l'altération des roches, et dominance de des précipitations.

Tous les échantillons d'eau de la région sont classés la zone de dominance évaporitique (Figure III-14).

L'évaporation est extrêmement élevée, ce qui explique la nature et la localisation de la zone d'étude, qui fait partie d'une région semi-aride. Les valeurs de TDS sont très élevées, ce qui nous indique une salinité importante, en particulier dans la partie nord-est de la zone d'étude, près du lac salé (Chott Hodna), causée par l'intrusion d'eau salée dans l'aquifère.

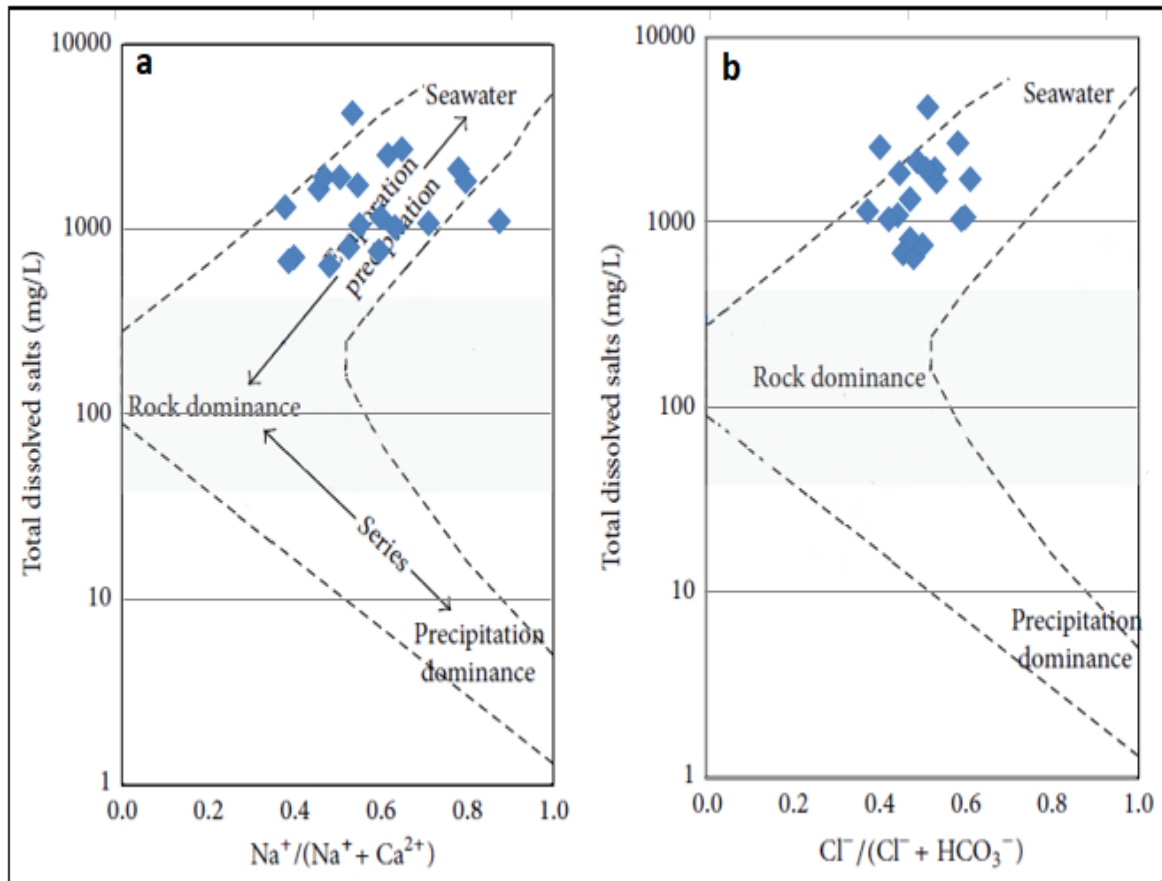


Figure III-14 : Diagrammes de Gibbs des échantillons d'eau souterraine de campagne 2025

Les rapports caractéristiques ($\text{SO}_4^{2-} / (\text{Ca}^{2+}) - (\text{Na}^+ / (\text{Cl}^-)) - (\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}))$) et $((\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}))$ (Figure III-15), montrent les différents processus hydrochimiques des eaux souterraines. La relation entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} (Figure III-15a), montre que la majorité des échantillons sont au-dessus de la ligne de dissolution et présentent un excès de Ca^{2+} , suggérant une dissolution des carbonates. Le chimisme des eaux souterraines est également important et contrôlé par le processus d'évaporation. Dans la Figure III-15b du rapport Cl^- en fonction de Na^+ , montre que 56,67% de l'ensemble des échantillons sont au-dessus de la droite (bissectrice 1/1), ce qui signifie que ces eaux sont influencés par la dissolution de l'halite, d'où l'accroissement de la salinité dans ces forages. D'après le rapport $(\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}))$, (Figure III-15c), on constate une minéralisation élevée des eaux souterraines, causée essentiellement de la dissolution minérale et l'échange d'ions inverse avec les éléments alcalino-terreux présents dans les aquifères. La Figure III-15d montre que tous les échantillons se situent au-dessus de la ligne bissectrice, révèlent leur acquisition d'un apport important provenant de l'altération des roches carbonatées.

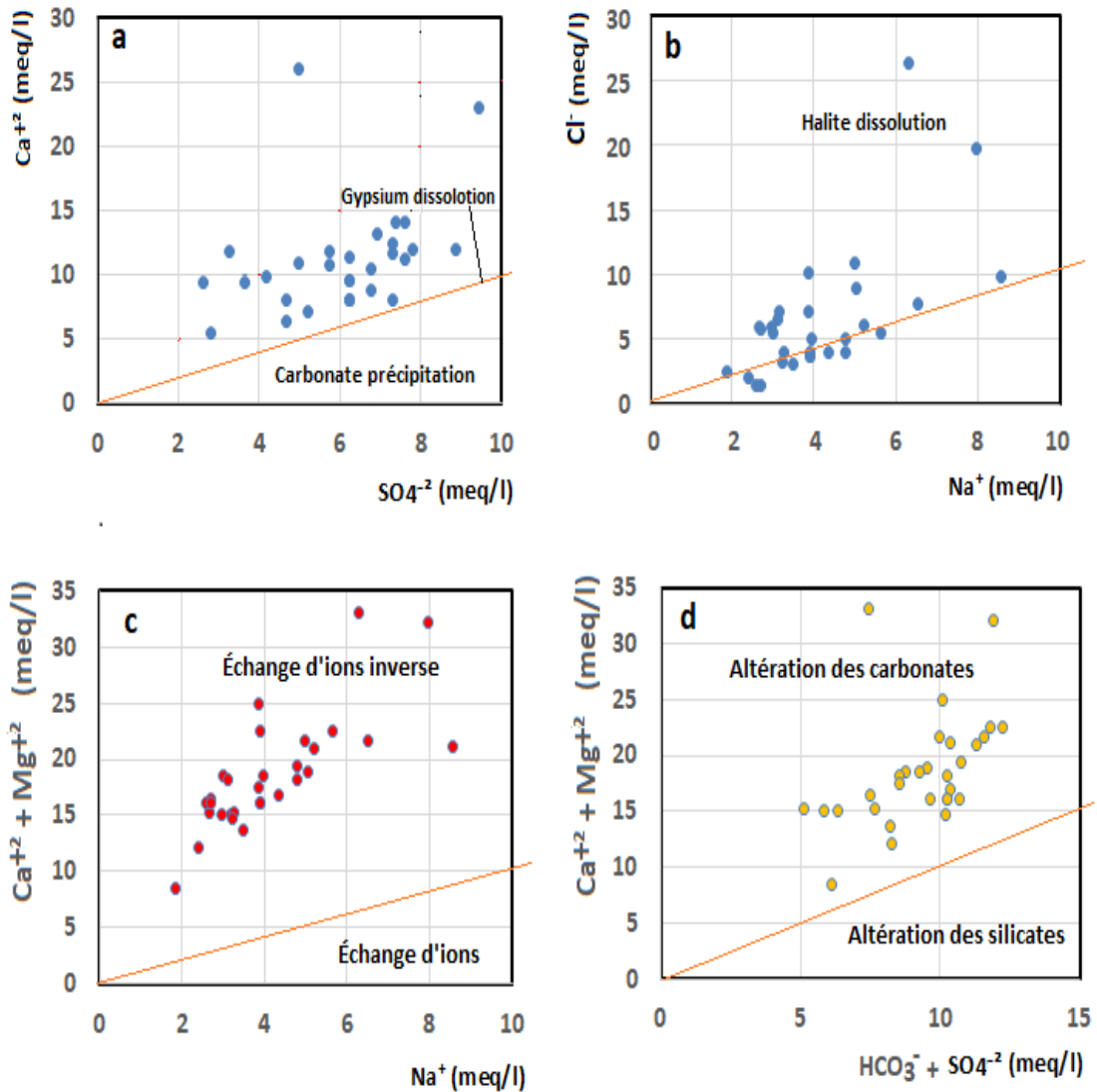


Figure VII 15. Graphes bivariés de : a) SO_4^{2-} en fonction de Ca^{2+} b) Na^+ en fonction de Cl^-
 c) Na^+ en fonction de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ d) $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ en fonction de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$

II.6. Niveaux de saturation minérale

III.6.1. Indice de saturation et équilibres chimiques

L'indice de saturation est un modèle d'équilibre décrit le degré d'équilibre chimique d'une solution aqueuse avec un minéral. et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Drever, 1997). Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral concerné n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité (K_{sp}) au produit d'activité ionique ($KIAP$) des ions de référence dans la solution.

Le degré de saturation peut être estimé à partir de l'équation suivante :

$$IS = \log (KIAP/Ksp)$$

Où :

IS = l'indice de saturation.

KIAP = le produit d'activité ionique des ions.

Ksp = le produit de la solubilité du minéral.

Généralement l'équilibre d'eau-roche est atteint quand $IS = 0$. Si le $IS > 0$, l'eau est supposé sursaturé, la précipitation des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre, par contre si le $SI < 0$, l'eau est sous-saturée, la dissolution des minerais est nécessaire pour atteindre l'équilibre.

III.6.1. Variation de l'indice de saturation des minéraux dissous :

Pour déterminer la variation des indices de saturation de quelques minéraux spécifiques dissous dans l'eau (l'aragonite, la calcite, la dolomite, l'anhydrite et le gypse) et suivre les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, on a utilisé l'outil de la thermodynamique (PHREEQC).

L'examen des résultats obtenus après calcul (Figure. III.16) en admettant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de - 0.5 à + 0.5, montre que la majorité des eaux sont sous-saturées en minéraux évaporitiques.

Tandis que pour les minéraux carbonatés on trouve que 10% des eaux sont sous-saturées par rapport à l'aragonite, 66,67% en état d'équilibre et 23,33% sont sursaturées ; concernant la calcite 60% en état d'équilibre et 40% sont sursaturées. Pour la dolomite, 60% sursaturées, 26,66% équilibrées et 13,33% sont sous-saturées.

Ces résultats renseignent sur une composition chimique des eaux instable et variée par les facteurs de changement climatique.

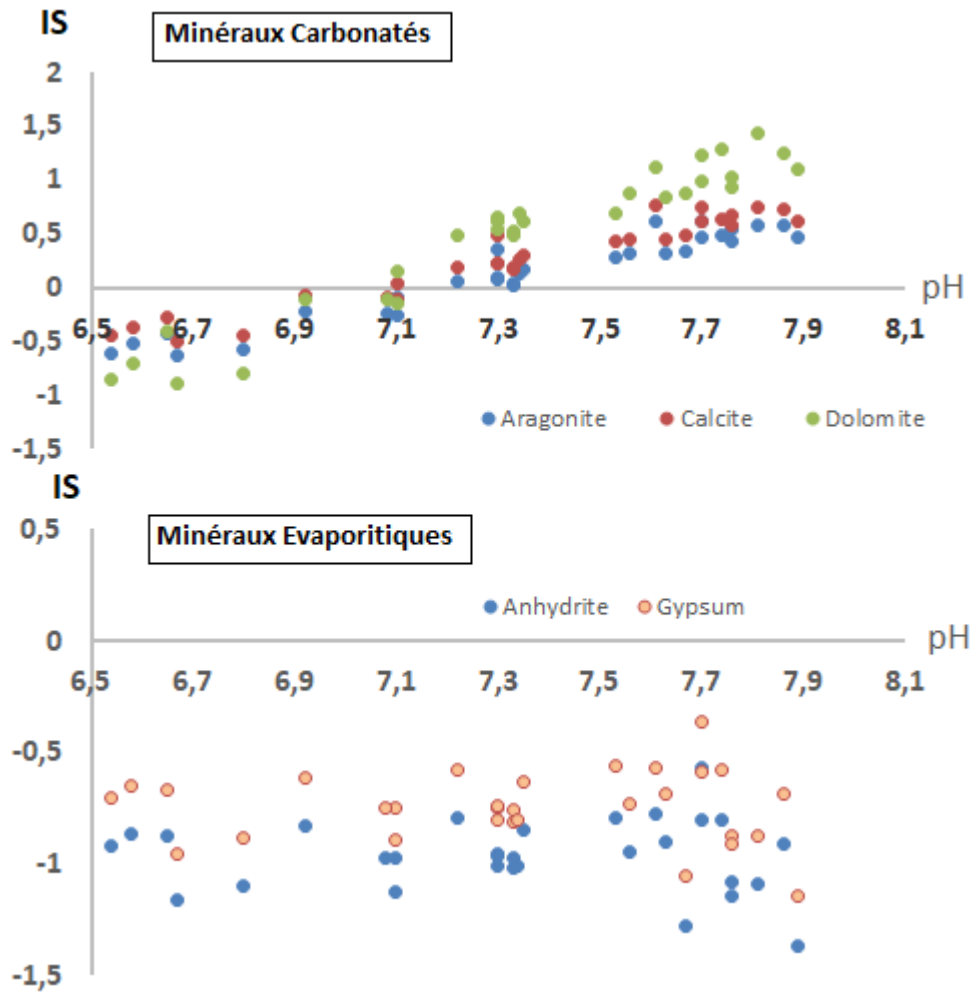


Figure III. 16. Indice de saturation minérale des eaux souterraines de la région de Maadher - Compagne Fév 2025 -

III. 7. Analyses de la qualité des eaux par la méthode statistique (ACP)

L'analyse en composantes principales, souvent notée ACP. C'est une méthode statistique descriptive multidimensionnelle, dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'informations contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des individus (Observations : Forages) et en colonnes par des variables quantitatives (Eléments physico-chimiques) : Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) et leur répartition.

III.7.1. Application de l'ACP sur des données chimiques de la zone d'étude :

L'ACP a été appliquée sur les données de la zone d'étude pour la période de février 2025, sur 30 échantillons et 13 variables, notamment, T (°C), pH, TDS, TH, la conductivité électrique (CE), Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} et les nitrates (NO_3^-), à l'aide du logiciel XLSTAT 2025. Cette analyse vise à synthétiser et classer un ensemble important de données, afin d'identifier les principaux facteurs responsables de l'évolution simultanée des variables et de leur relation réciproque (Biémi, 1992). Elle permet également de mettre en évidence les similarités entre deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution.

III.7.1.1. Corrélation des paramètres physico-chimiques :

La corrélation des éléments est distinguée par une matrice carrée caractérisée selon un coefficient de corrélation entre les variables, deux à deux (Degré d'association entre deux variables), (Wuersch, 2001).

Les différentes corrélations entre les variables deux à deux peuvent être déterminées sur la base du coefficient de corrélation significatif (critique) tiré de la table de Bravais-Pearson en fonction du nombre d'observations et de variables mis en jeu (Lefebvre, 1988). La corrélation entre les paramètres physico-chimiques dans les eaux souterraines permet de comprendre certains phénomènes résultant de l'interaction entre l'eau et la roche, et offre une approche pour expliquer l'origine commune de certains de ces paramètres.

Du tableau. III.3, ce coefficient sera égal à **rc = 0,5425**, avec le risque d'erreur de **2%**. La matrice de corrélation a été réalisée pour l'ensemble des prélèvements d'eau analysés (Tableau. III.3 et Tableau. III.4).

Tableau III 3. Coefficient de corrélation linéaire selon Bravais- Pearson

v / e	0.1	0.05	0.02	v / e	0.1	0.05	0.02
1	0.9877	0.9969	0.9995	17	0.3887	0.4555	0.5285
2	0.9000	0.9500	0.9800	18	0.3783	0.4438	0.5155
3	0.8054	0.8783	0.9343	19	0.3687	0.4329	0.5034
4	0.7293	0.8114	0.8822	20	0.3598	0.4227	0.4921
5	0.6694	0.7545	0.8329	25	0.3233	0.3809	0.4451
6	0.6215	0.7067	0.7887	30	0.2960	0.3494	0.4093
7	0.5822	0.6664	0.7498	35	0.2746	0.3246	0.3810
8	0.5494	0.6319	0.7155	40	0.2573	0.3044	0.3578
9	0.5214	0.6021	0.6851	41	0.2428	0.2875	0.3384
10	0.4973	0.5750	0.6581	50	0.2306	0.2732	0.3218
11	0.4762	0.5529	0.6339	60	0.2108	0.2500	0.2948
12	0.4575	0.5324	0.6120	70	0.1954	0.2319	0.2737
13	0.4409	0.5139	0.5923	80	0.1829	0.2172	0.2565
14	0.4259	0.4973	0.5742	90	0.1726	0.2050	0.2422
15	0.4124	0.4821	0.5577	100	0.1638	0.1946	0.2301
16	0.4000	0.4683	0.5425				

v: le degré de liberté. $v = n - p - 1$ avec n: le nombre d'observations.
p: le nombre de variables explicatives. e : le risque d'erreur.

Tableau III. 4: Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Maadher -Compagne Fév 2025 –

Var	T	PH	CE	TDS	TH	Na	Ca	Mg	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃
T	1												
PH	-0,299	1											
CE	0,262	-0,280	1										
TDS	0,221	-0,276	0,950	1									
TH	0,166	0,126	0,757	0,647	1								
Na	0,285	-0,157	0,769	0,721	0,666	1							
Ca	0,054	0,266	0,709	0,610	0,847	0,657	1						
Mg	0,243	-0,447	0,706	0,682	0,496	0,520	0,221	1					

K	0,220	-0,106	0,841	0,770	0,745	0,801	0,760	0,479	1				
HCO ₃	0,321	-0,594	-0,078	-0,110	-0,122	-0,106	-0,393	0,124	-0,158	1			
SO ₄	0,323	-0,310	0,694	0,614	0,573	0,670	0,362	0,810	0,537	0,127	1		
Cl	0,046	0,328	0,644	0,589	0,754	0,647	0,958	0,138	0,739	-0,523	0,225	1	
NO ₃	-0,174	0,397	0,073	0,062	0,178	-0,127	0,343	-0,129	0,102	-0,524	-0,438	0,396	1

D'après les résultats obtenus on peut distinguer selon le coefficient de corrélation critique des ensembles des couples dépendants et indépendants (Tableau III.5).

Tableau III 5: Ensembles des couples dépendants et indépendants.

Compagne – Février 2025		Coefficient de corrélation	Qualité de Corrélation
Couples	CE-TDS ; Ca-Cl.	> 0,90	Très bonne
	CE-K ; TH-Ca ; Na-K ; Mg-SO ₄ ;	0,80-0,90	Bonne
	CE-TH, CE-Na, CE-SO ₄ , CE-Ca ; Mg-CE ; Cl-CE ; TDS-TH ; TDS-Na ; Ca-TDS ; Mg-TDS ; K-TDS ; SO ₄ -TDS ; TH-Na ; TH-K ; TH-Cl ; Na-Ca ; Na-SO ₄ ; Na-Cl ; Ca-K ; K-Cl ;	0,60-0,80	Significative
	pH-HCO ₃ ; Cl-TDS ; TH-SO ₄ ; Na-Mg ; K-SO ₄ ; HCO ₃ -Cl ; HCO ₃ -NO ₃ ;	0,50-0,60	Moyenne
	Couples indépendants	< 0,5	Non significative

III.7.1.2. Etude des liaisons significatives entre les éléments physico-chimiques

L'examen du tableau III 5, montrent une très bonne corrélation entre la conductivité électrique CE avec les ions de Cl⁻ et TDS, avec $r > 0,9$, cela explique possiblement l'intrusion des eaux salées. Comme nous remarquons une bonne corrélation aussi de CE avec les ions de K, TH-Ca ; Na-K ; Mg-SO₄ ; avec $(0,8 < r < 0,9)$ et des corrélations significatives avec $(0,6 < r < 0,8)$ entre les couples (CE-TH, CE-Na, CE-SO₄, CE-Ca; CE- Mg ; CE- Cl ; TDS-TH ; TDS-Na; TDS-Ca ; TDS-Mg ; TDS- K ; TDS-SO₄ ; TH-Na ; TH-K ; TH-Cl ; Na-Ca ; Na-SO₄ ; Na-Cl ; Ca-K ; K-Cl ;). Ce qui indique une minéralisation élevée qui contribué directement dans l'accroissement de la salinité des eaux souterraines de la région d'El Maadher. Les ions moyennement corrélés (pH-HCO₃ ; Cl-TDS ; TH-SO₄ ; Na-Mg ; K-SO₄ ; HCO₃-Cl et HCO₃-NO₃), la corrélation des Cl- TDS est principalement due à la dissolution de chlorure de sodium NaCl dans l'eau, de l'intrusion marine, de l'activité agricole et les eaux usées. Cependant la corrélation des HCO₃-Cl, renseignent sur l'altération des roches carbonatées (calcite, dolomite) et HCO₃-

NO₃ due à l'utilisation des fertilisants dans l'activité agricole et les eaux usées (fosses septiques).

III.7.1.3. Corrélation entre les variables et les facteurs (Composantes)

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le Tableau .III.6.

Tableau.III.6 : Corrélations entre les variables et les Composantes

Variable	CP1	CP2
T	0,270	-0,407
PH	-0,106	0,842
CE	0,949	-0,141
TDS	0,885	-0,144
TH	0,866	0,161
Na	0,864	-0,122
Ca	0,831	0,432
Mg	0,657	-0,452
K	0,901	0,030
HCO ₃	-0,187	-0,790
SO ₄	0,712	-0,458
Cl	0,781	0,527
NO ₃	0,092	0,725

- Les valeurs en "Gras" indiquent les variables corrélées -

Les résultats des ACP en se basant sur le coefficient de corrélation critique de Pearson de $r = 0.5$ (Tableau. III.3), montrent les composantes significatives qui expriment l'ensemble de la variance (Tableau. III.7 et Figure III.17) : La première composante CP1 exprime 45,43 % de la variance totale, corrélé et chargé positivement par les éléments : CE, TDS, TH, Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻. Cette composante symbolise les éléments évaporitiques et carbonatés résultant de la dissolution de minerais et lessivage des terrains chargés en sels. La seconde composante CP2 est caractérisée par les chargements de NO₃⁻ positivement et de (HCO₃⁻) négativement et explique 26,78% de la variance totale, cette composante représente les eaux profondes caractérisées par dissolution importante des formations carbonatées et influencé par la pollution anthropique des nitrates, possiblement d'origine agricole due à l'eau d'irrigation et les eaux usées (Fosses septiques).

Tableau.III.7 : Pourcentage de variance

Composantes	CP1	CP2
Valeurs propres	6,36	3,75
% Variance exprimée	45,43	26,78
% Variance cumulée	45,43	72,21

III.7.1.4. Etude des observations (Forages) et détermination des groupes d'eau :

- ✓ La projection des observations sur les composantes (Facteurs) (CP1-CP2), explique 72,21 % de la variance totale et permis d'identifier deux groupes principaux des eaux souterraines (Figure III.18).
- ✓ Le premier groupe minéralisé est caractérisé par les éléments (G1 : SO₄, CE, Ca, Mg, Cl, Na, K, TDS) et dominé par le faciès Sulfaté, ce groupe est chargé sur CP1 et présente 36,67% des contributions des observations (Forages) et renferme : (G1 : F1, F7, F9, F10, F12, F14, F20, F21, F24, F29 et F30).
- ✓ Le second est carbonaté suggestionné par la pollution des nitrates (G2 : HCO₃⁻ et NO₃⁻), chargé sur CP2 et explique 63,33% des contributions des observations. Ce groupe est composé des points d'eau (G2 : F2, F3, F4, F5, F6, F8, F11, F13, F15, F16, F17, F18, F119, F22, F23, F25, F26, F27et F28).

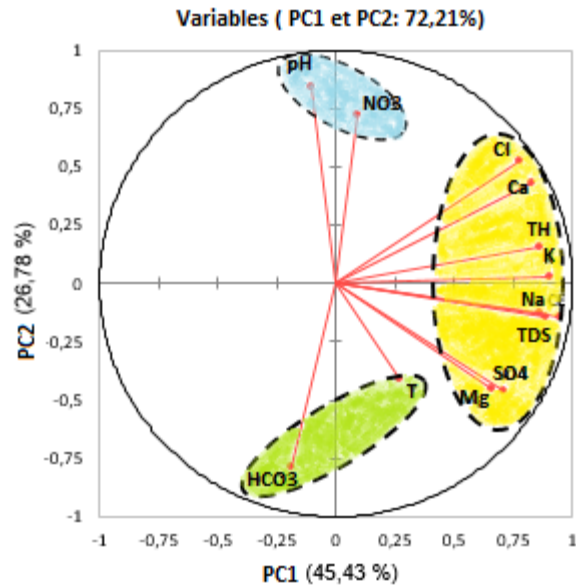


Figure III 17. Corrélation des variables avec les composantes principales - campagne Février 2025.

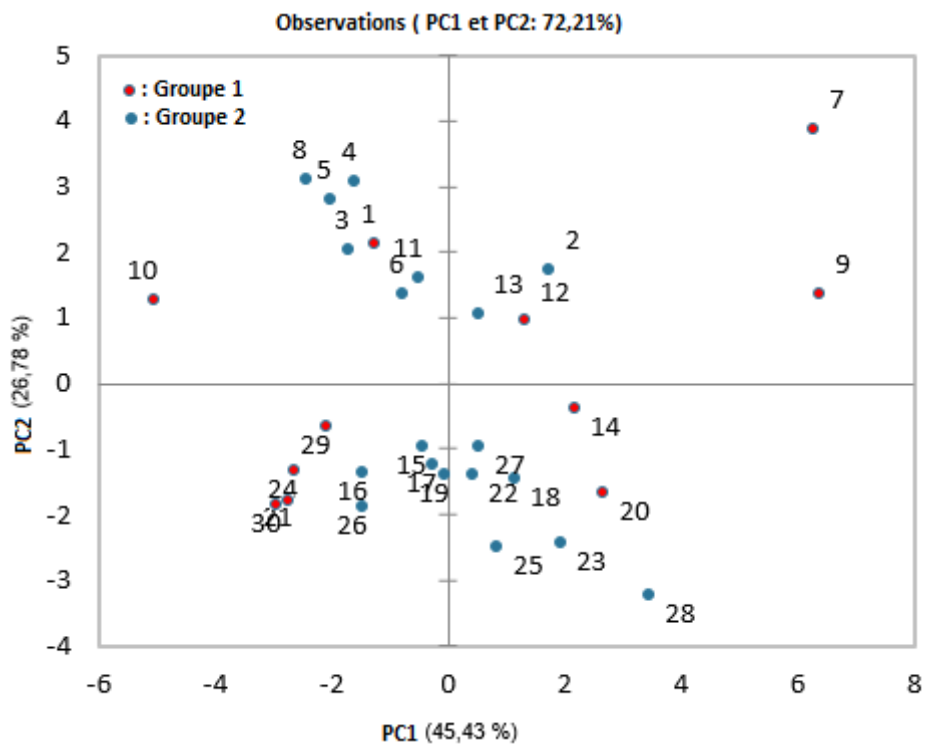


Figure III. 18. Représentation graphique des groupes des observations (Forages).

III .8. Evaluation de la qualité d'eau par les Indices de qualité

III .8.1. Indices d'évaluation d'aptitude des eaux à l'irrigation :

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines a été effectuée en se basant sur les normes fixées pour l'élevage et l'irrigation. La salinité et la sodicité sont reconnues comme étant les critères majeurs dans l'évaluation de l'eau destinée à l'irrigation (Sebei et al. 2018).

La qualité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation, qui influencent tant les végétaux que le sol, doit être connue et prise en compte. L'importante concentration de sel dans les eaux souterraines peut être à l'origine des modifications de la perméabilité, de la structure du sol et de la ventilation. Le drainage est un facteur de croissance des cultures. Tant qu'il y a un bon drainage, la croissance des cultures sera bonne et la croissance des cultures sera mauvaise en cas de mauvais drainage. Afin d'évaluer la pertinence de l'utilisation des eaux souterraines dans l'irrigation, il est nécessaire d'identifier les différentes caractéristiques de l'eau d'irrigation, à cet effet le rapport d'absorption de sodium (SAR), la solubilité du sodium Le pourcentage (SSP ou Na%), l'indice de Kelly (KI), l'indice de perméabilité (PI), le rapport de risque de magnésium (RRM), la dureté totale (TH). et l'indice de pollution par les nitrates (NPI), ont été calculés, Interpoler spatialement par le krigeage ordinaire et interprétés .

a) Le Taux d'absorption du sodium (SAR) :

L'équation suivante (Richard 1954) est utilisée pour calculer le Taux d'Absorption du Sodium (SAR). La valeur élevée de SAR diminue la conductivité hydraulique du sol, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité de l'irrigation. Selon les directives de la FAO (El Bilali et al. 2021), l'eau est jugée inadaptée à l'irrigation si sa valeur SAR dépasse 10 meq/l.

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

Où, les concentrations sont données en meq / l.

b) Pourcentage de sodium (Na%) :

L'estimation du taux de sodium (Na%) dans l'eau est essentielle pour la gestion hydrique à des fins d'irrigation, car une forte concentration de sodium dans l'eau et le sol entrave le développement des plantes en réduisant la perméabilité du sol (Khalid 2019). La formule suivante (Wilcox 1955) est utilisée pour évaluer le Na%.

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

Où, les concentrations sont données en meq / l.

c) Indice de perméabilité (IP) :

La perméabilité, qui est l'aptitude du sol à laisser passer l'eau et l'air, est déterminée à partir de certaines caractéristiques physiques importantes des sols, telles que la porosité et la perméabilité. L'utilisation prolongée de l'eau d'irrigation a eu un impact sur la perméabilité du sol, car elle est déterminée par l'eau souterraine contenant des ions tels que le Na^+ , le Ca^{2+} , le Mg^{2+} et le HCO_3^- présents dans le sol (Singh et al. 2013 a, Singh et al. 2013b). (Doneen, 1964) suggère une technique de catégorisation de l'eau d'irrigation fondée sur l'indice de perméabilité (IP).

L'expression de PI est donnée par la formule suivante.

$$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO_3}}{Ca + Mg + Na} \times 100$$

Où, les concentrations sont données en meq / l.

Les IP sont réparties en trois catégories : excellente, bonne et inappropriée, qui reflètent la qualité des eaux souterraines employées pour l'agriculture (Doneen, 1964 et Rangunath, 1987). Selon l'OMS (1993), la qualité des eaux souterraines est évaluée en tenant compte de l'IP comme suit : les Classes I et II sont jugées bonnes pour l'irrigation si elles présentent 75% ou plus de perméabilité maximale, tandis que la Classe III est considérée comme impropre lorsqu'elle a une perméabilité maximale de 25%.

d) La dureté totale (TH) :

L'expression « dureté totale » désigne une mesure qui résulte de la combinaison des concentrations en calcium et en magnésium, généralement exprimée sous forme d'équivalent de carbonate de calcium. L'eau dure est impropre à l'usage domestique ; la dureté de l'eau est définie comme l'inhibition de l'action du savon dans l'eau due à la précipitation de sels de magnésium et de calcium tels que les carbonates, les sulfates et les chlorures (Vasanthavigar et al. 2010). La dureté de l'eau restreint son emploi dans les secteurs industriels ; elle engendre le tartre dans les chaudières et les marmites, obstrue les conduites d'irrigation et peut également induire des soucis de santé chez l'homme, tels que des défaillances rénales et des pathologies cardiaques (Schroeder 1960). On calcule TH de la manière suivante (Todd 1980) :

$$TH = 2.5 \times Ca^{2+} + 4.1 \times Mg^{2+}$$

Où, les concentrations sont données en meq/l.

e) Le rapport de Kelly (KR) :

Le Ratio de Kelly (KR) est un indicateur crucial utilisé pour fournir des informations sur la qualité des eaux souterraines, en prenant en compte la teneur en sodium. On juge inappropriées les valeurs de KR qui dépassent 1, signalant des concentrations élevées de sodium, alors que celles inférieures à 1 sont jugées appropriées pour l'irrigation. L'équation est utilisée pour calculer le rapport de Kelly :

$$KR = Na^+ / Ca^{2+} + Mg^{2+}$$

Où, les concentrations sont données en meq / l.

f) Le risque associé au magnésium (RRM) :

Le risque associé au magnésium (RRM) est fonction des concentrations de magnésium et de calcium dans les eaux souterraines. Il participe aussi de manière cruciale à l'évaluation de la qualité des eaux souterraines. Le magnésium a un impact plus délétère sur les eaux souterraines que le calcium. Il est donc crucial de déterminer la quantité de magnésium. MH détermine le magnésium en fonction de la concentration en calcium à l'aide de l'équation ci-dessous.

$$RRM = \{Mg^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})\} \times 100 \quad \text{Où, les concentrations en meq / l.}$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau VII 8 :

Tableau III 8. Indices de qualité de l'eau d'irrigation de l'aquifère d'El Maadher

- Compagne Février 2025-

Intervalle	Classification	Nombre d'échantillons	% d'échantillons
Risque d'alcalinité SAR (Richard 1954)			
<10	Excellent	Tous les échantillons	100%
10-18	Bon	-	-
18-26	Douteux	-	-
>26	Inapproprié	-	-
dureté totale (TH) (Todd 1980)			
<75	Souple	20	-
75-150	Dureté moyenne	-	-
150-300	Dur	1	-
>300	Très dur	-	100%

% de sodium (Na %)	(Wilcox 1955)			
<60		Appropriée	Tous les échantillons	100%
> 60		Inappropriée	-	-
Indice de perméabilité (IP)	(Doneen, 1964)			
>75		Bonne	-	-
25-75		Douteuse	22	73,33%
<25		Inappropriée	8	26,67%
Le rapport de Kelly (KR)	(Kelly (1940))			
<1		Appropriée/ Bonne	Tous les échantillons	100%
>1		Inapproprié/Mauvaise	-	-
Risque associé au magnésium (RRM)	Paliwal (1972)			
<50		Appropriée	Tous les échantillons	100%
>50		Inapproprié	-	-

Le calcul de SAR révèle que la totalité des échantillons d'eau (100 %), présente une valeur inférieure à 10 meq/l et l'interpolation spatiale met en évidence une zone homogène classée dans la catégorie de qualité excellente pour l'irrigation. D'après l'analyse des résultats de calcul de l'indice Na% montre que 100% des échantillons d'eau sont appropriées à l'irrigation, dont Na% < 60. L'analyse des résultats de calcul de l'indice IP montre que 26,67% des échantillons sont des eaux inappropriées à l'irrigation et concernent les eaux des forages (1, 2, 7, 8, 11, 12, 14,18), tandis que 73,33% sont douteuse et caractérisent les eaux de reste des forages.

Les résultats de calcul de l'indice TH donnent 100% des eaux >40 et de catégorie très dure. L'analyse des résultats de calcul de Kelly (KR) montre que 100% sont des eaux <1, sont appropriées à l'irrigation. D'après l'analyse des résultats de calcul de l'indice RRM on trouve que 100% des échantillons eaux sont <50, appropriées à l'irrigation.

L'interpolation spatiale effectuée par krigeage ordinaire (Fig. III.19) montre la distribution spatiale des valeurs des indices de qualité de l'eau pour l'irrigation et met en évidence une zone homogène classée dans la catégorie de qualité Excellente, Très dure et

Appropriée pour l'irrigation, successivement en ce qui concerne le SAR, TH, Na%, KR et RRM (Fig. III.19 a,b,c,e,f).

Cependant pour l'indice de perméabilité PI (Fig. III.19d), on remarque que 26,67% des eaux des forages (1, 2, 7, 8, 11, 12, 14,18) situés au centre et Nord-est de la zone d'étude sont inappropriées à l'irrigation, cela revient possiblement au colmatage du sol par les sels et la réduction de sa capacité de transmettre l'eau. Tandis que 73,33% des eaux sont utilisables et clustrent le reste des forages.

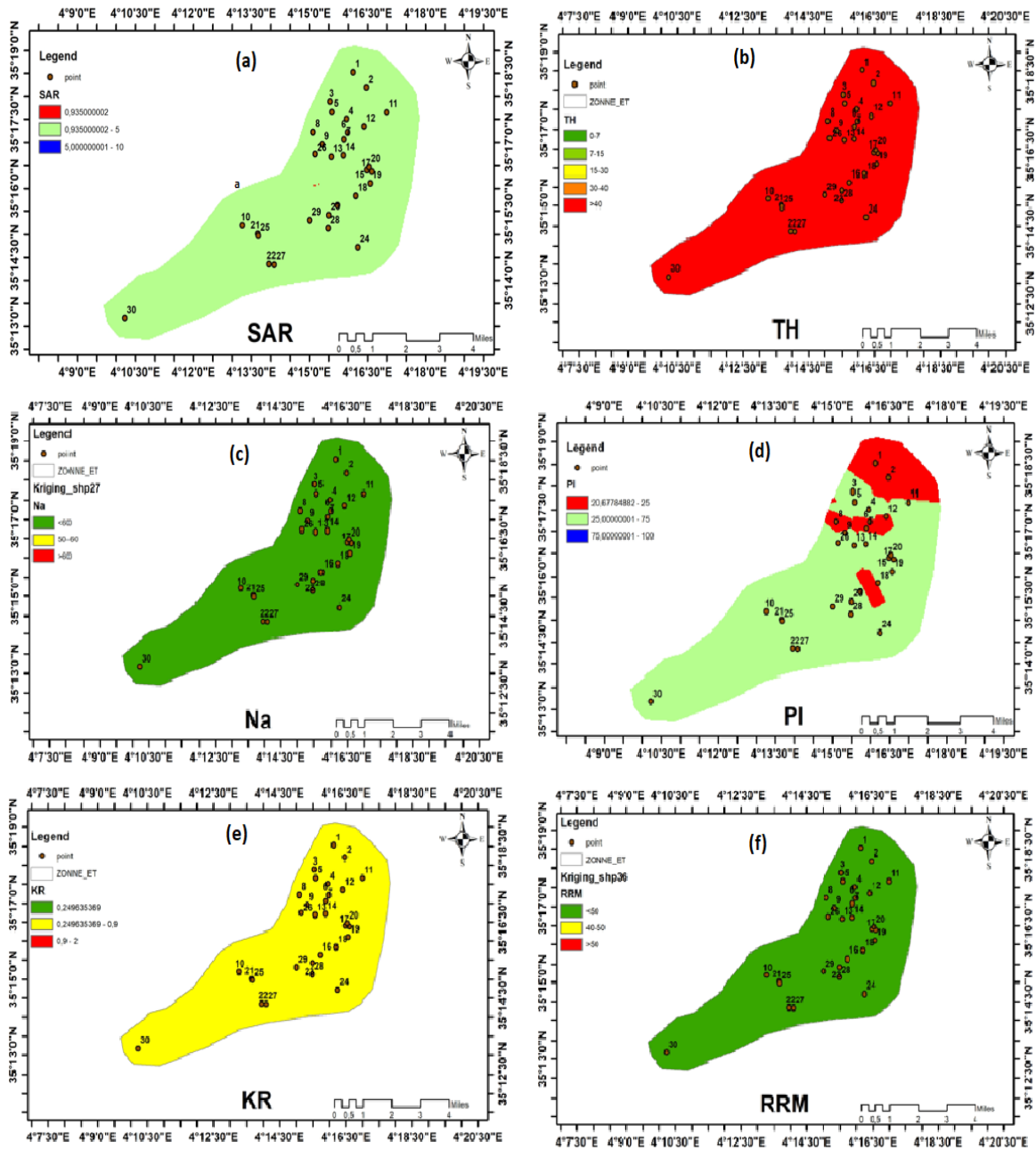


Fig. III.19 : Cartes d'interpolation spatiale des indices de qualité de l'eau pour l'irrigation par méthode de krigeage ordinaire.

III .8.2. Indice d'évaluation de la qualité de l'eau pour la consommation (WQI) :

III .8.2.1. Principe et méthode

La qualité des eaux pour la consommation a été examinée par l'indice de qualité de l'eau arithmétique (WQI). Cet indice a été utilisé pour évaluer et classer la qualité des eaux de surface et souterraines. L'indice quantifie les influences de différents paramètres de qualité de l'eau à l'aide d'un système d'évaluation. Les résultats de l'indice de qualité obtenues se comparant à une plage de variation WQI (0-100) et la qualité de l'eau est classée entre mauvaise et optimale.

La méthode de Yidana et Yidana, 2010 a été utilisée pour le calcul de l'indice WQI en tenant compte des normes de (OMS.2011) et des poids (W_i) attribués de 1 à 5 pour chaque variable, TDS, pH, dureté, cations majeurs, anions pour évaluer la qualité de l'eau en fonction de leur importance dans la qualité. Le poids relatif (RW) des paramètres (n : nombre de paramètres) de qualité de l'eau a été calculé par l'équation (1) :

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

Où RW est le poids relatif, W_i est le poids de chaque paramètre (OMS) et n est le nombre de paramètres.

Puis une échelle d'évaluation de la qualité (q_i) pour chaque paramètre a été attribuée en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par sa norme relative selon les directives de l'OMS et en multipliant par 100 (équation (2)).

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

q_i : est l'échelle d'évaluation de la qualité.

C_i : est la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon mg/l.

S_i : est la norme de l'Organisation mondiale de la santé pour chaque paramètre chimique en mg/l selon les directives de l'OMS (2011).

Table .III. 9. Normes de l'OMS 2011

Paramètre	Norme algérienne	Norme de l'OMS	W_i	RW_i
-----------	------------------	----------------	-------	--------

	(2011)	(2011)		
pH	6.5 - 9.0	8.5	4	0.11
CE	2800	1500	5	0.14
Ca ²⁺	200	75	2	0.05
Mg ²⁺	150	100	2	0.05
HCO ₃ ⁻	-	300	2	0.05
Cl ⁻	500	250	3	0.08
SO ₄ ²⁻	400	250	5	0.14
TH	200	500	2	0.05
NO ₃ ⁻	50	50	5	0.14
Na ⁺	200	200	2	0.05
K ⁺	12	12	2	0.05
NO ₂ ⁻	0.2	3	3	0.08
		$\sum W_i$	37	1

Tous les paramètres sont en mg/L sauf CE à 25 °C en µs/cm, et pH sans unité.

W_i : Poids des paramètres ; RW_i : Poids relatifs des paramètres

Ensuite, pour déterminer la valeur de WQI, le sous-indice de qualité de l'eau (SI_i) pour chaque paramètre est calculé à l'aide de l'équation (3).

$$SI_i = RW_i \times q_i \quad (3)$$

Enfin, l'indice de qualité de l'eau WQI est calculé par l'utilisation de sous-indice de qualité de l'eau (SI_i), équation (4).

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

Les résultats de WQI sont évalués en cinq types d'eau : eau excellente (WQI < 50), eau bonne (WQI = 50–100), eau médiocre (WQI = 100–200), eau très médiocre (WQI = 200–300) et eau impropre à la consommation (WQI > 300).

III .8.2.2. Classification de la qualité des eaux souterraines de la région Maadher par (WQI)

✓ Optimisation des poids de paramètres

Pour calculer l'indice de qualité WQI, Il est indispensable de déterminer les poids optimisés des paramètres physiques et chimiques d'une eau, l'objectif est généralement de pondérer ces paramètres selon leur importance ou leur influence sur la qualité globale de l'eau. Plusieurs approches ont abordé ce sujet par différentes méthodes, dont le but de déterminer les poids W_i des différents paramètres du WQI.

➤ Méthodes d'attribution des poids :

1-Méthode basée sur l'expertise (subjective)

Cette méthode est basée sur le jugement des experts en qualité de l'eau. L'attribution repose sur l'importance de chaque paramètre et *son influence sur la santé humaine et l'environnement* (Par exemple, certains ions ou polluants sont jugés plus critiques selon les normes ou guides réglementaires, donc poids plus élevés).

2- Méthode statistique – Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP est plus objective utilisée pour :

- Réduire la dimensionnalité et extraire les paramètres les plus influents.
- Les composantes principales expliquent la variance des données.
- Les poids peuvent être liés aux contributions (loadings) des variables dans les premières composantes principales.
- Permet de pondérer les paramètres en fonction de *leur impact statistique*.

3- Méthode des poids par entropie

C'est une méthode objective, utilisée souvent en analyse multi-critères, repose sur le calcul des poids à partir de la variation / information apportée par chaque variable. Plus un paramètre a une variation élevée, plus son poids sera important.

4- Méthode Analytique Hiérarchique (AHP)

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par Thomas Saaty (2008), est une technique d'aide à la décision multicritère utilisée pour déterminer des poids relatifs à des critères en les comparant deux à deux. Elle est particulièrement utile lorsqu'un jugement subjectif est impliqué dans l'évaluation.

5- Méthode de régression

La régression multiple est utilisée si on dispose d'une variable cible (ex. qualité globale, indice de potabilité), et les coefficients standardisés de la régression peuvent servir de poids.

Dans notre calcul nous avons utilisé la méthode subjective, basé sur des approches et des études réalisées dans des régions similaires et de mêmes conditions naturelles et climatiques (Climat semi-aride) que notre région d'étude, ainsi des approches précédentes réalisées dans la région.

A cet effet, nous avons pris les poids utilisés par certains auteurs dans ces approches, basés dont leurs attributions des poids sur l'importance des paramètres dans la constitution de l'eau, et l'influence sur la santé et l'environnement selon les normes ou guides réglementaires.

Ces approches ont été recensées dans la littérature pour la détermination des poids (W_i) et des poids relatifs (RW_i) utilisés dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau (WQI). Le tableaux.III.10 et III.11 ci-dessous présente un résumé des différentes propositions issues d'études scientifiques portant sur les régions semi-arides. Ces valeurs, appliquées principalement dans les contextes d'approvisionnement en eau potable et d'irrigation agricole, sont généralement établies en fonction de l'importance régionale des paramètres, des conditions environnementales spécifiques, ainsi que sur la base de l'expertise d'acteurs du domaine.

Tableau .III. 10. Différentes propositions issues d'études scientifiques des poids (w_i) et poids relatifs (Rw_i') des paramètres de qualité d'eau dans des régions semi-aride

Paramètre	[Singh et al., 2015]		[Ramakrishnaiah et al., 2009]		[Bhardwaj et Singh, 2017]		[Ayers & Westcot, 1985] (applicable à l'irrigation)		[Tahar Selmane , 2021]	
	Poids (w_i)	Poids relatif (Rw_i')	Poids (w_i)	Poids relatif (Rw_i')	Poids (w_i)	Poids relatif (Rw_i')	Poids (w_i)	Poids relatif (Rw_i')	Poids (w_i)	Poids relatif (Rw_i')
pH	2	0,05	4	0,11	3	0,07	2	0,07	2	0,04
CE	4	0,1	5	0,14	6	0,14	6	0,2	5	0,11
TDS	5	0,13	5	0,14	5	0,12	5	0,17	6	0,13
Ca ²⁺	3	0,08	3	0,08	4	0,1	4	0,13	3	0,06
Mg ²⁺	3	0,08	3	0,08	3	0,07	4	0,13	3	0,06
HCO ₃	3	0,08	3	0,08	3	0,07	2	0,07	7	0,15
Cl ⁻	5	0,13	6	0,17	6	0,14	3	0,1	6	0,13
SO ₄ ²⁻	6	0,15	5	0,14	7	0,17	3	0,1	7	0,15
NO ₃ ⁻	6	0,15	4	0,11	6	0,14	2	0,07	5	0,11
Na ⁺	2	0,05	1	0,03	2	0,05	1	0,03	2	0,04
K ⁺	1	0,03	1	0,03	2	0,05	1	0,03	1	0,02

Remarque :

- Pour l'utilisation des poids de ces approches (tableaux.III.10), attribués par des experts subjectivement pour les conditions citées précédemment, on doit prendre en considération :

1. Dominance des paramètres :

- ✓ Le sulfate (SO_4^{2-}), le chlorure (Cl^-) et le nitrate (NO_3^-) ont généralement un poids plus élevé dans les études semi-arides en raison de leur prévalence et de leurs impacts environnementaux.
- ✓ La conductivité électrique (CE) et les solides dissous totaux (TDS) sont des indicateurs importants de la salinité, essentiels dans les évaluations de l'eau d'irrigation semi-aride.

2. Variations de pondération :

- ✓ Les pondérations dépendent de l'objectif de l'étude (par exemple, eau potable ou irrigation) et des conditions régionales.
- ✓ Attribuer des poids proportionnellement en fonction de la dominance et des caractéristiques chimiques régionales de l'eau.

Un autre tableau reflétant le poids (w_i) et le poids relatif (Rw'_i) des WQI adaptés aux zones semi-arides où dominent HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^- (tableaux.III.11).

Tableau .III. 11. Différentes propositions issues d'études scientifiques des poids (w_i) et poids relatifs (Rw'_i) des paramètres de qualité de l'eau dans les régions semi-arides dominées par certains paramètres physico-chimiques

Paramètre	[Das & Malik, 2020]		[Ahmed et al., 2018]		[Magesh et al., 2013]	
	Poids (I_i)	Poids relatif (w'_i)	Poids (I_i)	Poids relatif (w'_i)	Poids (I_i)	Poids relatif (w'_i)
pH	2	0,05	2	0,06	3	0,06
CE	5	0,13	4	0,13	4	0,1
TDS	6	0,15	5	0,16	5	0,13
Ca ²⁺	3	0,08	3	0,1	3	0,08
Mg ²⁺	3	0,08	3	0,1	3	0,08
HCO ₃ ⁻	7	0,18	6	0,19	7	0,19
Cl ⁻	6	0,15	5	0,16	6	0,15
SO ₄ ²⁻	7	0,18	6	0,19	6	0,15
NO ₃ ⁻	5	0,13	4	0,13	5	0,13
Na ⁺	2	0,05	1	0,03	1	0,02
K ⁺	1	0,02	1	0,03	1	0,02

Remarque :**1. Dominance des paramètres :**

- HCO_3^- (Bicarbonate) : Poids relatifs élevés (0,18–0,19) en raison de son rôle de tampon du pH et de reflet des processus d'altération des carbonates dans les zones semi-arides.
- SO_4^{2-} (Sulfate) : Poids relatifs élevés comparables (0,15–0,19), attribués à la dissolution du gypse et de l'anhydrite.
- Cl^- (Chlorure) : Poids relatifs modérés à élevés (0,13–0,16), provenant de la dissolution des évaporites et de sources anthropiques.
- NO_3^- (Nitrate) : Poids relatifs (0,13–0,15), souvent lié au ruissellement agricole et à la contamination des eaux souterraines.

Dans notre étude, les facteurs de pondération utilisés pour les calculs sont présentés dans le tableau III.12 ci-dessous. Ces poids ont été attribués sur la base du jugement d'experts en qualité de l'eau par l'attribution des poids aux paramètres selon leur importance et influence. Sur cette base nous avons pris la moyenne normalisée des poids attribués aux paramètres utilisés dans les approches réalisées sur notre région et sur autres régions de mêmes caractéristiques. Climatiques, facteurs anthropiques et intrusion marine (Tableau .III.10).

Pour le calcul de l'indice de qualité WQI, sur la base des poids attribués subjectivement, on calcule les poids relatifs (Rw'_i), par la formule suivante :

$$Rw'_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}$$

Où :

Rw'_i : Poids relatif normalisé utilisé dans le calcul du WQI

w_i : L'importance (poids) du paramètre i, définie subjectivement

n : est le nombre total de paramètres considérés

$\sum_{j=1}^n w_j$: correspond à la somme des importances de tous les paramètres considérés.

Tableau .III.12. Poids attribués et adoptés (w_i) et poids relatifs (Rw_i') calculés des paramètres de qualité de l'eau dans notre étude.

Paramètre	Poids (w_i)	Poids relatif (Rw_i')
pH	3	0,06
CE	5	0,11
TDS	5	0,11
Ca ²⁺	3	0,06
Mg ²⁺	3	0,06
HCO ₃ ⁻	4	0,09
Cl ⁻	5	0,11
SO ₄ ²⁻	6	0,13
NO ₃ ⁻	5	0,11
NO ₂ ⁻	5	0,11
Na ⁺	2	0,04
K ⁺	1	0,02
Total	47	1,0

L'application de l'indice de qualité WQI, pour évaluer et classier la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation dans la région d'El-Maadher, permet d'illustrer les résultats suivants (Figure III.20). Les valeurs calculées de WQI des eaux de 30 forages montrent que majorité des forages avec 73.33 % étaient dans la catégorie de l'eau pauvre et que seul le forage 10 contient bonne qualité d'eau. Cependant, les forages 2, 8, 9, 18, 20 et 28 se caractérisent par une catégorie d'eau très pauvre avec 20% de la totalité des eaux. Le forage 7 est classé dans la catégorie non potable. Les valeurs élevées de WQI sont dues à des concentrations élevées de sulfate, chlorure, calcium et nitrate.

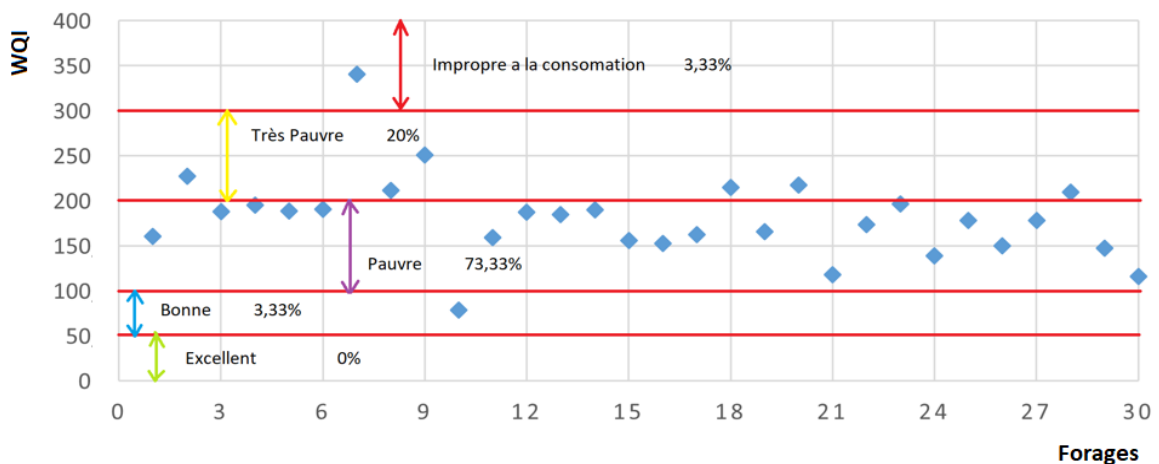


Fig. III.20 : Classification de qualité d'eau des échantillons étudiée (Compagne 2025) à l'aide de WQI

La méthode de krigeage ordinaire a été utilisée pour interpolation, ce qui montre la variation spatiale de l'indice de qualité de l'eau (WQI) dans la plaine du Maadher (Figure III 21). L'interpolation spatiale illustre que les eaux de bonne qualité sont localisés à la partie Sud-ouest de la zone d'étude et les eaux majoritaires de catégorie pauvre minéralement se situées à la partie centrale et Nord-est, Tandis que les eaux de qualité très pauvre sont abritées à la partie Nord de la zone d'étude.

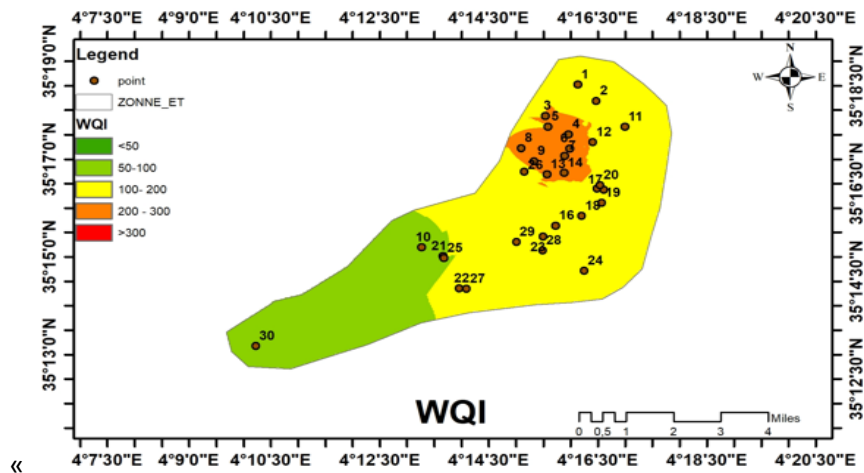


Figure III. 21 : Carte d'interpolation spatiale de WQI par méthode de krigeage ordinaire

III .9.Indice de pollution par les nitrates (NPI) :

L'indicateur NPI est utilisé pour mesurer le degré de pollution par les nitrates dans les eaux souterraines causée par les activités humaines. Lorsque la concentration de NO_3^- dans les eaux souterraines excède 20 mg/l, elle est jugée comme étant une pollution d'origine humaine. Le seuil maximum autorisé de NO_3^- dans l'eau potable est fixé à 50 mg/l (OMS 2011). On surveille la contamination des eaux souterraines par les nitrates en utilisant le NPI dans plusieurs régions du monde, étant donné que cet indicateur fournit une représentation précise du taux de pollution de l'eau. L'équation suivante a été appliquée pour calculer le NPI :

$$\text{NPI} = (\text{Cs} - \text{HAV}) / \text{HAV}$$

Cs : représente la plage analytique des nitrates dans l'échantillon d'eau. HAV : représente la valeur seuil de la source artificielle (20 mg/l).

Selon la valeur NPI, la qualité de l'eau est divisée en cinq catégories : <0 propre (pas de pollution), 0-1 Légèrement polluée, 1-2 Modérément polluée, 2-3 Fortement polluée, >3 Très fortement polluée.

D'après l'analyse du résultat de calcul de l'indice NPI on trouve que 6,60% sont des eaux propres et concernent les eaux des forages (F10, F30) et 13% sont fortement polluées nitrates concernent les eaux des forages (F12, F15, F17, F19) et 80% sont très fortement polluées concernent le reste de forages (Fig III. 22).

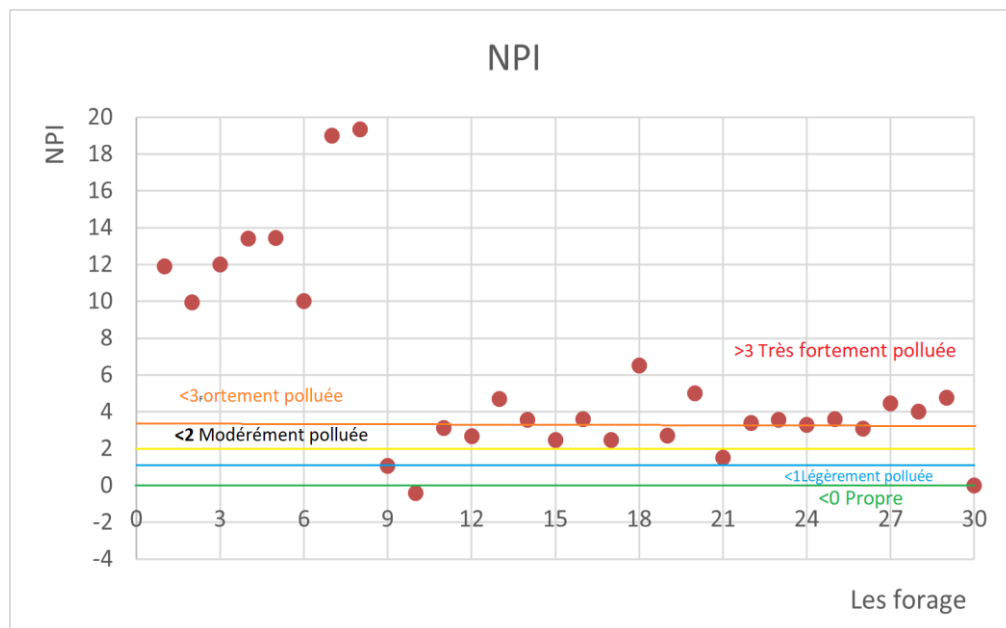
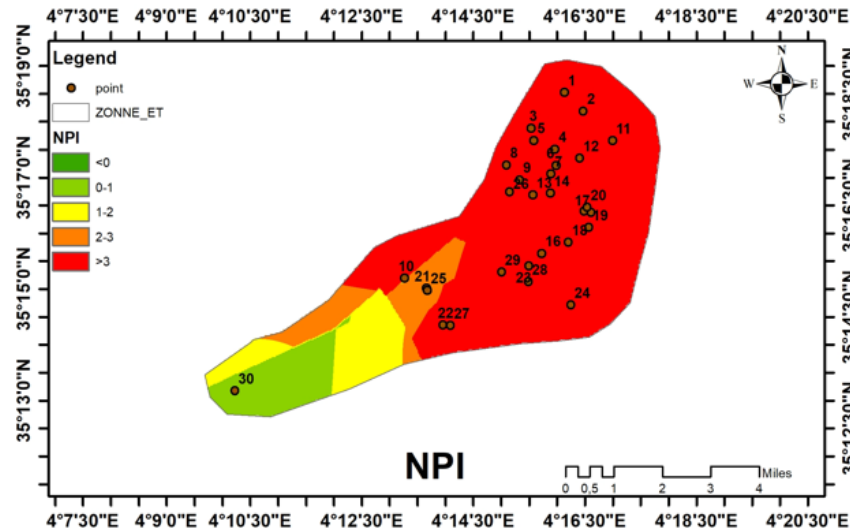


Figure III 22. Classification de niveaux de pollution des eaux souterraines à l'aide de l'indice de NPI

La répartition spatiale de NPI (Fig III. 22), montre que les eaux de la partie centrale à Nord-est sont majoritaires et se caractérisent par une très forte pollution en nitrates, cela est dû aux eaux usées (fosses septiques) et l'utilisation des engrais dans l'activité agricole. Les eaux fortement polluées en nitrates se situent au centre et à l'ouest, tandis que les eaux légèrement à modérément polluées sont localisées à la partie Sud-ouest.



Conclusion :

L'étude de Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines, révèle que :

- Les eaux souterraines de la région d'El-Maadher présentent un faciès hydrochimique de type *sulfaté et chloruré calcique et magnésien*.
- Leur composition chimique résulte principalement de deux processus : la dissolution et l'évaporation des minéraux carbonatés, ainsi que des échanges ioniques inverses avec les minéraux argileux. Les eaux sont dans leur *majorité pauvre minéralement*, elles sont sous saturées par rapport aux minéraux évaporitiques, cependant pour les minéraux carbonatés sont instables et variées selon les trois phases de saturation.

Les indices d'eau d'irrigation montrent que tous les échantillons sont adaptés à l'usage agricole, sauf la dureté (TH) et l'indice de perméabilité (IP). Elles sont caractérisées par une dureté très élevée et inappropriée selon IP.

L'analyse des résultats de calcul de l'indice de qualité pour la consommation WQI et sa représentation spatiale par krigeage ordinaire montre une hétérogénéité dans sa répartition sur la zone d'étude et on constate :

- La partie Nord-est de Maadher pauvre minéralement.
- La partie Nord est de catégorie de qualité très pauvre.
- La partie Sud-ouest présente une bonne qualité des eaux.

Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} sont bien corrélés avec la conductivité électrique (CE) et dans le sens de l'écoulement souterrain et présentent des concentrations élevées au nord de la zone d'étude et des concentrations faibles au sud.

Les concentrations des bicarbonates et des nitrates présentent des pics localisés près de la dépression de l'oued Boussaâda.

Les eaux souterraines de la région Maadher sont polluées par les nitrates avec des concentrations extrêmement élevés, surtout au niveau des zones avoisinantes aux oueds de Maiter, Bousaada et Romana et les zones où l'agriculture intensive est pratiquée. L'interpolation spatiale de NPI, montre que :

- les eaux de la partie centrale à Nord-est sont majoritaires et se caractérisent par une très forte pollution en nitrates, dû aux eaux usées (fosses septiques) et l'utilisation des engrais dans l'activité agricole. Les eaux fortement polluées en nitrates se situées au centre et à l'ouest, tandis que les eaux légèrement à modérément polluées sont localisées à la partie Sud-ouest.

Conclusion générale



Conclusion générale

L'étude menée s'est focalisée sur l'aquifère mixte d'El Maadher, situé au sud de la grande plaine du Chott El Hodna, dans le nord-est de l'Algérie, et a permis de tirer les conclusions suivantes :

La partie méridionale du Chott El Hodna comprend des zones fertiles, caractérisées par des sols à dominante argileuse et sableuse, favorisant diverses activités agricoles. La zone d'étude est soumise à un climat de type aride à semi-aride, marqué par des hivers froids et pluvieux, ainsi que des étés chauds et secs, avec des précipitations faibles et irrégulières.

L'analyse géologique de la région a révélé que les formations carbonatées en bordure datent du Crétacé, tandis que l'ensemble de la plaine de Maadher est occupé par des formations d'âge Mio-Plio-Quaternaire. D'un point de vue hydrogéologique, les calcaires crétacés situés en bordure de la plaine constituent de potentiels réservoirs aquifères. L'eau souterraine représente la principale source d'approvisionnement en eau potable et en eau d'irrigation dans la région.

L'étude de Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines, révèle que les eaux souterraines de la région d'El-Maadher présentent un faciès hydrochimique de type *sulfaté et chloruré calcique et magnésien*. Leur composition chimique résulte principalement de deux processus : la dissolution et l'évaporation des minéraux carbonatés, ainsi que des échanges ioniques inverses avec les minéraux argileux. Les eaux sont dans leur *majorité pauvre minéralement*, elles sont sous saturées par rapport aux minéraux évaporitiques (Anhydrite et gypse), cependant pour les minéraux carbonatés (Aragonite, calcite et dolomite), elles sont instables et variées selon les trois phases de saturation.

Les indices d'eau d'irrigation révèlent que tous les échantillons sont adaptés à l'usage agricole, sauf la dureté (TH) et l'indice de perméabilité (IP). Où elles sont caractérisées par une dureté très élevée et inappropriée selon IP, ce qui peut causer :

- Un colmatage des systèmes d'irrigation ;
- réduire la perméabilité du sol ;
- l'interaction défavorable avec certains engrais et nuire à la croissance de certaines cultures par la saturation calcaire (accumulation excessive de Ca^{2+} ou de CaCO_3 , dans le sol et à sur les racines).

Conclusion générale

L'analyse des résultats de calcul de l'indice de qualité pour la consommation WQI et sa représentation spatiale par krigeage ordinaire montre une hétérogénéité dans sa répartition sur la zone d'étude et on constate :

- La partie Nord-est de Maadher pauvre minéralement.
- La partie Nord est de catégorie de qualité très pauvre.
- La partie Sud-ouest présente une bonne qualité des eaux.

Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} sont bien corrélés avec la conductivité électrique (CE) et dans le sens de l'écoulement souterrain et présentent des concentrations élevées au nord de la zone d'étude et des concentrations faibles au sud.

Les concentrations des bicarbonates et des nitrates présentent des pics localisés près de la dépression de l'oued Bousaada. Cela dû aux facteurs anthropiques et climatiques, notamment l'activité agricole intensive et les apports de l'oued Bousaada.

Les eaux souterraines de la région Maadher sont polluées par les nitrates avec des concentrations extrêmement élevés, notamment au niveau des zones avoisinantes aux oueds de Maiter, Bousaada et Romana et les zones d'activité agricole intensive.

L'interpolation spatiale de NPI par krigeage ordinaire, illustre que :

- Les eaux de la partie centrale à Nord-est sont majoritaires et se caractérisent par une très forte pollution en nitrates.
- Les eaux fortement polluées en nitrates se situées au centre et à l'ouest, tandis que les eaux légèrement à modérément polluées sont localisées à la partie Sud-ouest.

Cette contamination par les nitrates est due à :

- ✓ la pollution provenant des eaux résiduaires et des déchets solides (décharge) abandonnés dans l'oued de Bousaada.
 - ✓ pratiques agricoles intensives et l'emploi de pesticides, d'engrais artificiels et de fumiers.
 - ✓ l'usage des fosses septiques par les résidents situés loin du village de Maadher.
- Pour réduire la contamination des eaux souterraines par les nitrates dans la région de Maadher, il est préférable d'adopter des actions préventives et de s'attaquer aux sources principales de cette pollution.

Recommandations



Recommandations et perspectives

Au regard des résultats obtenus et des problèmes relevés dans la zone d'étude d'El Maadher, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin d'améliorer la gestion et la qualité des eaux souterraines :

1. Surveillance et monitoring fréquents

- ✓ Établir un réseau de suivi des nappes souterraines en organisant des campagnes d'échantillonnage régulières afin de surveiller les changements des paramètres physico-chimiques et d'identifier rapidement toute détérioration.
- ✓ Accroître l'usage de technologies de télédétection et SIG pour le suivi spatial et temporel de la qualité hydrique.

2. Combattre la pollution provenant des activités agricoles

- ✓ Encourager l'adoption de méthodes agricoles responsables, en particulier la gestion judicieuse des engrais azotés et la mise en place d'un calendrier de fertilisation qui prend en compte les exigences concrètes des cultures.
- ✓ Il faut exclure l'irrigation avec des eaux usées non épurées et promouvoir le recours à des méthodes de compostage plutôt qu'à la simple application de fumier.

3. Protection des zones de recharge

- ✓ Il est essentiel d'identifier et de préserver les zones de recharge des aquifères contre toute activité susceptible de les polluer (décharges, fosses septiques, industrie).
- ✓ Effectuer des analyses de vulnérabilité pour établir une priorité dans la protection des zones.

4. Prise de conscience et engagement local

- ✓ Mener des initiatives de sensibilisation destinées aux agriculteurs et à la communauté sur les risques liés à la contamination des eaux souterraines et l'importance d'une gestion durable.

- ✓ Promouvoir la participation active des collectivités locales et des agriculteurs dans la surveillance participative et la sauvegarde des ressources aquatiques.

5. Perspectives pour des recherches futures

- ✓ Pour retracer les sources de pollution et les trajectoires des flux souterrains, il serait pertinent d'élargir les analyses hydrochimiques en utilisant d'autres outils tels que l'analyse isotopique ou la modélisation hydrogéologique.
 - ✓ Il serait pertinent d'élargir l'étude sur plusieurs saisons hydrologiques (hiver/été) afin d'examiner l'influence de la variabilité climatique sur la qualité de l'eau.
 - ✓ Examiner l'emploi de méthodes naturelles (comme les zones humides artificielles et la phytoremédiation) pour optimiser la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation.
-
- Prohiber l'installation de dépôts informels et de tas d'ordures urbaines sur les rives des oueds.
 - Consolider et sécuriser le collecteur d'eaux résiduaires de Bousaada et du hameau d'El Maadher afin d'empêcher les fuites d'eaux dans l'oued de Bousaada.
 - L'établissement de points d'eau purifiée pour les habitants de la région peut être réalisé en mettant en place des installations de traitement collectif dédiées à la diminution des niveaux de nitrates et de dureté.

Références bibliographiques



Références bibliographiques

1. Amel F (2021) : Effets des activités humaines sur les ressources en eaux dans les régions semi-arides et arides d'Algérie.
2. Abdellaoui F, et Benchenite A (2012) : caractérisation des sols et des eaux d'irrigation dans deux stations: Bensrouer et Maadher (W. M'Sila). Mémoire d'ingénieur. Université. M'Sila. 62p.
3. ADE (2019) Entreprise Algérienne des eaux. Zone de Djelfa unité de M'sila. Algérie
4. ANRH (2006) Modelling of the Hodna aquifer. Mission I : data collection, analyses and synthèses (in France) Tech Rep. Agence nationale des ressources hydrauliques. Algérie
5. Annuaire Statistique (2015), Direction de la planification de la Wilaya de M'sila. Algérie.
6. Benchetrit Maurice (1956) Les sols d'Algérie. Revue de géographie alpine 44(4) : 749-761.
7. DOI : <https://doi.org/10.3406/rga.1956.1790>.
8. Belouam N (1976) Caractéristiques macromorphologiques et micro-morphologiques de quelques sols à accumulation calcaire du Hodna. Algérie
9. Belagoune Farés (2012). Etude et modélisation des crues des cours d'eau en Milieu semi-aride « Cas des grands bassins versants 05, 06 et 07 », thèse de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla. Algérie.
10. Bernard Augustin, Ficheur Émile (1902) Les régions naturelles de l'Algérie » In: Annales
11. de Géographie, t. 11, N°60, 1902. pp. 419-437
12. Bernard Augustin, Ficheur Émile (1902) Les régions naturelles de l'Algérie
13. Benguesmia Leila (2009). Qualité des eaux souterraines du bassin du Hodna (Zone de M'sila) université de M'sila. Algérie.
14. Bermond. R, Vuichard. R, (1973). Les paramètres de la qualité des eaux. Documentation Française, Paris.
15. Dechaicha Assoule (2010). L'étalement urbain et les contraintes physiques et naturelles Cas d'étude de La ville de Boussaâda. Thèse de Magistère en architecture. Université de Biskra. Algérie.
16. Derekov A M (1973) Etudes hydrologiques dans le bassin du chott et Hodna. FAO
17. Jean Despois (1953) Le Hodna (Algérie) presses universitaires de France. 108, boulevard Saint-Germain. PARIS. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3406577p>
18. Ghodbane M (2022) Analysis of groundwater quality in the lower Soummam Valley, North-East of Algeria. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.141549>.

Référence bibliographique

19. Guerra A (1998) Processus érosifs sur les pentes. Géomorphologie : actualisation de bases et concepts, A.J.T. Guerra & S.B. Cunha (eds.), Bertrand Brésil, Rio de Janeiro
20. Kaabeche M (1995) Flore et végétation dans le Chott El-Hodna (Algérie). Documents Phytosociologies, Nouvelle Série, Université Degli Studi
21. Kaabeche M (1990) les groupements végétaux de la région de Boussaâda (Algérie) Essai de synthèse sur la végétation steppique du Maghreb » thèse de doctorat en sciences Université DE Paris sud. France.
22. Kebiche Mustapha (1994) Le bassin versant du Hodna (Algérie) : Ressources en eau et possibilités d'aménagement » In : Travaux de l'Institut Géographique de Reims, N°85-86, 1994. Etudes Algériennes. pp. 25-34
23. Lasad M C (2022). Diversité de l'avifaune et effets des facteurs environnementaux sur sa distribution dans la région de Boussaâda. Thèse de Doctorat, Université de M'sila.
24. Ladgham Chicouche A, Zerguine Delloula (2001) Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (Chott El Hodna) Algérie
25. Mimoune S (1995) Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (sud du Chott Hodna). Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 1, France, 209p
26. Ozenda P (1977) Flora of the Sahara. Flora of the Sahara. (ed. 2)
27. Salah Abdesselam, Amor Halitim, Anthony Jan, Fabienne Trolard, Guilhem Bourrie (2012) Anthropogenic contamination of groundwater with nitrate in arid region: case study of Southern Hodna (Algérien).