



MEMOIRE

Présenté

À



L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCCEN
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE ET
DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité

Géo-Ressources

Par

Samah Soundous KAMNI

ANALYSE QUALITATIVE DES EAUX A L'AIDE DES MODELES SIMPLIFIES ET DES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG) : CAS DE LA PLAINE DE MAGHNA

Soutenu le 22 septembre 2024 devant les membres du jury :

Salamet MAHBOUBI, MC (A), Univ. Tlemcen
Lamia YEBDRI, MC (B), Univ. Tlemcen
Nadjla BENTKHICI, MC (B), CTS. Oran
Fatiha HADJI, MC (B), Univ. Tlemcen

Président
Encadrante
Co-Encadrante
Examinatrice

Année universitaire : 2023/2024

- - *Dédicace* - -

Je dédie ce mémoire

À **mes très chers parents**, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de mon parcours académique.

À mes **grands-parents**, pour leur sagesse et leur inspiration.

À mes sœurs, **Fadia, Awatif et Samaa Ed-Dounia**, pour leur solidarité et leur appui moral.

À **Nihel**, pour sa collaboration précieuse et son accompagnement durant toute la période de réalisation de ce projet de fin d'étude.

À mes collègues de promotion, en particulier **Kenza, Houda et Mohamed** pour leur esprit d'équipe et les échanges enrichissants qui ont contribué dans mon travail.

Que ce manuscrit soit le témoignage de ma profonde reconnaissance envers tous ceux qui ont participé, de près ou de loin, à mon développement personnel et professionnel.

Samah

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS	I
RESUME	III
ABSTRACT	IV
INTRODUCTION	
I. PROBLEMATIQUE	1
II. OBJECTIFS	1
III. STRUCTURE DU MEMOIRE	2
Premier chapitre : Cadre physique	
I. CONTEXES GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUES	3
A. Contexte géographique	3
1. Situation géographique	3
2. Occupation de sol	4
3. Réseau hydrographique	4
B. Contexte climatique	5
II. CONTEXES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	5
A. Aperçu tectonique	5
B. Aperçu litho stratigraphique	6
1. Paléozoïque	6
2. Mésozoïque	6
3. Cénozoïque	7
4. Plio-Quaternaire	7
C. Hydrogéologie de la région	8
Deuxième chapitre : Méthodologie de l'étude	
I. TRAVAUX DE TERRAIN ET DE LABORATOIRE	10
A. Sur terrain	10
B. Au laboratoire	11
II. METHODES DE TRAITEMENT	12
A. Traitement Hydrogéochimique	12
1. Faciès hydrogéochimiques	12
1.1. Diagramme de Piper	12
1.2. Diagramme de Scholler-Berkaloff	13
1.3. Diagramme de Durov (1948)	14
2. Minéralisation des eaux souterraines	15
2.1. Indice de Saturation	15
2.2. Indices Chloro-alcalins	16
2.3. Indices d'échanges IEB et IGM	16
B. Traitement qualitatif des eaux souterraines	17
1. Qualité des eaux pour la consommation humaine (Potabilité)	17
2. Qualité des eaux à des fins d'irrigation	17
2.1. Classification des eaux d'irrigation selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	17
2.2. Indices d'irrigation	18
2.3. Diagramme de classification des eaux	19
2.3.1. Diagramme de WILCOS	19
2.3.2. Diagramme de RICHARDS	19

C. Traitement par modèles simplifiés (Indice de qualité des eaux WQI)	20
1. Indice de pollution par les nitrates	20
2. Méthode de l'indice arithmétique pondéré de la qualité de l'eau	21
2.1. Indice de qualité de l'eau potable (DWQI)	21
2.2. Indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI)	22
III. CARTOGRAPHIE : SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)	24
A. Description de l'outil	24
1. Définition du SIG	24
2. Présentation du logiciel utilisé (<i>ArcGIS 10.8.2</i>)	24
B. Traitement du Modèle Numérique de Terrain	25
C. Traitement d'Imagerie satellitaire (Landsat)	25
D. Méthode d'interpolation spatiale	26

Troisième chapitre : Analyse géomorphologique
--

I. DELIMITATION DE LA ZONE D'ETUDE	28
II. CARTOGRAPHIE DES FACIES	29
III. ANALYSE MORPHOMETRIQUE	30
A. Carte altimétrique	30
B. Carte des pentes	31
C. Carte du réseau hydrographique	31
IV. CARTE D'OCCUPATION DES SOLS	32
V. CLIMAT DE LA ZONE D'ETUDE	33
A. Variation pluviométrique	34
1. Variations des totaux pluviométriques annuels	34
2. Variations des moyennes pluviométriques saisonnières	34
3. Variations des moyennes pluviométriques mensuelles	35
B. Variation thermique	35
C. Régime climatique	36
1. Méthode graphique de Bagnouls et Gaussen	36
D. Indices climatiques	37
1. Indice d'aridité annuel de DE Martonne (I)	37
2. Indice d'aridité mensuelle de DE Martonne (i)	38
VI. SYNTHESE	39

Quatrième chapitre : Analyses hydrogéochimiques et évaluation qualitatives des eaux
--

I. CARACTERISATIONS PHYSICOCHIMIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX	40
II. MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES	42
A. Facies hydrogéochimiques	42
1. Diagramme de Piper	42
2. Diagramme de Scholler-Berkaloff	42
3. Diagrammes de Durov	43
B. Interactions EAU/ROCHE	45
1. Indices de saturation	45
2. Indices Chloro-alcalins	46
3. Indices d'échange IEB et IGM	47
III. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	48
A. Pour la consommation humaine	49

B. A des fins agricoles	50
1. Classification des eaux d'irrigation selon le FAO	50
1.1. Risque de salinité	50
1.2. Infiltration	50
1.3. Toxicité ionique spécifique	51
1.3.1. Par sodium	51
1.3.2. Par chlorure	51
1.4. Effets divers	51
1.4.1. Azote des nitrates (N-Nitrate)	51
1.4.2. Bicarbonates	52
1.4.3. pH	52
2. Indices d'irrigation	52
2.1. Dureté TH	52
2.2. Pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%)	53
2.3. Risque du magnésium (MH)	53
2.4. Indice de perméabilité (Permeability index)	53
2.5. Rapport de Kelly (Kelly's Ratio)	53
2.6. Carbonate de sodium résiduel (RSC)	54
2.7. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC)	54
3. Diagrammes de classification des eaux d'irrigation	57
3.1. Diagramme de Wilcox	57
3.2. Diagramme de Riverside	57
IV. DISCUSSION	58
Cinquième chapitre : Modèle simplifiés WQI	
I. INDICE DE POLLUTION PAR NITRATE (NPI)	60
II. INDICES DE QUALITE DES EAUX (WQI)	61
A. Indice DWQI	61
B. Indice IWQI	62
III. DISCUSSION	63
CONCLUSIONS	
CONCLUSIONS	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
LISTE DES FIGURES & TABLEAUX	
ANNEXES	

AVANT - PROPOS

- - AVANT – PROPOS - -

Tout d'abord, je remercie ALLAH le Miséricordieux de m'avoir donné la force et la volonté d'entamer et d'achever ce travail.

Je tiens à remercier mon encadrante Mme. **Lamia YEBDRI-MAHI**, Maître de Conférences à l'Université d'Abou-Berk Belkaid-Tlemcen pour sa patience, pour ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Je remercie mon Co-encadrante Mme. **Nadja BENTKHICI**, Maître de Recherche au Centre des Techniques Spatiales – Arzew, pour son suivi et son assistance durant notre période de stage au CTS.

Mes remerciements s'adressent également à Mme. **Salamat MAHBOUBI**, Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr-Belkaïd-Tlemcen, pour avoir accepté de présider ce jury. Je tiens à remercier aussi Mme. **Fatiha HADJI**, Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd- Tlemcen pour l'intérêt qu'elle a porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par ses propositions.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à M. **Abbes MAROK**, Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen et à M. **Kamar-Eddine BENSEFIA**, Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr-Belkaïd-Tlemcen pour leurs présences et assistances auprès des étudiants de master GRP.

Je ne tarderai à remercier M. **Yahia HAREK**, Professeur à l'Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen et Directeur du laboratoire de recherche n°66 de la chimie analytique et d'électrolyse. Son accueil et sa disponibilité m'ont permis de réaliser les analyses chimiques essentielles pour cette étude. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour ses précieux conseils et son orientation tout au long du stage au laboratoire.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les **Enseignant(e)s** du département des Sciences de la Terre et de l'Univers, qui par leurs compétences, nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Un grand merci s'adresse au personnel du Centre des Techniques Spatiales (CTS), Arzew-Oran, à commencer par son directeur M. **MAHI**, qui, grâce à lui, le stage a eu lieu avec succès et confort. À M. **Lahcen Wahib KEBIR**, ingénieur principal et sous-chef du département de Télédétection, pour son accueil chaleureux, en me mettant dans les meilleures conditions, tout en m'orientant afin de faciliter la bonne réussite de ce travail. À **M. Abdelatif DEHNI**, avec qui j'ai acquis le principe du fonctionnement des logiciels et leurs différentes utilisations. Mes remerciements s'adressent également aux différentes équipes pour avoir mis à ma disposition tous les locaux nécessaires durant toute la période du stage.

Enfin, je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux **agriculteurs de la région de Maghnia**, dont l'accueil chaleureux a facilité mes recherches sur le terrain. Mes sincères remerciements vont aussi à M. **Ghouti KAZI TANI** et M. **Mohammed REFFOUFI**, qui m'ont accompagné avec dévouement tout au long des travaux de terrain. Enfin, je souhaite présenter mes sincères remerciements à M. **Mohamed BELKBIR** pour son aide précieuse lors de la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci à tous ceux qui ont rendu ce travail possible.

RESUME

Résumé

Le présent travail a été mené sur les aquifères de la région de Maghnia (Nord- Ouest algérien). Il s'agit d'une caractérisation hydrogéochimique et d'une évaluation qualitative des eaux souterraines pour des fins de consommation et d'irrigation, par approches multiples portant sur l'utilisation de diagrammes, indices et modèles simplifiés, traités numériquement moyennant les Systèmes d'Information géographique (SIG).

Vingt-huit (28) échantillons d'eau souterraine ont été prélevés et analysés durant le mois de mars 2024, dans un secteur couvrant une superficie de 393.34 km², englobant la totalité de la plaine de Maghnia et une partie de la région de Béni-Boussaid. Les analyses physico-chimiques ont concerné la température (T), le pH, la conductivité électrique (EC), la TDS et les ions majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ et NO₃⁻). Les diagrammes utilisés indiquent que les eaux sont globalement à faciès hydrogéochimiques de type chloruré sodique, à caractère alcalin à acides forts prédominants.

Par ailleurs, la forte minéralisation (632 – 3909mg/L, moyenne : 1421.65mg/l) et les concentrations préoccupantes en nitrates (> 50 mg/L fixée par le JORA et OMS) dans plusieurs points d'échantillonnage, affectent considérablement le goût des eaux souterraines et les rendent ainsi, impropres à la consommation humaine.

Pour l'utilisation agricole, Les classifications basées sur les standards de la FAO, des indices d'irrigation (TH, SAR, SSP, IP, MH, ...) et diagrammes de Wilcox et Richards, montrent que la qualité des eaux souterraines est généralement modérée à mauvaise, notamment dans les parties nord et nord-est. Ces zones sont caractérisées par des valeurs excessives en Na⁺ et Cl⁻, qui entraînent des effets néfastes spécifiques sur les propriétés physiques et chimiques des sols et des plantes.

Enfin, l'utilisation des indices de pollution par les nitrates (NPI), de qualité des eaux potables (DWQI) et d'irrigation (IWQI), couplée au Système d'Information Géographique (SIG) a permis une spatialisation ponctuelle de la qualité des eaux souterraines. Les interpolations des valeurs d'indices NPI et DWQI présentent des similitudes de spatialisation. Les zones à qualité pauvre en termes de potabilité sont principalement celles à importante pollution par Nitrates. Quant à leur utilisation à des fins d'irrigation, les eaux sont, selon IWQI, à restriction élevée à sévère pour la région d'étude. Elles ne sont adaptées que pour l'irrigation des plantes à une tolérance élevée aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité.

Mots clés : Maghnia, Eaux souterraines, Modèles, Qualité, SIG, Indices.

ABSTRACT

Abstract

This work was conducted on the aquifers of the Maghnia region (North-West Algeria). This is a hydrogeochemical characterization and qualitative assessment of groundwater for consumption and irrigation purposes, using multiple approaches focusing on the use of simplified diagrams, indices and models, digitally processed using Geographic Information Systems (GIS).

Twenty-eight (28) groundwater samples were taken and analyzed during March 2024, in an area covering an area of 393.34 km², encompassing the entire Maghnia plain and part of the Béni-Boussaid region. The physicochemical analyses concerned temperature (T), pH, electrical conductivity (EC), TDS and major ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ and NO₃⁻). The diagrams used indicate that the waters are generally with hydrogeochemical facies of the sodium chloride type, and are of alkaline character with a predominance of strong acids.

In addition, the high mineralization (632 – 3909 mg/L, average: 1421.65mg/l) and the worrying nitrate concentrations (> 50 mg/L set by JORA and WHO) in several sampling points, significantly affect the taste of groundwater and thus make it unfit for human consumption.

For agricultural use, classifications based on FAO standards, irrigation indices (TH, SAR, SSP, IP, MH,...) and Wilcox and Richards diagrams, show that groundwater quality is generally moderate to poor, especially in the Northern and Northeastern parts. These areas are characterized by excessive Na⁺ and Cl⁻ values, which cause specific adverse effects on the physical and chemical properties of soils and plants.

Finally, the use of the nitrate pollution (NPI), drinking water quality (DWQI) and irrigation (IWQI) indices, coupled with the Geographical Information System (GIS), allowed spatialization of groundwater quality. The interpolations of the NPI and DWQI index values have spatialization similarities. Areas with poor quality in terms of potability are mainly those with high nitrate pollution. As for their use for irrigation purposes, the waters are, according to IWQI, high to severe restriction for the study area. They are only suitable for plant irrigation at high salt tolerance with special salinity control practices.

Keywords: Maghnia, Groundwater, Models, Quality, GIS, Indices.

INTRODUCTION

Introduction

I. PROBLEMATIQUE

La durabilité de la gestion des ressources hydriques constitue un enjeu de taille à l'échelle planétaire, notamment dans les zones semi-arides telles que la région de Maghnia, localisée dans le Nord-ouest de l'Algérie. Cette région est soumise à une pression humaine intense et à des conditions climatiques variables, est confrontée à des défis complexes concernant la qualité et la disponibilité de ses ressources en eau.

L'évaluation précise de la qualité des eaux souterraines dans la plaine de Maghnia est devenue essentielle afin de garantir une gestion efficace et durable de ces ressources. Néanmoins, les méthodes classiques d'évaluation de la qualité de l'eau, qui reposent sur l'analyse de divers paramètres physico-chimiques, peuvent être insuffisantes pour comprendre pleinement la complexité des relations entre les différents facteurs qui impactent la qualité de l'eau à l'échelle régionale.

Dans ce cadre, l'incorporation de modèles simplifiés pour évaluer la qualité de l'eau et d'irrigation (IWQI), comme les indices de qualité de l'eau (DWQI) et l'indice de pollution (IP), conjointement avec l'exploitation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), présente une approche novatrice et prometteuse. Cette approche méthodologique permet d'évaluer de manière plus exhaustive la qualité des ressources hydriques souterraines, tout en les cartographiant pour une meilleure appréhension des processus chimiques en cours dans la région.

II. OBJECTIFS

Les réserves d'eau souterraine et de surface dans la région de Maghnia (Nord-ouest Algérien), dédiées à l'approvisionnement en eau potable et à l'irrigation sont confrontées à des défis de plus en plus importants en matière de qualité, principalement en raison des pratiques agricoles intensives et de la surutilisation des engrais azotés. Dans la lignée des recherches précédentes portant sur la qualité de l'eau dans la région, cette étude a pour objectif d'analyser de façon approfondie la qualité des eaux de la région de Maghnia.

Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants : (1) analyser les caractéristiques physico-chimiques et chimiques des eaux, (2) évaluer la minéralisation des eaux souterraines et leurs interactions avec le contexte géologique, (3) évaluer la qualité des eaux en termes de potabilité et d'adéquation à l'irrigation, (4) appliquer des indices de qualité de l'eau (WQI) pour une évaluation holistique, et (5) cartographier les résultats afin d'identifier les zones les plus affectées par la pollution chimique.

III. STRUCTURE DU MEMOIRE

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres, précédés d'une introduction exposant la problématique et les objectifs de l'étude. Ces chapitres sont achevés par une conclusion.

Le premier chapitre présente le cadre physique de l'étude, incluant les généralités géographique, climatique, géologique et hydrogéologique de la région de Maghnia ;

Le deuxième chapitre détaille la méthodologie employée, couvrant les travaux de terrain et de laboratoire, ainsi que les méthodes de traitement des données hydrogéochimiques et qualitatives ;

Le troisième chapitre se concentre sur l'analyse géomorphologique et climatique de la zone d'étude ;

Le quatrième chapitre est consacré à une synthèse géochimique suivie d'une évaluation qualitative des eaux souterraines ;

Le cinquième chapitre fait état de la pollution spécifique et de la qualité des eaux souterraines à des fins de consommation humaine et d'irrigation, tout en appliquant les modèles mathématiques simplifiés.

PREMIER CHAPITRE
CADRE PHYSIQUE

Premier chapitre : Cadre physique

I. CONTEXES GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUES

A. Contexte géographique

1. Situation géographique

Située dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie, à 60 km de l'ouest de la ville de Tlemcen, la daïra de Maghnia s'étend sur une surface d'environ 351 km² à une altitude comprise entre 370 et 450 mètres. Ses frontières sont délimitées par les montagnes des Traras au Nord, par les contreforts des monts de Tlemcen au Sud et à l'Est ainsi que par la frontière marocaine à l'Ouest et au Sud-Ouest (Fig. 1).

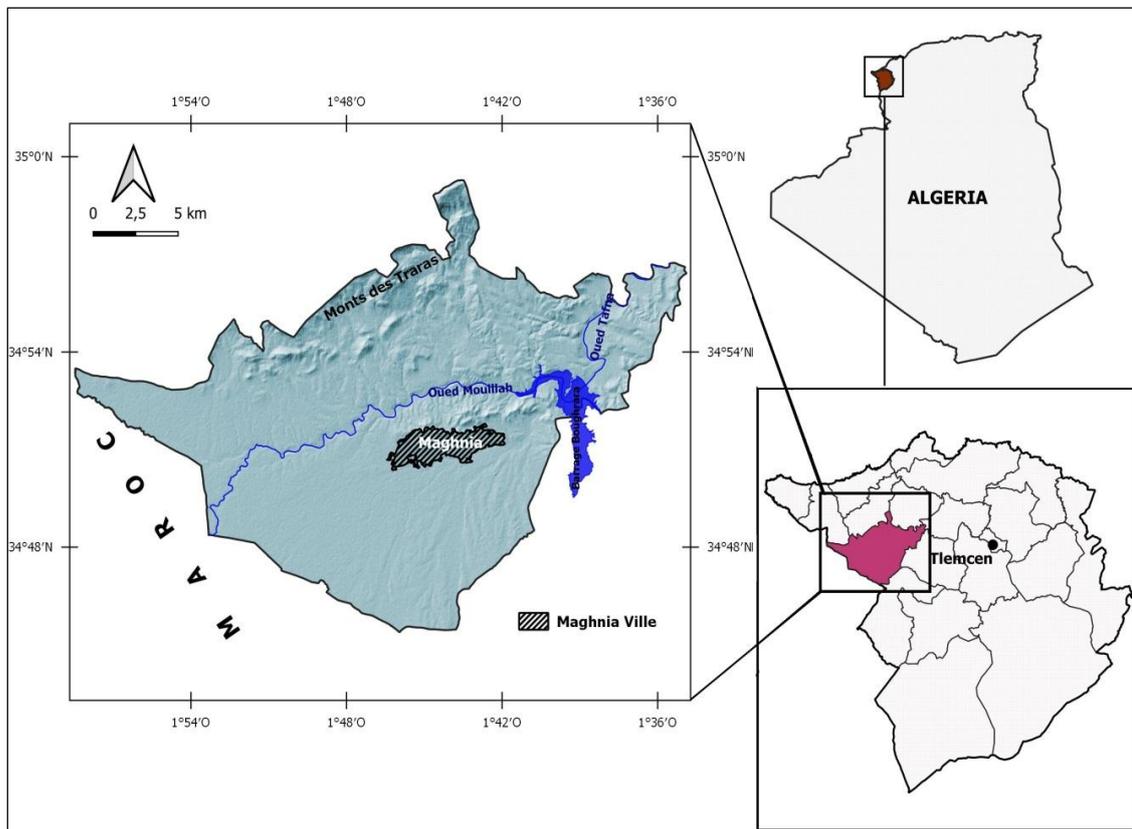


Figure 1. Situation géographique de la plaine de Maghnia.

2. Occupation de sol

L'occupation des sols dans la plaine de Maghnia est principalement caractérisée par une mosaïque d'activités agricoles et de zones urbaines. Les terres agricoles dominent le paysage, avec une prédominance de cultures céréalières et maraîchères. On y trouve également des vergers, notamment d'oliviers, qui sont bien adaptés au climat méditerranéen de la région. L'expansion urbaine, notamment autour de la ville de Maghnia, a progressivement empiété sur certaines terres agricoles au fil des années (Benmansour et al. 2019).

3. Réseau hydrographique

La région de Maghnia est dotée de deux principaux cours d'eau à savoir :

- *Oued Mouilah* : un affluent majeur de la rive gauche de la Tafna, qui prend naissance dans la région d'El Abed, en Algérie, à une altitude de 1250 mètres, puis entre au Maroc sous le nom d'Oued Isly, qui suit un cours intermittent. Il se stabilise à 490 m d'altitude en aval de la ville d'Oujda (Maroc), sous le nom d'oued Bou Naïm, puis entre en Algérie, aux environs de Maghnia, et prend le nom d'oued Mouilah (Baba Hamed 2007) ;

- *Oued Ouardefou* qui draine les Oueds El Abbès, Aouina et Mehaguène. Ces deux oueds définissent deux zones de drainage dont l'une (Oued Mouilah) s'étend au Nord de la ville de Maghnia et comprend la plaine des Angads au sens large et dont l'autre (Ouardefou) correspond à la plaine de Maghnia proprement dite. Entre les deux, le bombement des Béni-Ouassine constitue un seuil peu élevé qui interdit toute communication naturelle (Baba Hamed 2007).

L'Oued Mouilah et l'Oued Ouardefou confluent en aval de Maghnia et constituent l'exutoire superficiel du bassin fermé, de la plaine d'effondrement de Maghnia (Fig. 2).

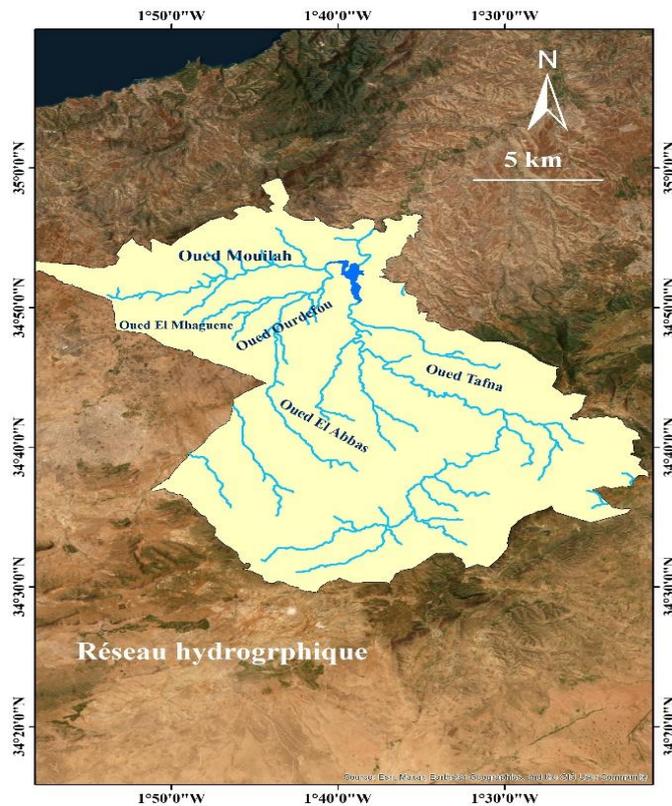


Figure 2. Réseau hydrographique de la plaine de Maghnia.

B. Contexte climatique

La région de Maghnia est caractérisée par un climat semi-aride à aride. Ses hivers sont doux et humides, et ses étés sont chauds et secs. Une étude récente réalisée sur une chronique de 30 ans (1989/90-2018/2019) révèle que la température moyenne annuelle est de $17,76\text{ C}^{\circ}$, les précipitations interannuelles sont de l'ordre de 285mm et que l'évapotranspiration réelle (ETR) égale les 274,96, représentant ainsi 96% des sollicitations de la région (Bendjeffal et Chater 2020).

II.CONTEXES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

A. Aperçu tectonique

Etudiée dans plusieurs travaux antérieurs (Lucas 1942 ; Guardia 1975 ; Benest 1982 ; ...), la région de Maghnia est affectée par une tectonique souple marquée par un pli synclinal et une tectonique cassante peut intense représentée essentiellement par les failles du type atlasique, qui est caractérisée par des mouvements compressifs puis distensifs, cette phase a contribué à la formation de structures coulissantes et chevauchantes.

La plaine de Maghnia est une zone très déprimée traversée par des accidents cassants. Elle est formée par une architecture compartimentée et accompagnées de fissures secondaires de direction NW et NE qui contrôlent la minéralisation en profondeur.

Cette dépression structurale correspond à la plaine elle-même, formant un bassin sédimentaire important pour les ressources en eau de la région.

B. Aperçu lithostratigraphique

Les descriptions lithostratigraphiques de la région d'étude établies principalement dans des travaux de : Lucas (1942), Perrondon (1957), Bonnet (1965), Elmi (1978, 1983), Benest (1981, 1982, 1985), Benest et Bensalah (1999) ..., sont résumés dans l'ordre ascendant comme suit (Fig. 3) :

1. Paléozoïque

Formant l'ossature de la région, il est principalement constitué de schistes et de quartzites orientés SW-NE. La série comprend des formations du Silurien au Permo-Trias, avec des schistes, quartzites, et formations détritiques (Bonnet 1965 *in* Baba Hamed 2007) :

- *Silurien* : schistes plissés et métamorphisés ;
- *Dévonien* : schistes et quartzites, avec des inclusions de microbrèches et parfois des granites à tourmaline ;
- *Carbonifère* : schistes rubéfiés ;
- *Permo-Trias* : formation détritique à galets hétérogènes et hétérométriques cimentés par des argiles rougeâtres.

2. Mésozoïque

Reposant en discordance et en transgression sur le primaire, il est constitué principalement par une série de formation principalement carbonatée d'âge jurassique d'une épaisseur supérieure à 1000m, on y distingue :

- Jurassique inférieur et moyen :
 - *Lias inférieur* : calcaires bleuâtres avec passées dolomitiques ;
 - *Lias moyen* : calcaires homogènes charmouthiens ;
 - *Lias supérieur* : calcaires à encolithes de Belaïch ;
 - *Aaléno-Bajocien* : calcaires à oolithes ferrugineuses ;
 - *Bathonien* : oolithes ferrugineux et calcaires gris à micro-gréseux.
- Jurassique supérieur : formé par
 - *Callovo-Oxfordien* : Représenté par les Argiles de Saïda, un ensemble grésopélitique riche en ammonites (macrocéphalites) et présentant des figures sédimentaires diverses. Affleurements aux Djebel Tizinbine et Djebel Boukhellal ;

- *Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur* : constitué par les grès de Boumédiène, Calcaire de Zarifet et Dolomies de Tlemcen ;
- *Kimméridgien-Tithonique* : formé par les Marno-calcaires de Rarouraï, Calcaires de Lato, Dolomies de Terni, Marno-calcaires de Hariga et les Marno-calcaires d'Ouled Mimoun.

3. Cénozoïque

Le Cénozoïque dans la région de Maghnia est principalement représenté par le Miocène transgressif, caractérisé par une séquence sédimentaire évoluant latéralement :

- *En bordure du bassin* : Bande de grès calcaires d'âge Tortonien, reposant directement sur le Jurassique au Nord et au Sud de la plaine ;
- *Vers le centre du bassin* : Transition progressive vers des horizons argileux ou marneux d'âge Serravalien, atteignant environ 500 m d'épaisseur.

4. Plio-Quaternaire

Le Plio-Quaternaire se présente comme une série complexe de dépôts discontinus et hétérogènes. L'analyse stratigraphique des puits et forages révèle plusieurs faciès :

- *Marnes rouges* : Peu ou pas de galets, plus ou moins tufeuses, particulièrement épaisses dans le sous-bassin de l'Oued Abbès ;
- *Anciennes alluvions* : Séquence variée allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets, en passant par les limons et les graviers ;
- *Dépôts récents* : Limons, sables et graviers s'étendant entre Oued Mehaguène et Chabet El Arneb au NE de la frontière algéro-marocaine. Les limons, généralement jaunes avec des couches rougeâtres, surmontent des lits de galets.
- *Éléments volcaniques* : Lambeaux de basaltes inter-stratifiés au NW de la plaine, témoignant d'une activité volcanique coïncidant avec une période d'instabilité régionale.

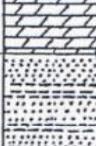
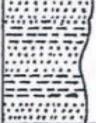
Epais	Perméabilité	Coupe	Description géologique	Formation
80	Perméable		Dépôt alluvionnaire et lacustre	Plio-Quaternaire
50 à 800	Imperméable		Marnes bleu ,sableuses à la base et grès calcaires	Miocène
	Perméable		Grès	Miocène
100	Perméable		Dolomies	Dolomies de Terny
100	Perméable		Marnes et calcaires marneux	Marno-Calcaire de Raouraï
250	Perméable		Dolomies	Dolomies de Tlemcen
300 à 400	Peu perméable		Grès quartzeux avec bancs de marnes vertes et Lie de vin	Grès de boumedienne
150 à 250	Imperméable		Marnes gris et argiles schisteuses	Callovo-Oxfordien
100 à 200	Perméable		Calcaire gréseux	Jurassique moy
200 à 300	Perméable		Calcaires oolithique et dolomies	Jurassique inf
?	Imperméable		Marnes vidacées ,gypsifère et grès grossiers rouges avec intercallation argileuses	Permo-Trias
?	Imperméable		Granite à tourmaline schistes et quartzites	Primaire

Figure 3. Série lithostratigraphique (Bonnet M., 1965 *in* Baba Hamed 2007).

C. Hydrogéologique de la région

Dans la région objet de la présente étude, Bonnet (1965,1978) avait décrit les principales formations géologiques perméables et qui sont reconnues comme aquifère potentiel. Il s'agit de :

L'aquifère de la plaine de Maghnia composé d'un remplissage plio-quaternaire d'épaisseur variable et très hétérogène. Il est constituées principalement de graviers, sables et limons, qui ont une épaisseur variable, allant de quelques dizaines de mètres (<50m) dans la partie Nord et Est de plaine, à des épaisseurs comprises entre 50 à 70m occupant la partie centrale, jusqu'aux épaisseurs maximales atteignant les 170 m, situées aux Nord-Ouest de la plaine de Maghnia (Baba Hamed 2007).

Ces formations aquifères reposent sur un substratum marneux du Miocène (Serravalien), qui affleure en périphérie de la plaine avant de plonger sous les alluvions.

L'analyse piézométrique établie sur des campagnes de 1995, 2003 et 2010 (Baba Hamed 2007), a montré que la direction préférentielle des écoulements est convergent vers

le nord-est. L'écoulement semble suivre le paléo-chenal en direction du seuil de Maghnia (D.R.E. 2003). Le gradient hydraulique est variable, probablement dû à l'hétérogénéité du terrain.

La recharge de l'aquifère de la plaine de Maghnia se fait essentiellement par l'infiltration des eaux de pluie et des oueds, notamment l'oued Mouillah et ses affluents. Dans la zone Sud, l'alimentation principale provient des affleurements jurassiques des Monts de Tlemcen.

Enfin, les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe de Maghnia obtenues au cours des essais de pompage des forages réalisés par les services de la direction d'hydraulique de Tlemcen (DHW) montrent que les valeurs de transmissivité (T) varient de $9,9 \cdot 10^{-3}$ à $1,2 \cdot 10^{-2}$ m²/s, les valeurs de perméabilité (K) sont comprises entre $6 \cdot 10^{-4}$ m/s et $2,4 \cdot 10^{-2}$ m/s et le coefficient d'emménagement à des valeurs évoluant de $4 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$ (Baba Hamed 2007).

DEUXIEME CHAPITRE
METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Les caractéristiques des points d'eau échantillonnés, sont mentionnées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des points d'échantillonnage des eaux souterraines.

Point d'eau	X_Coord. (m)	Y_Coord. (m)	Altitude (m)	Type	Profondeur (m)
F1	-1,73725	34,8282	399	Forage	135
F2	-1,736781	34,827561	399	Forage	/
F3	-1,737806	34,817497	413	Forage	180
F4	-1,739061	34,817858	410	Forage	180
F5	-1,761872	34,814983	421	Forage	200
F6	-1,761872	34,814983	421	Forage	200
F7	-1,763369	34,814181	413	Forage	/
F8	-1,829122	34,817981	430	Forage	140
F9	-1,718453	34,820797	408	Forage	200
F10	-1,797697	34,818867	418	Forage	200
F11	-1,802978	34,812978	424	Forage	315
F12	-1,795469	34,842122	409	Forage	200
F14	-1,795194	34,842342	409	Forage	70
F15	-1,851819	34,867989	434	Forage	150
F16	-1,841436	34,810008	434	Forage	150
F18	-1,718253	34,892583	394	Forage	/
F19	-1,750744	34,915589	469	Forage	/
F20	-1,752639	34,912253	462	Forage	140
F21	-1,752836	34,912525	463	Forage	463
F22	-1,753203	34,912861	460	Forage	115
P24	-1,7407	34,847225	395	Forage	/
F25	-1,820441	37,390351	740	Forage	/
F26	-1,827842	37,406569	726	Forage	120
F27	-1,836406	37,240722	705	Forage	70
F28	-1,837417	37,213667	704	Forage	126
F29	-1,835642	37,223611	705	Forage	106
F30	-1,842639	37,125417	698	Forage	80
P31	-1,825831	36,668417	732	Puit	12
P32	-1,825786	36,670833	732	Puit	12

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène de 250 ml. Deux flacons d'eau ont été collectés pour chaque point d'échantillonnage, l'un pour l'analyse des cations et l'autre pour les anions. Ces flacons ont été minutieusement lavés avec l'eau à analyser, puis refermés hermétiquement avant d'être transportés dans des sacs isothermes et des glacières. À leur arrivée au laboratoire, les flacons ont été conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4 °C.

Des analyses de quelques paramètres physiques ont été réalisées sur place (In situ) au moment du prélèvement. Il s'agit de la température, du pH, mesurés avec un pH-mètre de type **EXTECH**, de la conductivité électrique (CE) et du total des sels dissous (TDS) estimés par le multi-paramètre **Isolab-Multiparameter**.

B. Au laboratoire

Des analyses chimiques ont été réalisées par l'utilisation de la méthode de la chromatographie ionique pour mesurer les teneurs en cations: sodium (Na⁺), potassium (K⁺),

calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et les teneurs en anions: chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), et nitrate (NO_3^-). Seuls les bicarbonates (HCO_3^-) ont été dosés par la méthode titrimétrique (Annexe. 1).

La fiabilité des analyses chimiques effectuées au laboratoire est contrôlée par l'utilisation de l'expression suivante :

$$\text{BI} = \frac{|\sum r^+ - \sum r^-|}{\sum r^+ + \sum r^-}$$

Avec : BI : Balance ionique ; r^+ : Quantité en réaction cationique, r^- : Quantité en réaction anionique.

Dans la plupart des laboratoires d'analyse des eaux, une balance ionique inférieure à 5 % est considérée comme acceptable (Freeze et Cherry 1979).

II. METHODES DE TRAITEMENT

A. Traitement Hydrogéochimique

1. Faciès hydrogéochimiques

Le faciès hydrogéochimique est une identification géochimique des eaux naturelles dans un système hydrologique. Il reflète les différents processus chimiques complexes entre des eaux et les minéraux des formations lithologiques dans le sous-sol (Kumar 2013, Yebdri 2023).

La délimitation de la variation des faciès a été observée par l'utilisation des diagrammes d'identification de faciès réalisés à l'aide du logiciel d'hydrochimie multi-langage en distribution libre : **DIAGRAMMES (Version. 6.77)** développé par Roland SIMLER du laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (France), Il s'agit de :

1.1. Diagramme de Piper

Modifié par Langguth (1966), le diagramme de Piper se compose de trois champs distincts. Deux champs triangulaires et un champ en forme de losange (Fig. 5). Les concentrations en cations, exprimées en pourcentage de leur total en milliéquivalents par litre (meq/L), sont représentées par un seul point sur le triangle gauche. Par contre, le point représentatif des teneurs en anions, exprimé par rapport aux anions (en %) se place dans le triangle droit (Piper 1944). Chaque point est ensuite projeté dans le champ losangique, le long d'une ligne parallèle à sa marge supérieure, et le point où l'extension se recoupe indique le caractère de l'eau tel que représenté par la relation entre Na^+ , K^+ , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$, Cl^- et SO_4^{2-} .

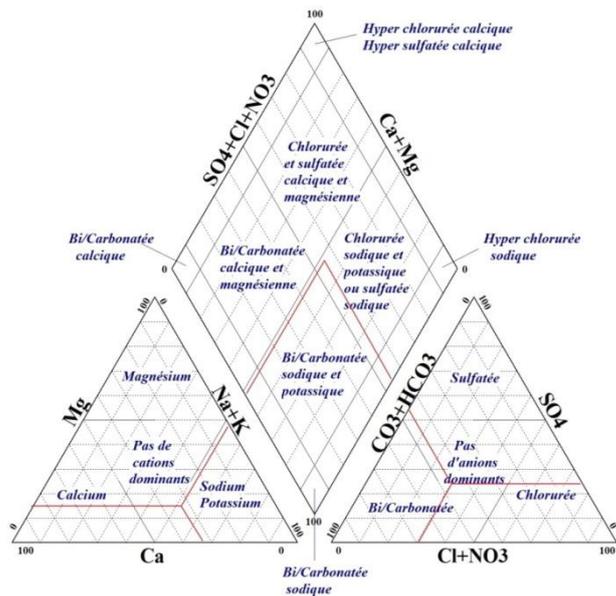


Figure 5. Diagramme de Piper (1944).

1.2. Diagramme de Scholler-Berkaloff

Le diagramme de Scholler-Berkaloff (Schoeller, 1962), développé spécifiquement pour l'étude des eaux souterraines, est un outil semi-logarithmique permettant de visualiser les variations des concentrations ioniques le long du flux d'écoulement souterrain (Fig. 6).

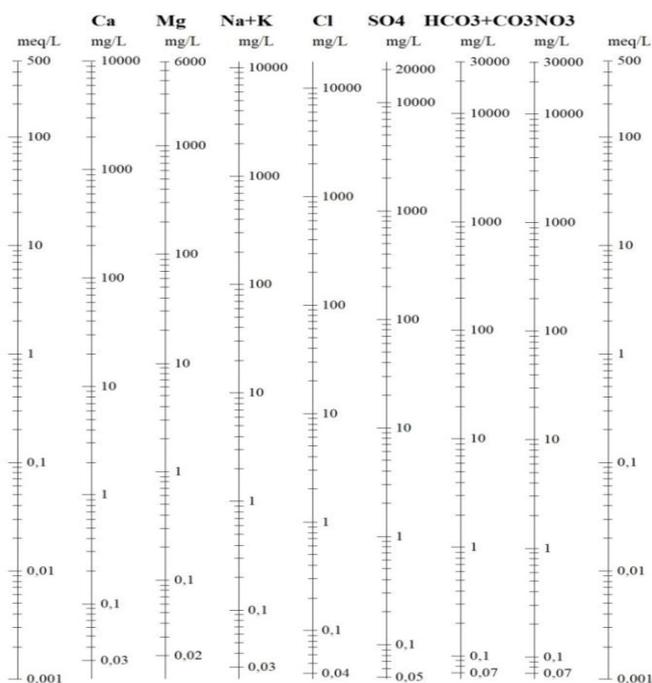


Figure 6. Diagramme de Schoeller-Berkalof.

1.3 Diagramme de Durov (1948)

Le diagramme de Durov, proposé par DUROV en 1948, est un outil graphique polyvalent permettant d'interpréter les données géochimiques des eaux souterraines et de surface (Durov 1948 ; López-chizhevsky et al. 2021).

Le diagramme de Durov est divisé en trois parties distinctes :

1. Deux triangles équilatéraux représentant respectivement les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) et les anions ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , Cl^-).
2. Un champ rectangulaire central où les points représentant les échantillons d'eau sont projetés à partir des triangles cationique et anionique.
3. Une série de bandes verticales et horizontales subdivisant le champ rectangulaire en différentes zones caractéristiques des faciès hydrogéochimiques.

Ce diagramme a comme particularité, de renseigner sur les processus géochimiques impliqués dans l'acquisition du chimisme des eaux, (Fig7 et tableau 2).

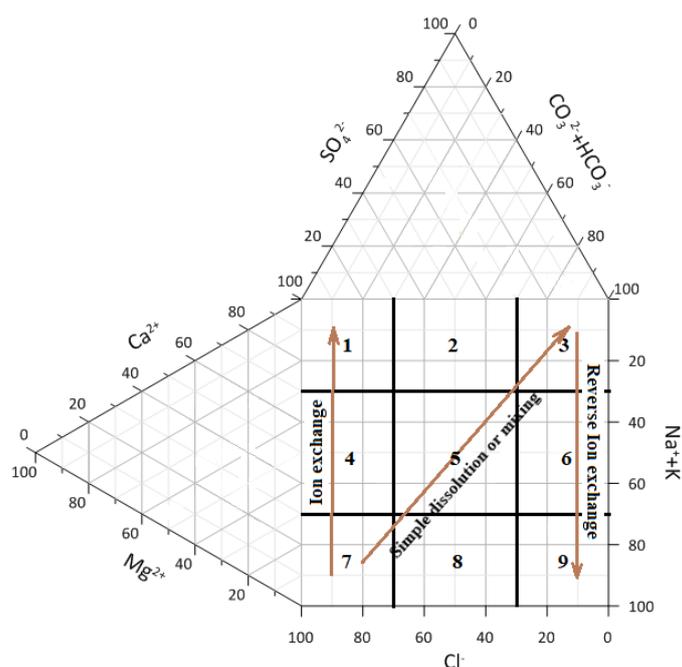


Figure 7. Diagramme de Durov (Lloyd et Heathcoat 1985).

Tableau 2. Classification des eaux selon le diagramme de Durov (Lloyd and Heathcoat, 1985).

Type d'eau

1	Dominance de HCO ₃ et Ca : indique fréquemment la recharge des eaux dans les calcaires et grès et de nombreux autres aquifères.
2	Ce type d'eau est dominé par les ions Ca et HCO ₃ . L'association avec la dolomite/dolomie est présumée, si le Mg est significatif. Cependant, dans les échantillons où Na est significatif, un échange d'ions important est présumé.
3	HCO ₃ et Na sont dominants : indique normalement une eau ayant subi un échange d'ions, bien que la génération de CO ₂ en profondeur puisse produire du HCO ₃ où Na est dominant dans certaines circonstances.
4	SO ₄ dominant, ou anion discriminant et Ca dominant, Ca et SO ₄ dominants : indiquent fréquemment de l'eau de recharge dans la lave et les dépôts gypsifères, sinon de l'eau mélangée ou l'eau présentant une dissolution simple peut être indiquée.
5	Aucun anion ou cation dominant : indique une eau présentant une dissolution ou un mélange simple.
6	SO ₄ dominant ou anion discriminant et Na dominant : indique un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et révèle des influences probables de mélange ou de dissolution rares.
7	Les prépondérances de Cl et Na sont fréquemment rencontrées sauf en cas de pollution industrielle. Sinon, ils peuvent résulter d'un échange ionique inverse des eaux chlorurées sodiques.
8	L'anion dominant Cl et le cation dominant Na, indiquent que les eaux souterraines sont liées à l'échange d'ions inverse des eaux chlorurées sodiques.
9	La dominance du Cl et de Na indique fréquemment le point le plus bas (descendant) du gradient hydraulique par dissolution.

En général, l'évaluation géochimique de l'eau, particulièrement celle de l'eau souterraine, peut être comprise en construisant les deux diagrammes de Piper et de Durov. Ces derniers révèlent des similitudes et des différences entre les échantillons d'eau, en regroupant ceux qui sont de même qualité chimique (Todd et Mays 2004 ; Ravikumar et al. 2015 ; Yebdri 2023).

2. Minéralisation des eaux souterraines

2.1. Indice de Saturation

L'indice de saturation (SI) est un paramètre fondamental en géochimie des eaux, permettant d'évaluer l'état d'équilibre entre une solution aqueuse et une phase minérale (Merkel et al. 2008). Définissent le SI comme le logarithme du rapport entre le produit d'activité ionique (IAP) et le produit de solubilité (K_{sp}) d'un minéral donné. Il s'exprime selon l'équation :

$$SI = \log \frac{IAP}{K_{sp}}$$

L'interprétation du SI permet de caractériser l'état de saturation de l'eau (Merkel et al. 2008):

- SI > 0,05 : sursaturation ;
- -0,05 < SI < 0,05 : équilibre approximatif ;
- SI < -0,05 : sous-saturation.

Dans cette étude, l'exploration des propriétés géochimiques l'encaissant, qui a été à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines à travers les calculs des SI a été réalisée par l'utilisation du code **Phreeqc** installé en même temps que le logiciel **DIAGRAMMES (v.77)**.

2.2. Indices Chloro-alkalins

L'échange cationique constitue un processus géochimique significatif dans les interactions eau-roche au sein des aquifères.

Schoeller (1965) a élaboré deux indices chloro-alkalins, Nommés : CAI-1 et CAI-2, pour quantifier et caractériser ces échanges ioniques. Ils se calculent selon les formules suivantes (Yebdri 2023).

$$\text{CAI} - 1 = \frac{[\text{Cl}] - [\text{Na} + \text{K}]}{[\text{Cl}]}$$

$$\text{CAI} - 2 = \frac{[\text{Cl}] - [\text{Na} + \text{K}]}{[\text{SO}_4 + \text{HCO}_3 + \text{NO}_3]}$$

D'après Schoeller (1977), Si :

- CAI-1 et CAI-2 < 0 (Valeur négative) ⇒ Dominance de l'échange d'ions direct (Le calcium de l'eau est échangé contre le sodium ou le potassium du terrain) ;
- CAI-1 et CAI-2 > 0 (Valeur positive) ⇒ l'échange d'ions inverse (Fixation du sodium ou du potassium et solubilisation du calcium).

2.3. Indices d'échanges IEB et IGM

L'indice d'échange de base (IEB) renseigne sur le type d'eau et celui de genèse météorique (IGM) indique l'origine de l'eau (Matthess 1982). Ils se calculent par les équations suivantes :

$$\text{IEB} = \frac{[\text{Na} - \text{Cl}]}{\text{SO}_4}$$

IEB < 1 ⇒ l'eau est de type Na – SO₄ ;

IEB > 1 ⇒ L'eau est de de type Na – HCO₃.

$$\text{IGM} = \frac{[(\text{Na} + \text{K}) - \text{Cl}]}{\text{SO}_4}$$

IMG < 1 ⇒ Eau peut être de type de percolation d'eau météorique profonde ;

IMG > 1 ⇒ d'eau météorique de surface et peu profonde.

B. Traitement qualitatif des eaux souterraines

1. Qualité des eaux pour la consommation humaine (Potabilité)

Chimiquement, une eau potable doit contenir, sans excès, un certain nombre d'éléments minéraux dont la présence lui confère une saveur agréable à l'exclusion de ceux qui seraient l'indice de contamination ainsi que toute autre substance toxique (Albinet 1963).

Les résultats des différents paramètres analysés, pour la totalité des points d'eau, sont comparés aux normes algériennes de potabilité publiées sur le Journal officiel de la République Algérienne (JORA 2011) ainsi qu'aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2017).

2. Qualité des eaux à des fins d'irrigation

2.1. Classification des eaux d'irrigation selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* : FAO)

Ayers et Westcot (1985) ont proposé une classification des problèmes potentiels liés à l'irrigation en quatre catégories principales :

1. *Risque de salinité* particulièrement préoccupant, car une accumulation excessive de sels dans le sol peut gravement affecter la croissance des cultures et la structure du sol (Tableau 3) ;
2. *Problèmes d'infiltration et de perméabilité* peuvent compromettre l'efficacité de l'irrigation en modifiant la capacité du sol à absorber et retenir l'eau (Tableau 3) ;
3. *Risques de toxicité* qui peuvent être subdivisés en deux catégories : ceux associés à des ions spécifiques et ceux liés à la présence d'éléments traces et de métaux lourds. Ces toxicités peuvent avoir des effets directs sur la physiologie des plantes, affectant leur croissance et leur rendement (Ayers et Westcot 1985). Il est important de noter que la sensibilité aux différents ions toxiques peut varier considérablement selon les espèces végétales (Grattan et Grieve 1998) (Tableau 3). Vu l'absence de données des métaux lourds, leurs risques de toxicité ne seront pas traités dans le chapitre consacré à cette étude ;
4. *Effets divers* sur les cultures sensibles irriguées : il existe des paramètres supplémentaires qui doivent être évalués quant à l'utilisation des eaux à des fins d'irrigation, à l'exemple du pH de l'eau et des concentrations en ions bicarbonate et nitrates (Tableau 3).

Tableau 3. Directives pour l'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation (Ayers et Westcot 1985).

Problèmes potentiels d'irrigation		Unités	Néant	Léger à modéré	Sévère
Salinité	EC	$\mu\text{S cm}^{-1}$	<700	700 – 3000	>3000
	TDS	mg /L	<450	450 –2000	>2000
Infiltration	SAR 0–3	EC =	>700	700 – 200	<200
	SAR 3–6	EC =	>1200	1200 – 300	<300
	SAR 6–12	EC =	>1900	1900 – 500	<500
	SAR 12–20	EC =	>2900	2900 – 1300	<1300
	SAR 20–40	EC =	>5000	5000 – 2900	<2900
Toxicité ionique spécifique	Sodium (Na^+)	SAR	<3	3 – 9	>9
	Chloride (Cl^-)	mg /L	<140	140 – 350	>350
Effets divers	Nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)	mg /L	< 5	5 – 30	>30
	Bicarbonate (HCO_3^-)	mg /L	< 91,5	91,5 – 518,5	>518,5
	pH	/	Classe normale	6,5 – 8,5	

2.2. Indices d'irrigation

Des informations sur plusieurs aspects sont offertes à partir des calculs des indices d'irrigation, dont le risque de salinisation et de sodification, l'impact sur la perméabilité du sol, ainsi que les déséquilibres ioniques.

Cette tranche de l'étude se centralisera sur une analyse détaillée des principaux indices d'irrigation; ceci visera une meilleure compréhension de la répartition qualitative des eaux et même contribuera à une gestion durable et efficace de l'irrigation.

Le tableau 4 regroupe les différents indices d'irrigation utilisés dans la présente étude.

Tableau 4. Indices d'irrigation utilisés.

Paramètres	Expression	Classes d'eau	Qualité des eaux d'irrigation	Références
Dureté total (mg /L de CaCO_3)	$\text{TH} = \text{Ca} \times \frac{\text{CaCO}_3}{\text{Ca}} + \text{Mg} \times \frac{\text{CaCO}_3}{\text{Ca}}$	0 - 75	Douce	Sawyer et Mccarty 2003
		75 - 150	Modérément dure	
		150 - 300	Dure	
		> 300	Très dure	
Le pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%)	$\text{SSP} (\%) = \frac{\text{Concentration de Sodium soluble}}{\text{concentration cationique totale}} \times 100$	< 20	Excellente	Wilcox 1955
		20 - 40	Bonne	
		40 - 60	Admissible	
		60 - 80	Médiocre	
		> 80	Inappropriée ou mauvaise	
Risque du magnésium (MH)	$\text{MH} = \frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \times 100$	< 50%	L'eau convient à l'irrigation	Szabolcs et Darab 1964; Lloyd et Heathcoat 1985
		51 - 65	Moyenne	
		> 65	Mauvaise	
Le carbonate de sodium résiduel (RSC)	$\text{RSC} = [\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$	< 1,25	Bonne	Eaton 1950; Durand 1973
		1,25 - 2,5	Médiocre	
		> 2,5	Inappropriée	
L'indice de Permeabilité (PI)	$\text{PI} = \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \times 100$	> 75	Adaptée	Doneen 1964
		25 - 75	Modérée	
		<25	Inappropriée	
Rapport de Kelly (KR)	$\text{KR} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$	< 1	Adaptée	Kelly 1940, 1963
		1 - 2	Peu convenable	
		> 2	Inappropriée	
Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC)	$\text{RSBC} = \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$	<5	Satisfaisant	Roberts et al., 1990
		5-10	Marginal	
		>10	Insatisfaisant	

2.3. Diagramme de classification des eaux

Les diagrammes les plus cités et les plus utilisés pour la classification des eaux d'irrigation vont être utilisés dans ce travail, à savoir :

2.3.1. Diagramme de WILCOX

Wilcox (1948) a proposé une classification basée sur la schématisation de la relation entre l'indice de pourcentage de sodium (Na %), la conductivité électrique (EC) et la salinité (TDS) (Fig. 8).

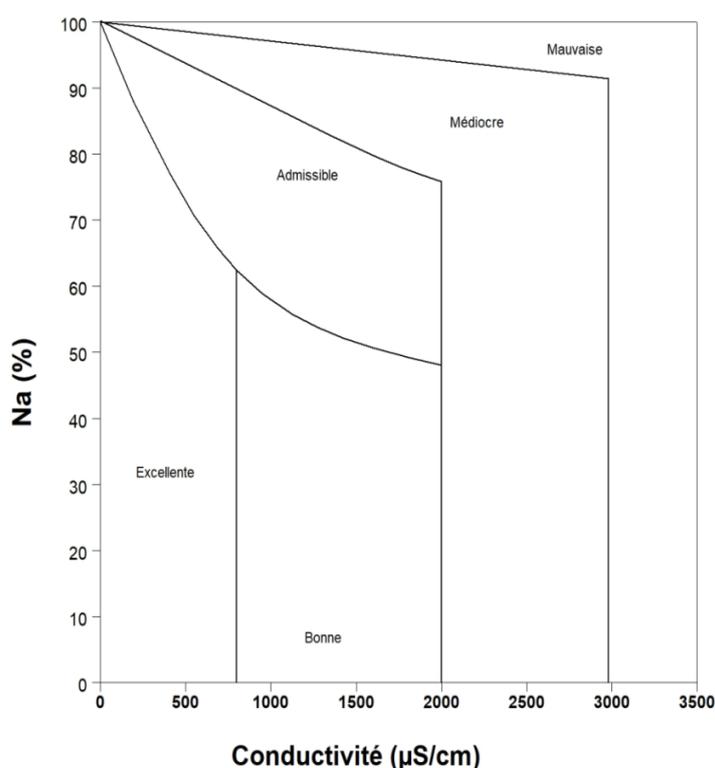


Figure 8. Diagramme de Wilcox (1948).

2.3.2. Diagramme de RICHARDS

Ce diagramme correspond à un graphique comprenant le risque de salinité (CE) sur l'axe des abscisses et celui de la sodicité (SAR) sur l'axe ordonné. Il classe les eaux, en quatre catégories (C1, C2, C3 et C4) sur la base du risque de salinité et quatre autres (S1, S2, S3 et S4) selon le risque lié au soduim (SAR) (Richards 1954).

L'interprétation des classes de la qualité sur le diagramme de Richards est illustrée sur le tableau 5.

Tableau 5. Classification de la qualité des eaux d'irrigation sur Diagramme de Richards (Durand 1982).

Classes	Description
C1-S1	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
C1-S2 et C2-S1	Eau de qualité bonne à moyenne à utiliser avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles.
C1-S3, C2-S2 et C3-S1	Eau de qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1	Eau de qualité médiocre à mauvaise, à utiliser avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
C2-S4, C4-S2, C3-S3	Eau de qualité très mauvaise à utiliser que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou d'apport de gypse.
C3-S4, C4-S3	Qualité très mauvaise, à n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles.
C4-S4	Eau déconseillée pour l'irrigation.

C. Traitement par modèles simplifiés (Indice de qualité des eaux WQI)

Le principe des modèles simplifiés de qualité est de classer les eaux de surface et souterraines, en fonction de leurs caractéristiques biologiques, chimiques et physiques, qui décrivent les possibilités de leurs utilisations et qui gèrent leurs allocations. Ces modèles calculés à base d'indices de qualité peuvent être considérés comme une réalité complexe, où des variables sont sélectionnées et des méthodes de poids et d'agrégation sont définies (Kachroud et al. 2019).

1. Indice de pollution par les nitrates (NPI : *The Nitrate Pollution Index (NPI)*)

Le NPI est un indice de qualité de l'eau à paramètre unique, destiné à évaluer le niveau de pollution par les nitrates (Obeidat et al. 2012), et peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$NPI = \frac{C_s - HAV}{HAV}$$

Où ;

C_s : représente la concentration mesurée de nitrate de chaque échantillon,

HAV est la valeur affectée par l'humain, prise à 20 mg/L (Obeidat et al. 2012).

Le NPI a été classé en cinq groupes comme indiqué dans le tableau 6.

Tableau 6. Classification NPI (Obeidat et al. 2012).

Valeurs (NPI)	Classification
<0	Eau claire
0 – 1	Faible pollution
1 – 2	Pollution modérée
2 – 3	Importante pollution
>3	Très importante pollution

2. Méthode de l'indice arithmétique pondéré de la qualité de l'eau

Cette méthode permet de classer les eaux selon leur degré de pureté en utilisant les paramètres de qualité les plus couramment mesurés (Brown et al. 1970). Etant donné que les deux secteurs d'activité principaux du secteur d'étude sont la potabilité et l'irrigation, l'approche est réalisée par l'utilisation de l'indice de qualité d'eau potable (DWQI) et de l'indice de qualité d'eau d'irrigation (IWQI) (Meireles 2010) :

2.1. Indice de qualité de l'eau potable (DWQI)

L'indice DWQI (*Drinking Water Quality Index*) est défini comme étant une méthode d'évaluation de la qualité de l'eau et de son aptitude à la consommation, en combinant son calcul aux valeurs des standards relatives à la potabilité (Sadat-noori et al. 2014 ; Subba rao et al. 2019 ; Karakus 2020 ; Yebdri 2023). Le calcul de DWQI est effectué sur cinq étapes, impliquant l'examen des paramètres physico-chimiques individuels (pH, EC, TDS, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ et NO₃⁻) :

- (1) Attribution du poids à chaque paramètre chimique (Tableau 7) ;
- (2) Evaluation du poids relatif à l'aide d'un indice arithmétique pondéré donné par l'expression :

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

Où, W_i est le poids relatif, w_i est le poids de chaque paramètre et n le nombre de paramètres (Tableau 7).

- (3) Calcul de l'échelle d'évaluation de la qualité de l'eau (Q_i) effectué par le rapport de l'ensemble des valeurs des concentrations et de celles des concentrations seuils spécifiques à la consommation fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2017) et le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA 2011) pour chacun des paramètres chimiques dans les eaux souterraines :

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

Q_i représente l'échelle d'évaluation de la qualité, C_i est la concentration de chaque paramètre chimique dans chaque échantillon d'eau (mg/L) et S_i représente les normes d'eau potable spécifiées par l'OMS (2017) et/ou JORA (2011), pour chaque paramètre chimique (mg/L) (Tableau 7).

- (4) Calcul des sous-indices de la qualité de l'eau pour chaque paramètre chimique

$$SI_i = W_i \times Q_i$$

Où SI_i représente la valeur de sous-indice du paramètre i , Q_i est l'échelle d'évaluation de la qualité basée sur la concentration du paramètre i , et W_i représente le poids relatif (Tableau 7).

(5) Estimation de l'indice de la qualité de l'eau potable donnée par la relation :

$$DWQI = \sum_{i=1}^n SI_i$$

Tableau 7. Poids et poids relatifs attribués pour DWQI basés sur les standards du JORA (2011) et de l'OMS (2017).

Paramètres	Normes	Poids (Weight)	Poids relatif (Relative weight)
pH	6,5-8,5	4	0,111111111
CE	1000	4	0,111111111
TDS	600-1000	4	0,111111111
Ca	75	2	0,055555556
Mg	50	2	0,055555556
Na	200	3	0,083333333
K	10	2	0,055555556
HCO ₃	250	3	0,083333333
Cl	200-300	3	0,083333333
SO ₄	400	4	0,111111111
NO ₃	50	5	0,138888889
		$\sum w_i = 36$	$\sum W_i = 1$

Les valeurs de DWQI calculées sont classées en cinq catégories (classe excellente, bonne, pauvre, très pauvre et inappropriée (Tableau 8).

Tableau 8. Classification de la qualité de l'eau basée sur les valeurs de DWQI (Asadi et al. 2019).

Classification de la qualité de l'eau potable		
DWQI	Classe	Type d'eau
< 5	I	Excellente
5-100	II	Bonne
100-200	III	Pauvre
200-300	IV	Très pauvre
> à 300	V	Impropre à la consommation

2.2. Indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI)

L'indice IWQI est un outil spécifique développé principalement par Meireles et son équipe (2010) pour l'évaluation de la qualité de l'eau à des fins agricoles.

La première étape de calcul consiste en une définition des valeurs de mesure de la qualité (qi) et des poids d'agrégation (wi) établis (Meireles et al. 2010). Les valeurs de qi ont été calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$q_i = q_{i\max} - \left[\frac{(x_{ij} - x_{i\inf}) \times q_{i\text{amp}}}{q_{\text{amp}}} \right]$$

Où, $q_{i\max}$ est la valeur maximale de q_i pour la classe, x_{ij} est la valeur observée pour le paramètre, $x_{i\inf}$ est la variable correspondante à la limite inférieure de la classe à laquelle appartient le paramètre, $q_{i\text{amp}}$ est l'amplitude de la classe et enfin x_{amp} est l'amplitude de classe à laquelle appartient le paramètre.

Cette dernière est basée sur les limites de tolérance indiquées dans le tableau 9 et les résultats des analyses chimiques de l'eau.

Tableau 9. Valeurs limitent des paramètres de la qualité (q_i) (Meireles et al. 2010).

q_i	CE	SAR	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
	μS/cm	(mmol/L) ^{1/2}		Meq /L	
85 - 100	200 ≤ CE < 750	2 ≤ SAR < 3	2 ≤ Na < 3	1 ≤ Cl < 4	1 ≤ HCO ₃ < 1,5
60 - 85	750 ≤ CE < 1500	3 ≤ SAR < 6	3 ≤ Na < 6	4 ≤ Cl < 7	1,5 ≤ HCO ₃ < 4,5
35 - 60	1500 ≤ CE < 3000	6 ≤ SAR < 12	6 ≤ Na < 9	7 ≤ Cl < 10	4,5 ≤ HCO ₃ < 8,5
0 - 35	EC < 200	SAR < 2	Na < 2	Cl < 1	HCO ₃ < 1
	EC ≥ 3000	SAR ≥ 12	Na ≥ 9	Cl ≥ 10	HCO ₃ ≥ 8,5

Les poids des paramètres utilisés dans le calcul de l'IWQI sont donnés dans le tableau 10.

Tableau 10. Poids des paramètres utilisés dans le calcul d'IWQI (Meireles et al. 2010).

Paramètres	Wi
Conductivité électrique (CE)	0,211
Sodium (Na ⁺)	0,204
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	0,202
Chlorure (Cl ⁻)	0,194
SAR	0,189
Total	1,000

L'indice de qualité de l'eau est calculé selon l'équation suivante :

$$IWQI = \sum_{i=1}^n q_i W_i$$

D'après Meireles et al (2010), la restriction d'utilisation de l'eau est classée de 0 à 100 selon la division présentée sur le tableau 11 suivant :

Tableau 11. Caractéristiques des indices de qualité des eaux d'irrigation (Meireles et al. 2010).

IWQI	Restriction d'utilisation de l'eau
$85 \leq 100$	Pas de restriction (N R)
$70 \leq 85$	Faible restriction (L R)
$55 \leq 70$	Restriction modérée (M R)
$40 \leq 55$	Restriction élevée (H R)
$0 \leq 40$	Restriction sévère (S R)

III. CARTOGRAPHIE : SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)

Dans un but de spatialisation des cartes thématiques des différents traitements précédemment cités d'une part, et de visualisation des caractéristiques géomorphologiques, géologiques et hydrogéologiques d'autre part, des cartes numériques seront établies sous système d'information géographique (SIG).

A. Description de l'outil

1. Définition du SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) représentent une avancée technologique majeure dans le domaine de la gestion et de l'analyse des données spatiales. Ces systèmes informatiques sophistiqués permettent l'acquisition, le traitement, l'analyse et la visualisation d'informations géoréférencées, offrant ainsi des perspectives novatrices dans de nombreux domaines nécessitant une compréhension approfondie des relations spatiales (Burrough et McDonnell 2015).

Cette approche multidimensionnelle permet une analyse intégrée et holistique des phénomènes spatiaux. Ceci réside dans sa capacité à superposer et à croiser différentes couches d'information spatiale. Cette fonctionnalité permet la production de cartes thématiques élaborées, de diagrammes analytiques et de corrélations précises (Burrough et McDonnell 2015).

Les deux principaux modes de représentation des données spatiales sous SIG sont le mode vectoriel et le mode raster. Chacun de ces modes présente des avantages spécifiques en fonction des types de données et des applications envisagées (Burrough et McDonnell 2015).

2. Présentation du logiciel utilisé (ArcGIS 10.8.2)

L'ArcGIS 10.8.2, développé par Esri, est une plateforme du Système d'Information Géographique (SIG) avancée offrant des outils puissants pour l'analyse et la visualisation de données géospatiales. Cette version se distingue par ses performances améliorées, ses capacités de modélisation 3D et son support étendu pour les données en temps réel, répondant aux besoins complexes des professionnels en géomatique (Esri 2021).

B. Traitement du Modèle Numérique de Terrain

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont des représentations mathématiques de la topographie de la surface terrestre. Ils fournissent une description quantitative de l'élévation du terrain sous forme de grille régulière ou de réseau de triangles irréguliers (TIN) (Wilson et Gallant 2000).

Ce MNT a été obtenu à partir de données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), offrant une résolution spatiale de 30 mètres, adaptée à l'échelle de notre zone d'étude (Fig. 9).

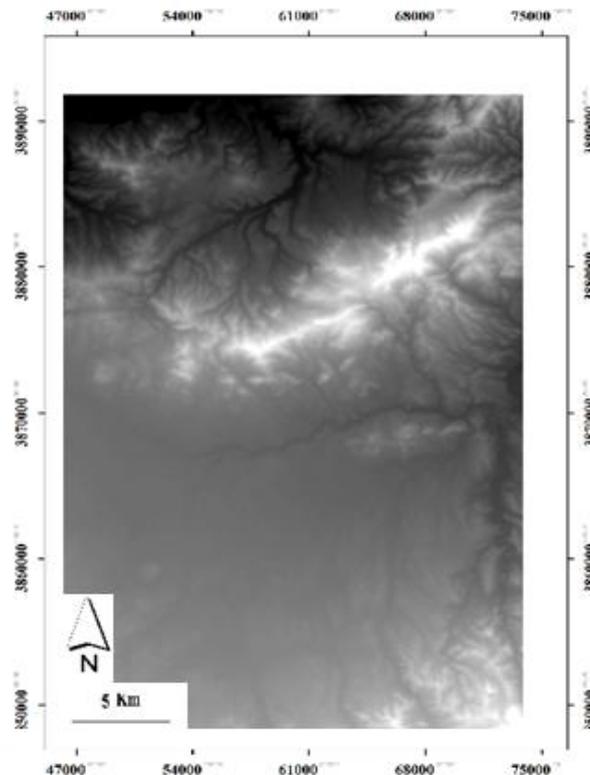


Figure 9. Modèle numérique de terrain appelé (MNT) du secteur d'étude.

La disponibilité du MNT sous forme matricielle ou vectorielle et le développement du SIG ont rendu possible l'automatisation des calculs et des mesures des paramètres morphométriques. L'extraction de ces paramètres réalisée par le logiciel ArcGIS 10.8.2 a permis la délimitation de la zone d'étude, la mesure de sa géométrie, la cartographie des altitudes et des pentes, ainsi que l'organisation du réseau hydrographique.

C. Traitement d'Imagerie satellitaire (Landsat)

Les images satellites Landsat OLI 8 (Operational Land Imager) sont des données de télédétection fournies par le huitième satellite de la série Landsat, lancé en 2013 (USGS 2021). Ce capteur offre des images multispectrales à moyenne résolution (30 mètres pour la plupart des bandes) couvrant de vastes étendues terrestres.

Landsat OLI 8 capture des données dans neuf bandes spectrales, allant du visible à l'infrarouge thermique, permettant ainsi une analyse détaillée de la surface terrestre (USGS 2021).

L'intégration de l'imagerie satellitaire du présent travail, a permis l'actualisation de la carte d'occupation des sols de la région de Maghnia. Cette carte permettra l'analyse de la distribution spatiale des différents types d'utilisation du territoire, indispensable pour la compréhension qualitative des eaux souterraines de la dite région.

L'image satellitaire du Nord-Ouest algérien générée à partir de la scène Landsat 8 – ETM+, fournie en période de stage (du 05 au 20 mai 2024) par le personnel du centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew, au niveau de la wilaya d'Oran (Fig.10).

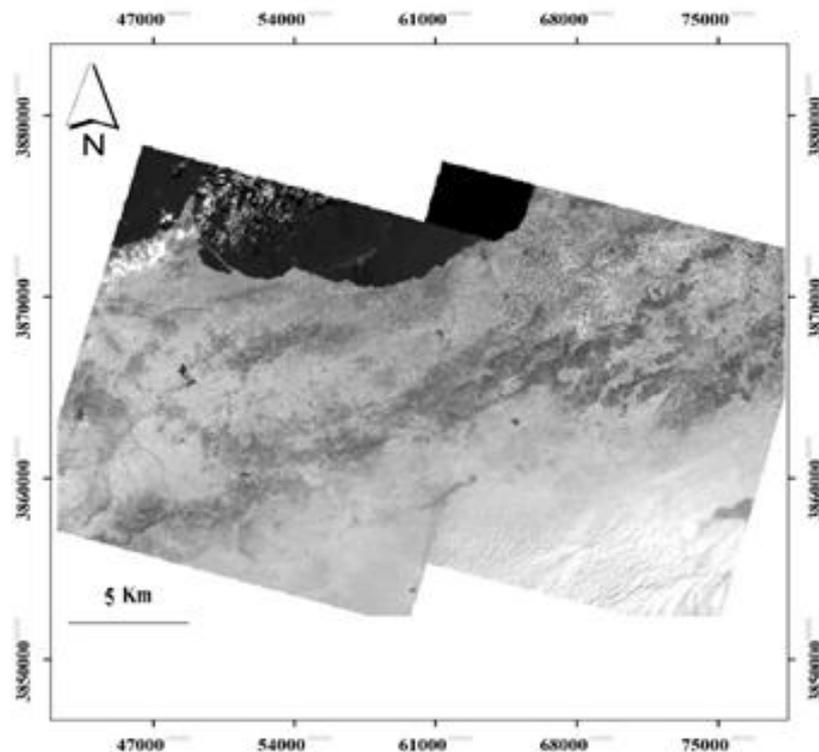


Figure 10. Image satellite Landsat 8.

D. Méthode d'interpolation spatiale

Les méthodes d'interpolation spatiale sont des techniques mathématiques utilisées sous SIG pour l'estimation des valeurs d'une variable en des points non échantillonnés à partir de données ponctuelles connues. Ces méthodes permettent de créer des surfaces continues à partir d'un ensemble de points discrets, facilitant ainsi la visualisation et l'analyse de phénomènes spatiaux (Burrough et McDonnell 2015).

Dans ce travail, la méthode d'interpolation adoptée pour la visualisation des variations spatiales des paramètres qualitatifs spécifiques des eaux souterraines du secteur considéré, en terme, de consommation humaine et d'irrigation, est celle de la pondération de

la distance inverse (**IDW** : *Inverse Distance Weighting*). Basée sur l'hypothèse que les points proches ont plus d'influence sur la valeur estimée que les points éloignés (Li et Heap 2014).

TROISIEME CHAPITRE
ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUES ET CLIMATIQUES

Troisième chapitre : Analyse géomorphologiques et climatiques

Ce présent chapitre est consacré à une caractérisation physiographique et climatique représentée par des facteurs internes : lithologique, morphométrique et occupation des sols et externes : températures et précipitations. L'acquisition et la compréhension des données sur ces facteurs sont essentielles et constituent un préalable à toutes les analyses de variabilité spatio-temporelle dans un but qualitative à impact environnemental.

I. DELIMITATION DE LA ZONE D'ETUDE

La délimitation de la zone d'étude a été effectuée à la suite de la sélection de la base de données de forages échantillonnés lors de la campagne environnementale de Mars 2024 (Fig. 11) ainsi que les limites des formations aquifères potentiels de la région, repérées sur la carte géologique réelle (Tlemcen NI-30-XV II : 1/200 000), géo-référencée sous ArcGIS.

La zone considérée couvre presque la totalité de la plaine de Maghnia ainsi qu'une partie de Beni-Boussaid localisée au Sud-Ouest (Fig. 11). Elle s'étend sur des longitudes comprises entre 1°40'0"W à 1°55'0"W, et des latitudes allant de 34°52'30"N à 35°0'0"N.

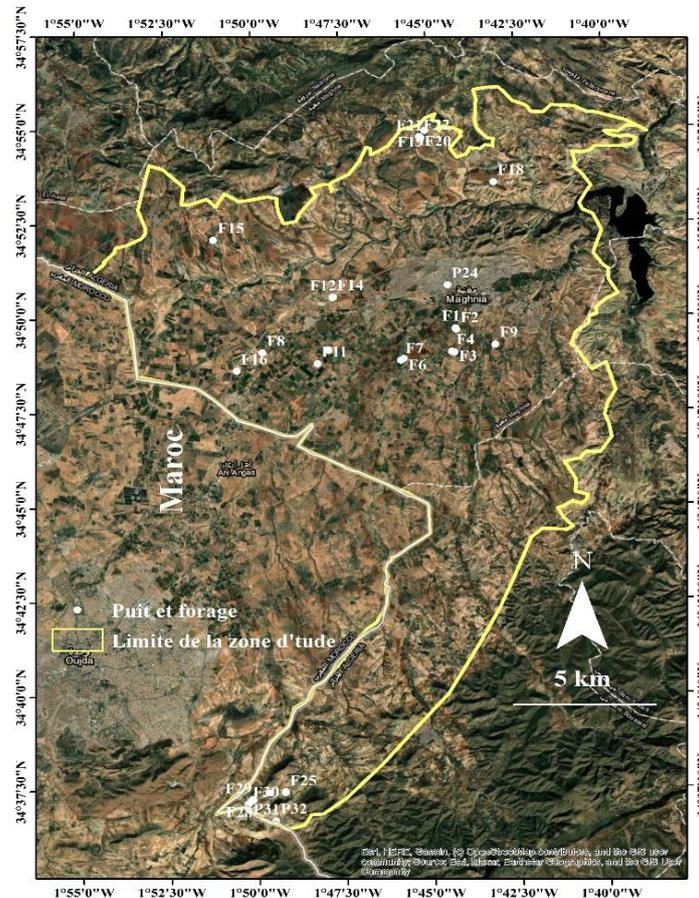


Figure 11. Délimitation de la zone d'étude.

II. CARTOGRAPHIE DES FACIES

Suite à la délimitation de la zone d'étude, un établissement de la carte des faciès a été réalisé (Fig. 12), ceci a permis une identification précise des unités lithostratigraphiques du secteur étudié.

Cette carte des faciès est représentée sur la figure 12, On y distingue ce qui suit :

- *Les formations quaternaires* : occupent une part importante de la superficie. Il s'agit des dépôts Holocène, constitués d'alluvions actuelles (Sables, graviers, limons et argiles) et des dépôts quaternaires anciens formé de croutes calcaires ;
- *Les formations néogènes* : le Mio-Pliocène localisé principalement au Nord composé d'argiles, conglomérats et calcaires lacustres, et le Miocène supérieur observé au Sud-Ouest de la zone, constitué de marnes bleus d'âge tortonien ;

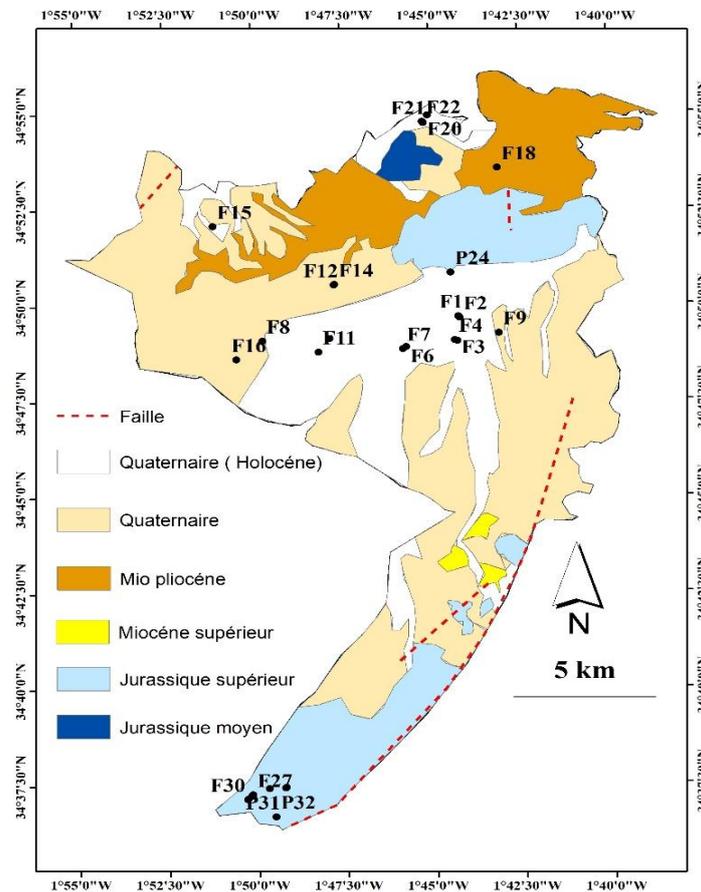


Figure 12. Carte des faciès du secteur d'étude.

- *Les formations jurassiques* sont visibles en affleurement dans les parties nord-est et sud de la zone d'étude, principalement du Jurassique moyen (Dogger) caractérisées par les formations calcaires à silex et dolomies et du Jurassique supérieur (Oxfordien) doté d'argilites, grès, calcaires et marnes ;

- La structure tectonique est illustrée sur la carte (Fig 12) par un réseau complexe de failles abondantes, en particulier dans la partie centrale et sud-est de la zone d'étude. Leur orientation principale est nord-est/sud-ouest.

III. ANALYSE MORPHOMETRIQUE

Trois aspects fondamentaux de l'analyse morphométrique de la zone étudiée, ont été accentués sur cette partie du chapitre. A savoir, les paramètres géométriques fondamentaux (Surface et périmètre), le relief par analyses altimétriques et des pentes et enfin le réseau hydrographique. Cette approche tridimensionnelle permet l'acquisition d'une vision exhaustive de la configuration physique de la région.

A. Carte altimétrique

La zone d'étude s'étend sur une aire drainée de 393,34 km² et d'un périmètre d'environ 146,4 km. La figure 13 montre une variation altimétrique comprise entre 237 et 961 m, avec une dominance des altitudes 400 à 500 m, étalée pratiquement sur toute la plaine de Maghnia.

Les altitudes les plus élevées sont observées à la limite sud-ouest correspondant à la région de Beni-Boussaid.

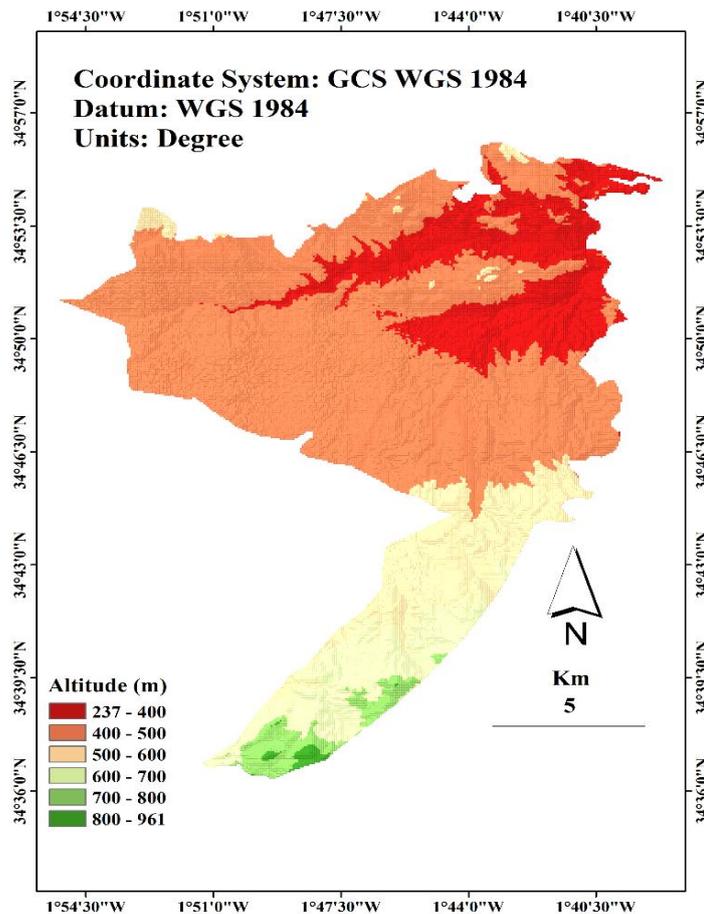


Figure 13. Carte altimétrique de la zone d'étude.

B. Carte des pentes

La carte des pentes représentée en figure 14 révèle une diversité topographique significative, reflétant les variations d'altitude et d'inclinaison du terrain. Classées en pourcentages, les pentes sont comprises entre 0 et 27%, témoignant ainsi de forte incision du relief.

Les faibles pentes (0 – 1,3%) occupent principalement les parties centrale et occidentale du secteur. Ces zones, correspondant aux altitudes de 237 à 500 m, présentent une topographie relativement plane, les rendant idéales pour l'agriculture et l'urbanisation ;

Tandis que, les pentes abruptes (5 - 27,2 %) sont localisées dans les extrémités nord et sud concordantes aux massifs montagneux de hautes altitudes, situées entre 800 et 961 m. Ces derniers se distinguent par des terrains très escarpés et souvent rocheux. Les activités humaines dans ces endroits sont restreintes.

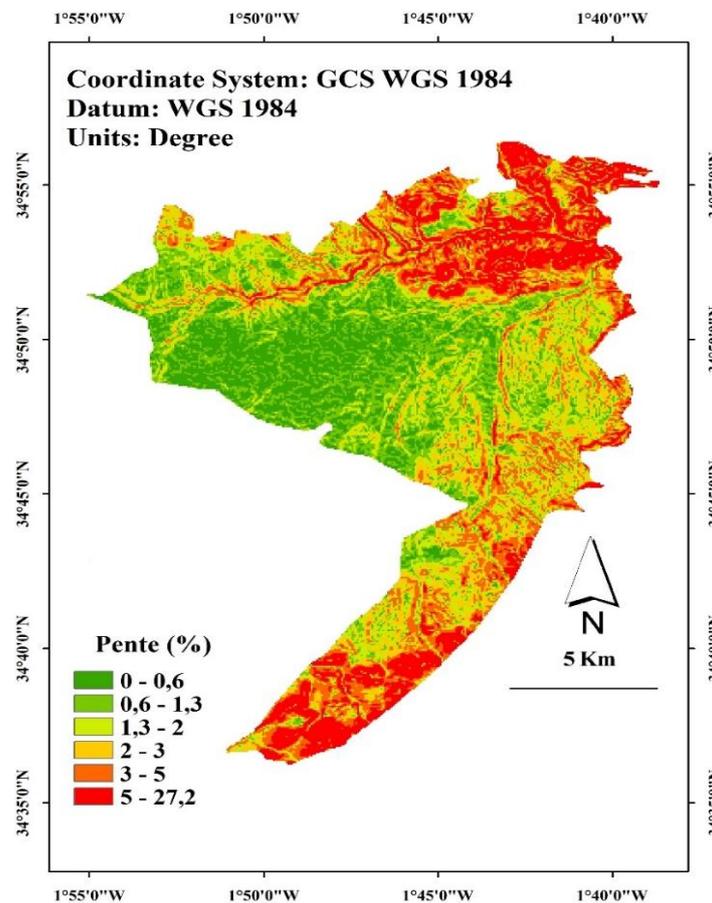


Figure 14. Carte des pentes de la zone d'étude.

C. Carte du réseau hydrographique

Une classification des talwegs dite aussi classification par ordre de STRAHLER a été réalisée pour la zone considérée, sous ArcGIS :

Le réseau hydrographique configuré (Fig.15) est caractérisé par une structure dendritique qui s'étend principalement du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Le système est hiérarchisé selon Strahler, allant des ruisseaux d'ordre 1 jusqu'aux cours d'eau principaux d'ordre 4.

La comparaison de la présente carte du réseau hydrographique avec les antériorités des travaux de recherche, assure que l'Oued Mouilah, représenté ici en ordre 4, est un affluent majeur de l'Oued Tafna (Fig. 15). Il joue un rôle clé dans le drainage et l'irrigation de la région dans sa partie nord. Il reçoit les eaux de l'Oued El Abbas et de l'Oued Ourdoufou, traversant des zones de moyenne altitude avant de rejoindre l'Oued Tafna.

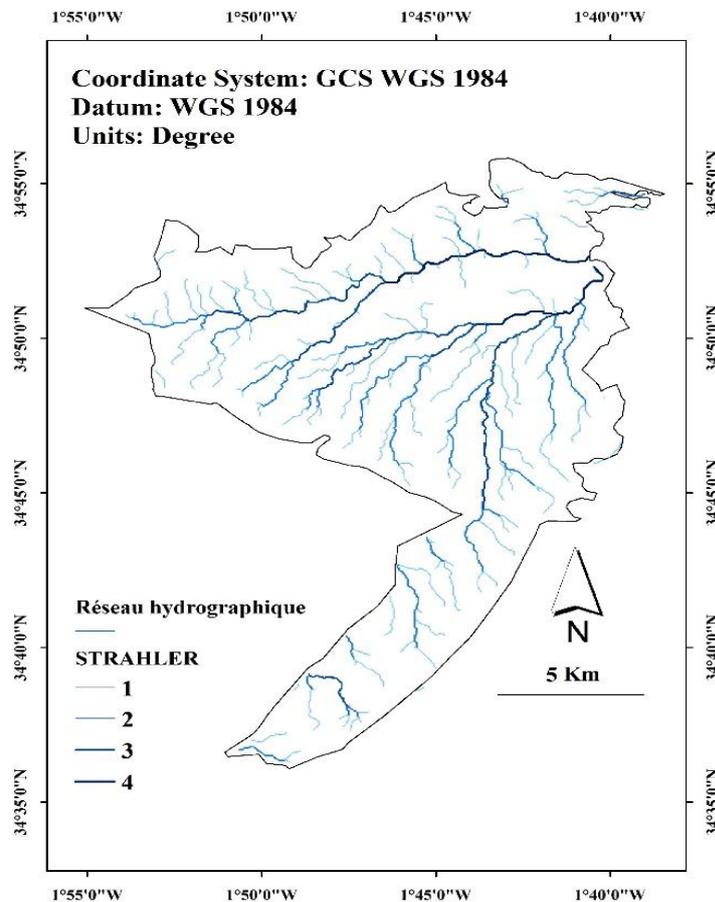


Figure 15. Carte du réseau hydrographique du secteur d'étude.

IV. CARTE D'OCCUPATION DES SOLS

La carte d'occupation du sol a été élaborée par l'utilisation de la méthode de segmentation de l'image satellite. Cette partie a été effectuée en collaboration avec le personnel qualifié du centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew (Oran) durant notre période de stage.

Notre zone d'étude offre un paysage varié qui témoigne de la diversité économique et environnementale de la région (Fig. 16).

L'agriculture domine la région, tirant parti des terres fertiles pour cultiver une variété de cultures :

- *Les espaces boisés* présentent des superficies très limitées par rapport à la délimitation globale ;
- *Les zones bâties* sont relativement étendues dans la région d'étude, indiquant les principaux centres de population et les infrastructures. Cette extension influence considérablement le développement économique et social de la région ;
- *Les zones de sol nu et d'eau*, bien que très peu étendues, peuvent représenter une préoccupation majeure des autorités de la région de Maghnia.

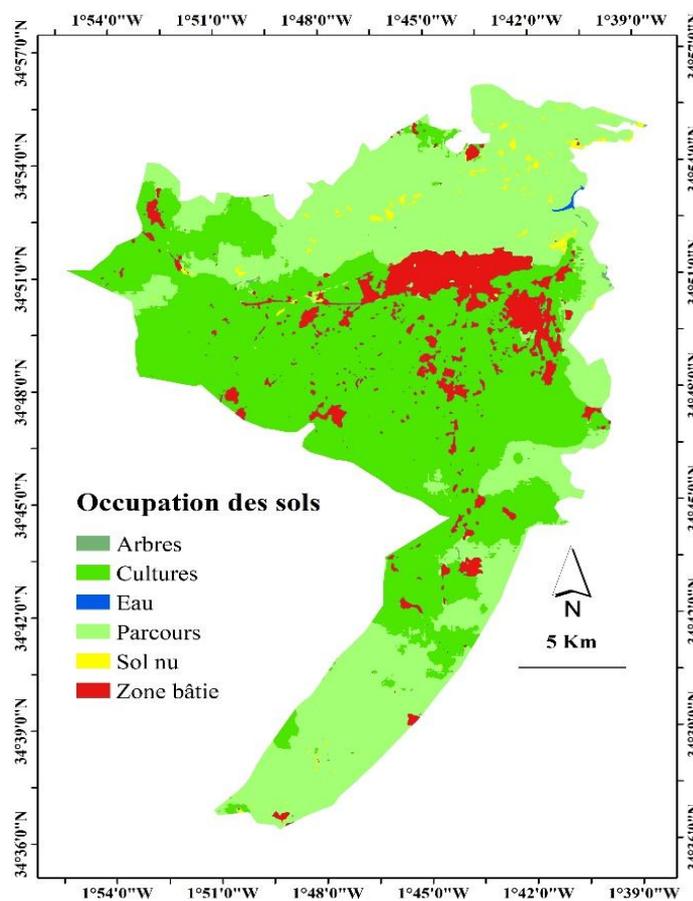


Figure 16. Occupation du sol de la zone d'étude.

V. CLIMAT DE LA ZONE D'ETUDE

Le climat global de la zone d'étude sera étudié brièvement par analyses des données de températures et de précipitations moyennes mensuelles, enregistrés à la station météorologique de Maghnia gérée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Ces données s'étalent sur une chronique de de 51 ans (1972/72-2022/23) pour les précipitations et d'une période de 45 ans (1976/77- 2022/23) pour les températures.

A. Variation pluviométrique

Les résultats des totaux pluviométriques à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle sur une période de 51ans (1972/73-2022/23) au niveau de la station météorologique de Maghnia sont résumés comme suit :

1. Variations des totaux pluviométriques annuels

Sur une période de 51 ans (1972/73-2022/23) la valeur moyenne interannuelle est de 298,6 mm (Fig. 17). Les valeurs minimales des modules pluviométriques observés est de l'ordre de 144,9 mm (1982/1983), alors que le maximal observé est de l'ordre de 528,4 mm, enregistré en l'année 1973/74. Le coefficient d'irrégularité est supérieur à 3 confirmant l'irrégularité de la série des données.

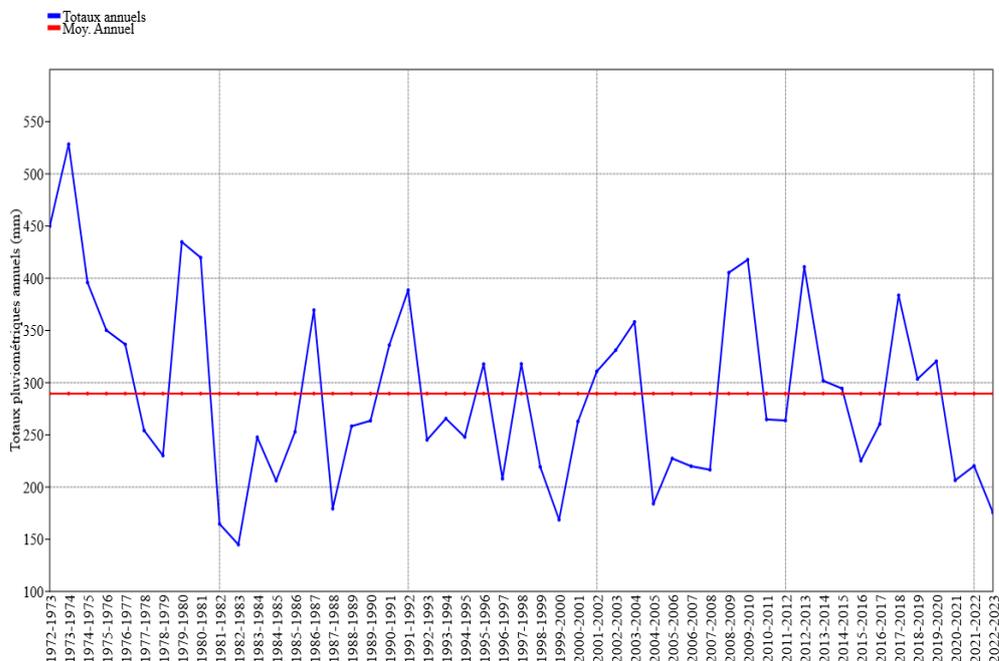


Figure 17. Variations des totaux pluviométriques annuels enregistrées à la station de Maghnia (1972/73-2022/23).

2. Variations des moyennes pluviométriques saisonnières

Les variations des moyennes pluviométriques saisonnières de la station de Maghnia durant la période d'étude 1972/73-2022/23 sont consignées dans le tableau 12 :

Tableau 12. Moyennes pluviométriques saisonnières. Station de Maghnia (1972/73-2022/23).

Saisonnier	Automne	Hiver	Printemps	Été
P (mm)	77	101,6	100	11
%	26,6	35,1	34,5	3,8

La distribution moyenne pluviométrique saisonnière montre que l'hiver est la saison la plus humide (101,6 mm) et l'été la plus sèche (11 mm).

3. Variations des moyennes pluviométriques mensuelles

Le tableau 13 regroupe les données des précipitations moyennes mensuelles durant la période 1972/73-2022/23.

On note une augmentation des pluies moyennes mensuelles des mois de novembre et d'avril. Entre ces deux mois une quasi-stabilité est observé, suivi par une diminution successive du mois de mai jusqu'au mois d'août.

Tableau 13. Précipitations moyennes mensuelles. Station de Maghnia (1972/73-2022/23).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jun	Jui	Août
P_{moy} (mm)	15,0	24,0	37,9	32,9	33,0	35,7	37,8	37,2	25,0	5,8	2,0	3,2
P_{max} (mm)	78,48	129,5	167,9	138,2	110	126,8	149,3	188,4	106,4	59,7	20,3	27
P_{min} (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

B. Variation thermique

Les variations des températures mensuelles moyennes, minimales et maximales (Tableau 14 et Fig. 18) montrent que le mois le plus froid est celui de Janvier avec un minimale des moyenne enregistré égale à 5,3 °C et que le mois le plus chaud est celui d'Août, avec une température maximale de 33,9 °C. La température moyenne annuelle est de 17,9 °C. Quant aux températures extrêmes, elles sont de 17,6 °C (Janvier) et de 33,9 °C (Août).

Tableau 14. Répartition thermométrique moyenne mensuelle minimale, maximale et moyenne de la station de Maghnia (1976/77- 2022/23).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
T_{min} (°C)	17,6	13,9	9,6	6,9	5,3	6,5	8,1	10,1	13,0	17,1	20,1	20,7
T_{max} (°C)	30,1	25,9	20,6	17,6	16,4	17,5	19,7	22,1	25,3	29,5	33,4	33,9
T_{moy} (°C)	23,9	19,9	15,1	12,2	10,9	12,0	13,9	16,1	19,2	23,3	26,8	27,3

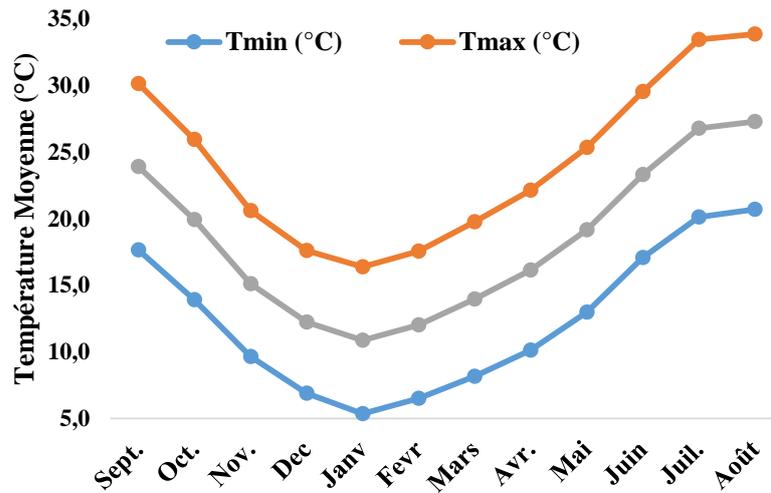


Figure 18. Variation des températures moyennes mensuelles enregistrées à la station de Maghnia (1976/77-2022/23).

C. Régime climatique

Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé les données de précipitations et de températures d'une série qui s'étalent de 1976/77 à 2022/23 (Tableau. 15), les méthodes utilisées pour la détermination du régime climatique sont : la méthode graphique de Bagnouls et Gausson et indices bioclimatiques :

Tableau 15. Valeurs pluviométriques et thermométriques moyennes mensuelles de la station de Maghnia (1976/77- 2022/23).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Annuel
P(mm)	15,0	25,0	38,6	32,3	33,9	32,0	34,1	31,4	25,3	5,4	1,7	2,8	287,5
Tmoy (°C)	23,9	19,9	15,1	12,2	10,9	12,0	13,9	16,1	19,2	23,3	26,8	27,3	18,1

1. Méthode graphique de Bagnouls et Gausson

Selon la relation : $P \leq 2T$, les diagrammes pluviothermiques de Bagnouls et Gausson sont établis. On parle de période sèche lorsque les précipitations moyennes mensuelles sont inférieures ou égales au double de la température moyenne mensuelle.

Dans le cas de la saison sèche, la courbe des températures dépasse celle des précipitations, tandis que dans le cas de la saison humide, la courbe des précipitations dépasse celle des températures.

La figure 19 présente un état climatique qui se manifeste en deux périodes : Une période **humide** qui s'étend du début du mois de novembre à mi-avril et une autre **sèche** qui dure pendant le reste de l'année.

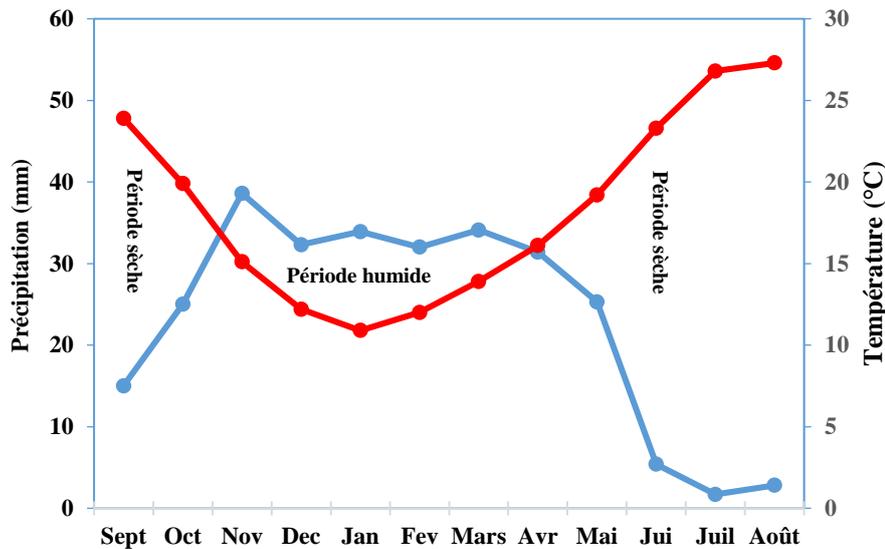


Figure 19. Diagramme pluviothermique de la station de Maghnia (1976/77-2022/23)

D. Indices climatiques

1. Indice d'aridité annuel de DE Martonne (I)

L'indice d'aridité annuel de DE Martonne est calculé comme suit :

$$I = \frac{P}{(10 + T)}$$

Avec, P : la moyenne pluviométrique annuelle et T : la température moyenne annuelles.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé cinq grands types de climats selon les valeurs de l'indice annuel.

Valeurs de I	I < 5	5 < I < 7,5	7,5 < I < 10	10 < I < 20	20 < I < 30
Zone climatique	Hyperaride	désertique	Steppique	Semi-aride	Tempéré

Le résultat de cet indice égale à **10,23** inclus dans la fourchette $0 \leq I < 20$, indique que la région de Maghnia est régie par un climat **semi-aride**.

Conformément au diagramme de la figure 20, cet indice correspond à *un climat semi-aride, et à un écoulement temporaire*.

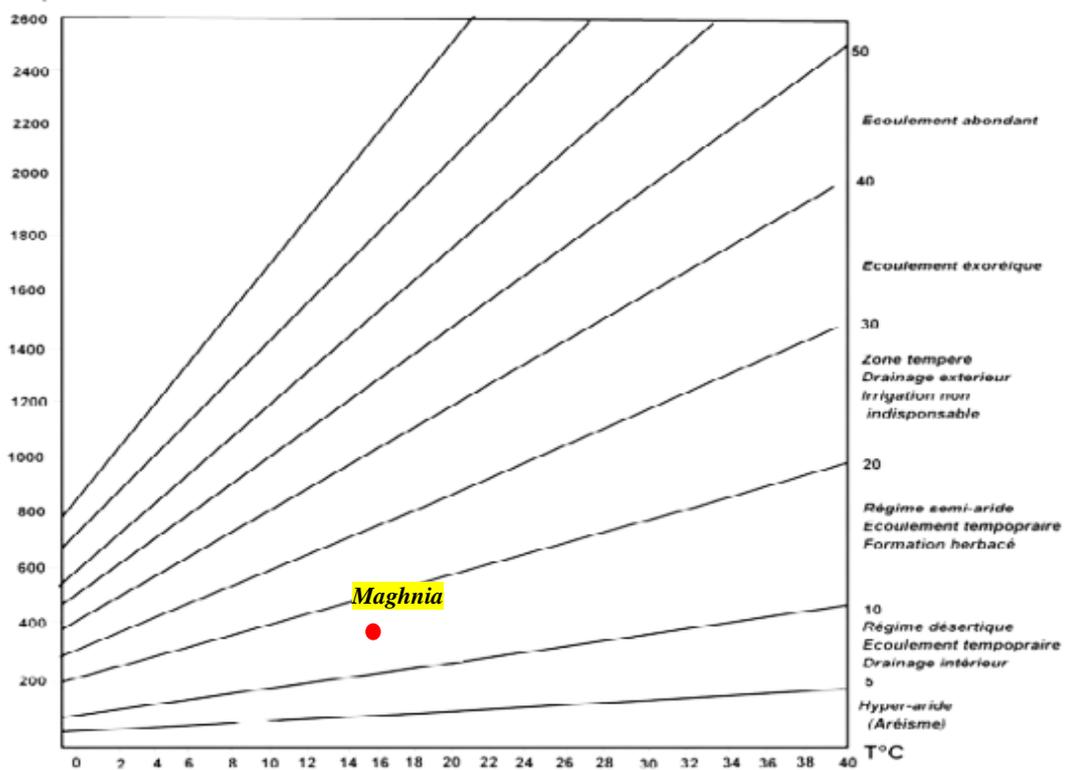


Figure. 20. Indice d'aridité annuelle de DE Martonne.

2. Indice d'aridité mensuelle de DE Martonne (i)

L'indice d'aridité mensuelle de DE Martonne est calculé comme suit :

$$i = \frac{12 p}{(10 + t)}$$

Avec, p : les précipitations moyennes mensuelles en (mm) et t : les températures moyennes mensuelles en (°C).

Le tableau 16 et la figure 21 résument les résultats de calcul des indices d'aridité mensuels, déterminés par rapport aux précipitations et températures moyennes mensuelles, enregistrées dans la station de Maghnia sur la période 1976/77- 2022/23.

La notion du mois sec est distinguée du mois d'octobre au mois de mai. Les mois de la saison estivale sont classés Hyperarides et septembre est considéré comme **Désertique**.

Tableau 16. Valeurs des indices d'aridité de DE Martonne mensuels.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août
p(mm)	15,0	25,0	38,6	32,3	33,9	32,0	34,1	31,4	25,3	5,4	1,7	2,8
t (°C)	23,9	19,9	15,1	12,2	10,9	12,0	13,9	16,1	19,2	23,3	26,8	27,3
I	5,3	10,0	18,5	17,5	19,5	17,5	17,1	14,4	10,4	1,9	0,6	0,9
Climat	D	S	S	S	S	S	S	S	S	H	H	H

H : Hyperaride, D : Désertique, S : Semi-aride, T : Tempéré.

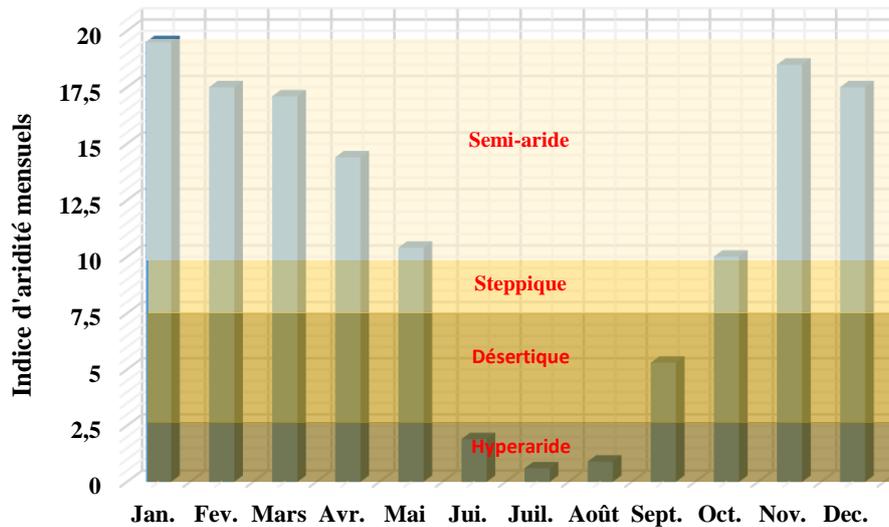


Figure 21. Degré d'aridité mensuel selon DE-MARTONNE.

VI. SYNTHÈSE

La zone d'étude délimitée couvrant la totalité de la plaine de Maghnia et une partie de la région de Béni-Boussaid. Elle s'étend sur une aire drainée de 393,34 km² et d'un périmètre d'environ 146,4 km. Avec une variation altimétrique comprise entre 237 et 961m et une inclinaison du terrain comprises entre 0 et 27%, témoignant ainsi de forte incision du relief. Son réseau hydrographique est caractérisé par une structure dendritique qui s'étend principalement du Sud-Est vers le Nord-Ouest.

Par rapport à l'occupation des sols, notre zone d'étude offre un paysage varié constitué de terrain agricole, d'espaces boisés, de terrains bâtis et des zones à sol nu et retenues d'eau.

Le climat de la région d'étude est de type semi-aride, manifesté par deux périodes, une **humide** qui s'étend du début du mois de novembre à mi-avril et une autre **sèche** qui dure pendant le reste de l'année.

QUATRIEME CHAPITRE
ANALYSE HYDROGEOCHIMIQUE ET
EVALUATION QUALITATIVE DES EAUX

Quatrième chapitre : Analyse hydrogéochimique et évaluation qualitative des eaux

Dans ce chapitre une caractérisation géochimique ainsi qu'une évaluation de la qualité des eaux souterraines dans la région de Maghnia seront déterminées. Les résultats des paramètres physiques et chimiques des eaux seront traités par diverses méthodes. D'abord dans un but de mettre en évidence des types d'interactions eau/roche ayant conduit à l'acquisition du chimisme de l'eau. Suivi par une estimation qualitative des eaux souterraines pour les usages de la potabilité et d'irrigation.

I. CARACTERISATIONS PHYSICOCHIMIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX

Le tableau 17 et la figure 22 A et B regroupent les valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines échantillonnées dans la zone d'étude.

Tableau 17. Valeurs minimales, maximales, et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TDS (mg/L)
Minimum	16,9	7,07	703	632
Maximum	29,1	8,41	5090	3909
Moyenne	21,7	7,70	1933,07	1372

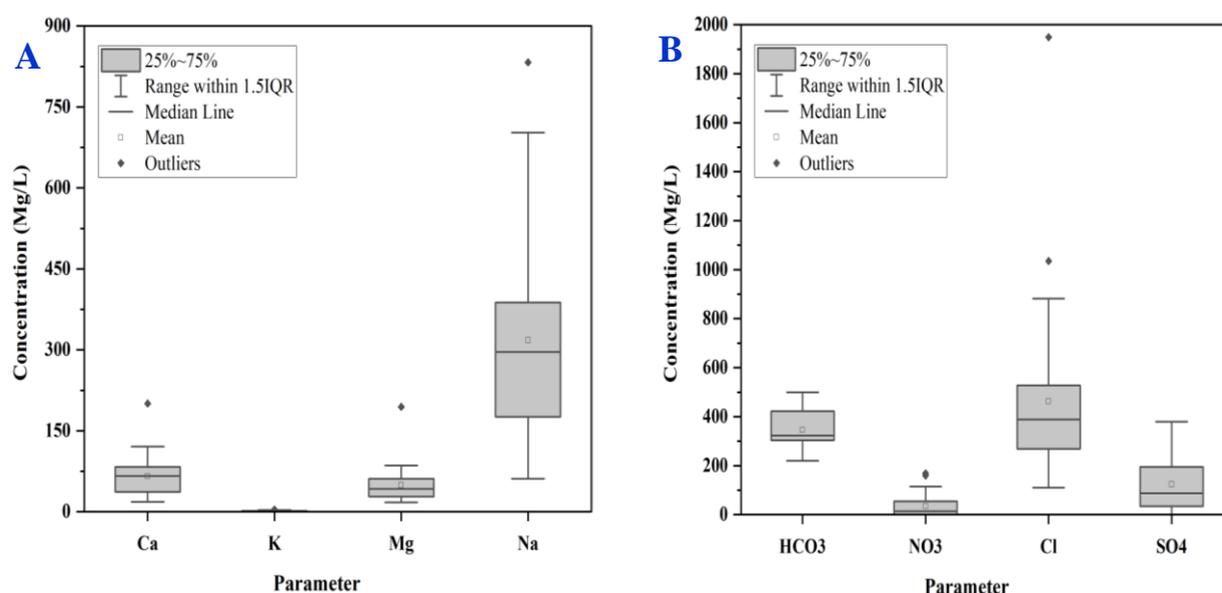


Figure 22. Analyse par boîte à moustache (A. Anions) (B. Cations).

- *La température* : présente une variation allant de 16,9 °C, enregistrée au F8, à 29,1 °C, observée au point F29, avec une température moyenne de 21,7°C ;

- *Le potentiel hydrogène* : compris entre 7,07 (F14), et 8,41 (F30), avec une valeur moyenne de 7,7. Ces eaux captées sont légèrement alcalines ;

- *La conductivité électrique* : Les eaux souterraines de la zone étudiée, présentent une grande variabilité. Les valeurs oscillent entre 703 µS/cm (F30), et 5090 µS/cm (F18), (moyenne : 1933,07 µS/cm). Ce large intervalle CE reflète des différences significatives dans la minéralisation des eaux souterraines à travers la région. La faible conductivité au forage F30, situé dans la partie de Beni-Boussaid, indique que l'eau est moins chargée en minéraux (TDS= 467 mg/L). À l'inverse, les valeurs élevées, particulièrement aux F6, F9, F15, F22, P31 et P32 dévoilent de fortes concentrations en ions dissous (TDS > 1,5 g/L), due probablement à la dissolution de minéraux dans le sous-sol ou à une potentielle contamination ;

- *Le sodium* : Les concentrations de sodium présente une variabilité considérable dans les eaux souterraines captées de la région de Maghnia. Elles sont comprises entre 61,50 mg/L (F29) et 832,40 mg/L (F18). La valeur moyenne est de 295 mg/L (Fig. 22 A) ;

- *Le calcium et le magnésium* : Ces Deux éléments majeurs contribuant à la dureté de l'eau, présentent des variations significatives dans les eaux souterraines de la région étudiée. Pour le calcium, les teneurs varient de 18,30 mg/L (F2) à 200,32 mg/L (F18), leur moyenne enregistrée est égale de 65 mg/L. De même, le magnésium présente également une large gamme de concentrations, s'étendant de 17,60 mg/L (F9) à 194,40 mg/L (F18), La moyenne des concentrations en Mg²⁺ est de 47 mg/L (Fig. 22 A) ;

- *Les chlorures* : Comme pour la plupart des concentrations traitées, les concentrations en chlorures des eaux souterraines de la région considérée présentent des variations considérables, les valeurs fluctuent entre minimale de 109,86 mg/L au forage F29 et un maximale de 1948 mg/L au forage F18 (Moyenne : 469,433 mg/L) (Fig. 22 B) ;

- *Les bicarbonates* : Dans les eaux des aquifères de la région, La valeur moyenne en ion bicarbonate est de 345 mg/L, sa minimale enregistrée aux forages F25 et F30 est de 220 mg/L, et son maximum atteint les 500 mg/L (F6) (Fig. 22 B) ;

- *Les sulfates* : Les teneurs en sulfates s'étendent de 0,43 mg/L (F9) à 379,10 mg/L (F30), avec une moyenne d'environ 114 mg/L (Fig. 22 B) ;

- *Les nitrates* : en ce qui concerne les nitrates des eaux souterraines échantillonnées, les concentrations s'échelonnent de 0,01 mg/L (F9), à 168,90 mg/L (P31), avec une moyenne de 32 mg/L.

II. MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES

A. Faciès hydrogéochimiques

Les résultats des analyses de 28 échantillons d'eaux souterraines de la plaine de Maghnia et ceux de Beni-Boussaid sont présentés successivement sur les diagrammes des figures 23, 24, 25 .

1. Diagramme de Piper

Le report des données chimiques des échantillons d'eau souterraine sur le diagramme de Piper (Fig. 23) montre que les faciès hydrochimiques dominants sont de type chloruré sodique, indiquant que les eaux sont alcalines à acides forts prédominants. A l'exception des points d'eau F27 qui de de type chloruré magnésien, F8 et F29 qui sont de type bicarbonaté magnésien et F11 de type bicarbonaté sodique (Fig. 23).

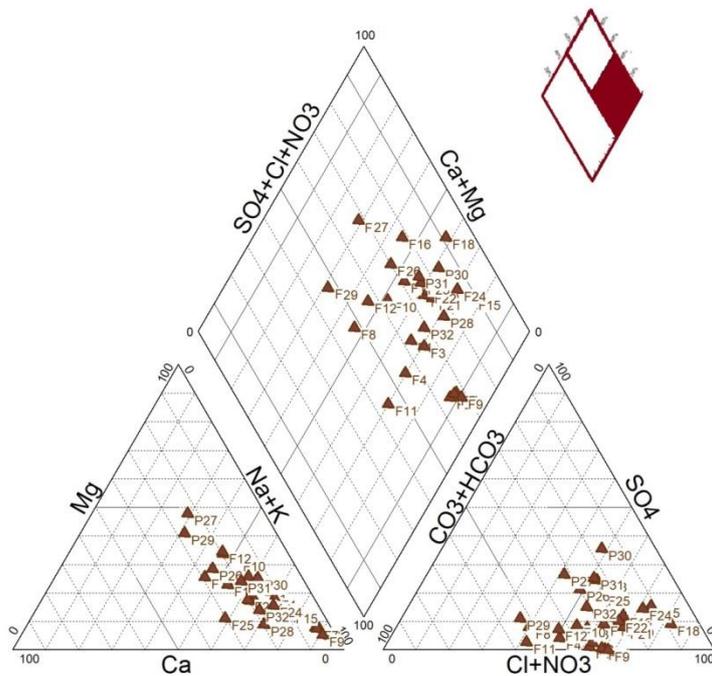


Figure 23. Diagramme de PIPER appliqué pour les eaux souterraines de la région de Maghnia.

2. Diagramme de Scholler-Berkaloff

La reconnaissance simplifiée des faciès des eaux souterraines, par lecture individuelle et directe des pics des concentrations sur les axes verticaux de la représentation graphique de Scholler-Berkaloff affichée sur la figure 24 confirme les différents types d'eau sur le diagramme de Piper.

On observe et on confirme, que les souterraines de vingt-deux (22) forages et des deux (2) puits (P31-P32) ont des faciès de type (Cl)-Na (Fig 24. A et B). En revanche, les

quatre (4) forages restants (Fig. 24 C) sont de types (Cl)-Mg pour F27 et (HCO₃)-Na pour F11 et (HCO₃)-Mg pour F8 et F11.

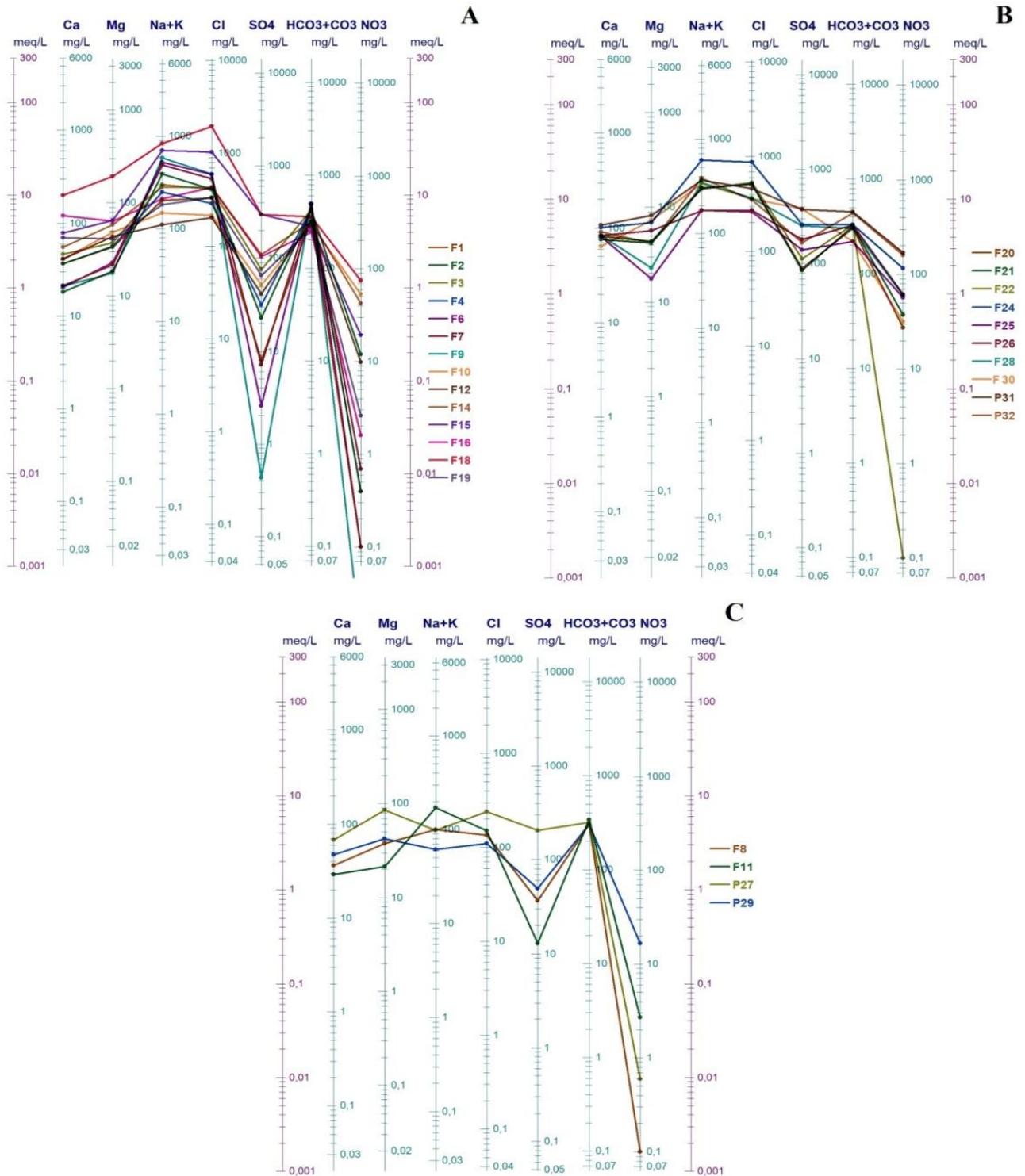


Figure 24. Diagramme de Scholler-Berkaloff.

3. Diagrammes de Durov

Le report des données chimiques sur le diagramme de Durov modifié (Fig. 25) indique une répartition des points en plusieurs groupes pour les eaux souterraines de la zone d'étude.

Conformément à la classification donnée par Lloyd et Heathcoat, 1985, Le report des données chimiques sur le diagramme de Durov (Fig. 25) indique la répartition des faciès des 28 points d'eau en quatre groupes (5, 6, 8 et 9):

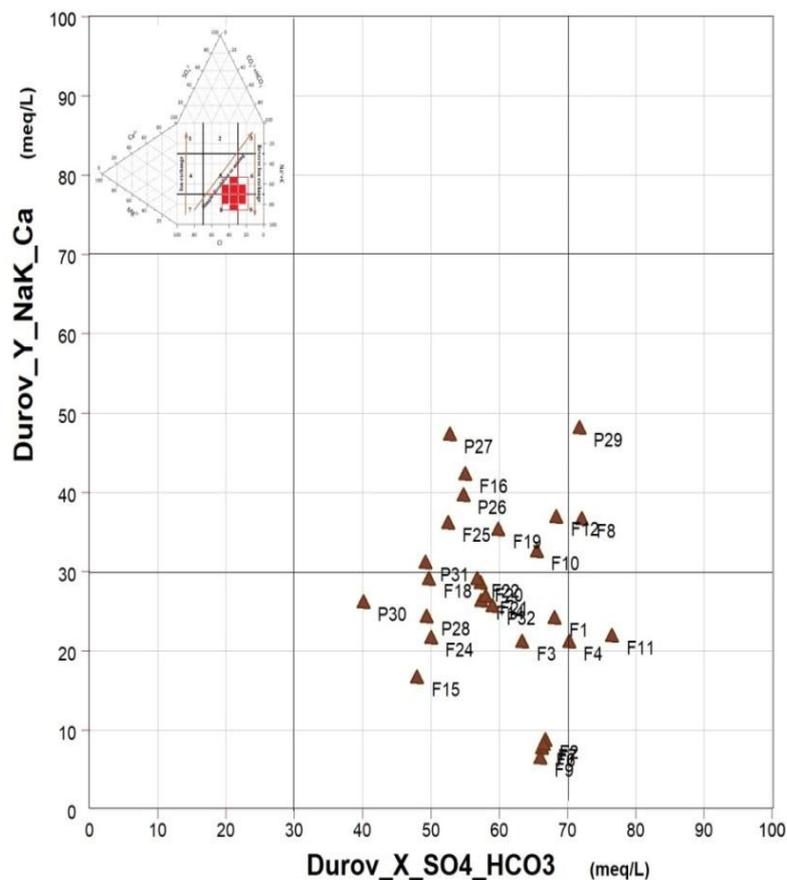


Figure 25. Diagramme de Durov.

61 % des points d'eau prélevés sont localisés dans le champ (8), impliquant que l'anion dominant est le Cl et le cation dominant est le Na, et indiquent que les eaux souterraines sont liées à l'échange d'ions inverse des eaux chlorurées sodiques. Ces forages sont localisés entre la partie centrale de la plaine de Maghnia et au Sud dans la zone de Beni-Boussaid.

Aussi, 29% des eaux souterraines de la région suscitée appartiennent au champ (5). Ces eaux sont considérées comme étant de type d'eau mitigée qui d'après cette même classification ne préconise aucune dominance anionique ou cationique. Notons que cette tendance peut être attribuée à la recharge récente d'eau douce dans les aquifères, présentant une dissolution ou un mélange simple de l'eau.

Les 10% des points d'eau restants sont répartis entre les champs 6 et 9, qui affichent un groupement des F8, F12 et F29 au champ (6). Leurs eaux sont classées à anion discriminant et Na dominant, indiquant un type d'eau qui n'est pas fréquemment rencontré et révèle des influences probables de mélange ou de dissolution rares (Lloyd et Heathcoat, 1985). Enfin, seul le forage F11, localisé dans le champ 9, est attribué à la dominance du Cl et du Na, au point le plus bas du gradient hydraulique par dissolution.

B. Interactions EAU/ROCHE

Un essai de compréhension des différents échanges entre les eaux souterraines et les formations géologiques traversées a été tenté par calcul de plusieurs indices géochimiques. A l'exemple de :

1. Indices de saturation

Les valeurs des indices de saturation (IS) par rapport aux minéraux carbonatés (calcite et dolomite) et évaporitiques (anhydrite, gypse et halite) sont présentées au tableau 18 et figure 26 :

En ce qui concerne les minéraux évaporitiques, les valeurs de IS déterminées pour la totalité des points d'eau montrent un état de sous-saturation ($IS < -0.05$) en anhydrite, gypse et halite. Elles suggèrent une tendance à la dissolution de ces minéraux, notamment pour l'halite.

Pour les minéraux carbonatés, les valeurs IS majoritairement positive indiquent un état de sursaturation surtout par rapport à la dolomite, à l'exception des eaux de F14 sous-saturées en calcite et en dolomite.

Tableau 18. Indice de saturation selon le logiciel Phreeq des eaux souterraines de la zone d'étude (SI < 0 ; SI > 0).

Points d'eau	Anhydrite	Gypse	Halite	Dolomite	Calcite	Points d'eau	Anhydrite	Gypse	Halite	Dolomite	Calcite
	F1	-3,3	-3,06	-5,77	0,65		0,2	F18	-1,44	-1,21	-4,48
F2	-3,17	-2,94	-5,40	1,29	0,48	F19	-2,15	-1,9	-5,81	0,48	0,23
F3	-2,29	-2,05	-5,51	0,68	0,24	F20	-2,01	-1,79	-5,44	0,68	0,3
F4	-2,72	-2,49	-5,74	0,39	0,07	F21	-2,06	-1,84	-5,43	0,59	0,24
F6	-4,12	-3,89	-5,13	0,71	0,17	F22	-1,92	-1,68	-5,42	0,45	0,22
F7	-3,64	-3,41	-5,20	0,91	0,3	P24	-1,6	-1,38	-4,94	1,8	0,8
F8	-2,6	-2,35	-6,45	0,59	0,16	F25	-1,75	-1,51	-5,93	0,61	0,49
F9	-4,89	-4,66	-5,09	1,08	0,41	F26	-1,7	-1,46	-5,93	1,33	0,6
F10	-2,45	-2,21	-6,09	0,51	0,07	F27	-1,74	-1,51	-6,24	1,58	0,58
F11	-3,11	-2,9	-6,19	1,05	0,4	F28	-1,57	-1,33	-5,51	1,01	0,64
F12	-2,52	-2,29	-6,24	0,52	0,09	F29	-2,36	-2,16	-6,77	1,52	0,58
F14	-2,09	-1,85	-5,53	-0,39	-0,35	F30	-1,57	-1,32	-5,53	1,8	0,6
F15	-1,66	-1,42	-4,79	0,22	0	P31	-1,41	-1,17	-5,40	1,63	0,59
F16	-1,8	-1,57	-5,65	0,41	0,2	P32	-1,73	-1,49	-5,49	1,62	0,7

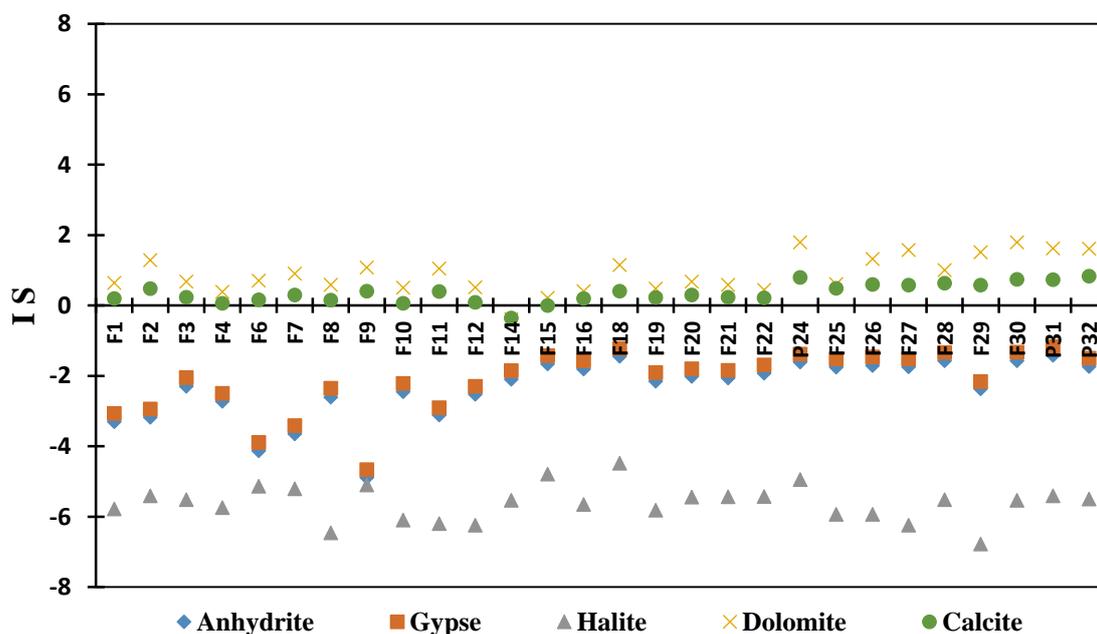


Figure 26. Evolution des indices de saturation des eaux dans le secteur d'étude.

2. Indices Chloro-alkalins

Après calcul des indices CAI-1 et CAI-2 (Fig. 27) des échantillons des eaux souterraines, les valeurs de CAI-1 obtenues sont comprises entre 2,44 (F11) et 54,32 (F18). Quant au CAI-2. Ces valeurs fluctuent entre 2,67 (P29) et 52,23 (F18). Toutes les valeurs des indices CAI-1 et CAI-2 sont positives pour l'ensemble des 28 points d'eau échantillonnés,

elles sont particulièrement élevées pour certains points comme F18, F15 et F24. Ces valeurs suggèrent un échange cationique inverse dans les eaux souterraines par fixation du sodium ou du potassium et solubilisation du calcium.

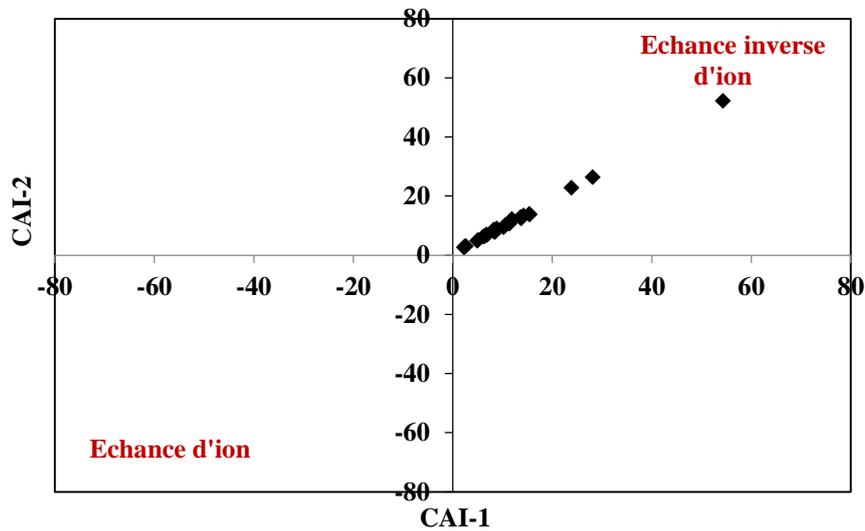


Figure 27. Corrélation entre : CAI-1 vs CAI-2.

3. Indices d'échange IEB et IGM

Selon les indices d'échange de base IEB et IGM (Fig. 28 A et B), 60.71% des points d'eaux souterraines échantillonnés sont de type $Na^+ - HCO_3^-$, avec une source d'eau météorique de surface peu profonde. Le reste des points d'eau soit 39,28 % sont de type $Na - SO_4$ et provient de la percolation d'eau météorique profonde (Fig. 28 B).

Par ailleurs, certains échantillons se distinguent par des valeurs d'IEB et IGM extrêmement élevées ($11,1 < IEB/IGM < 933,55$) (Fig. 27 A), suggérant des conditions hydrogéochimiques particulières liées probablement à une alimentation par lessivage des sols irrigués dans ces zones agricoles de la plaine.

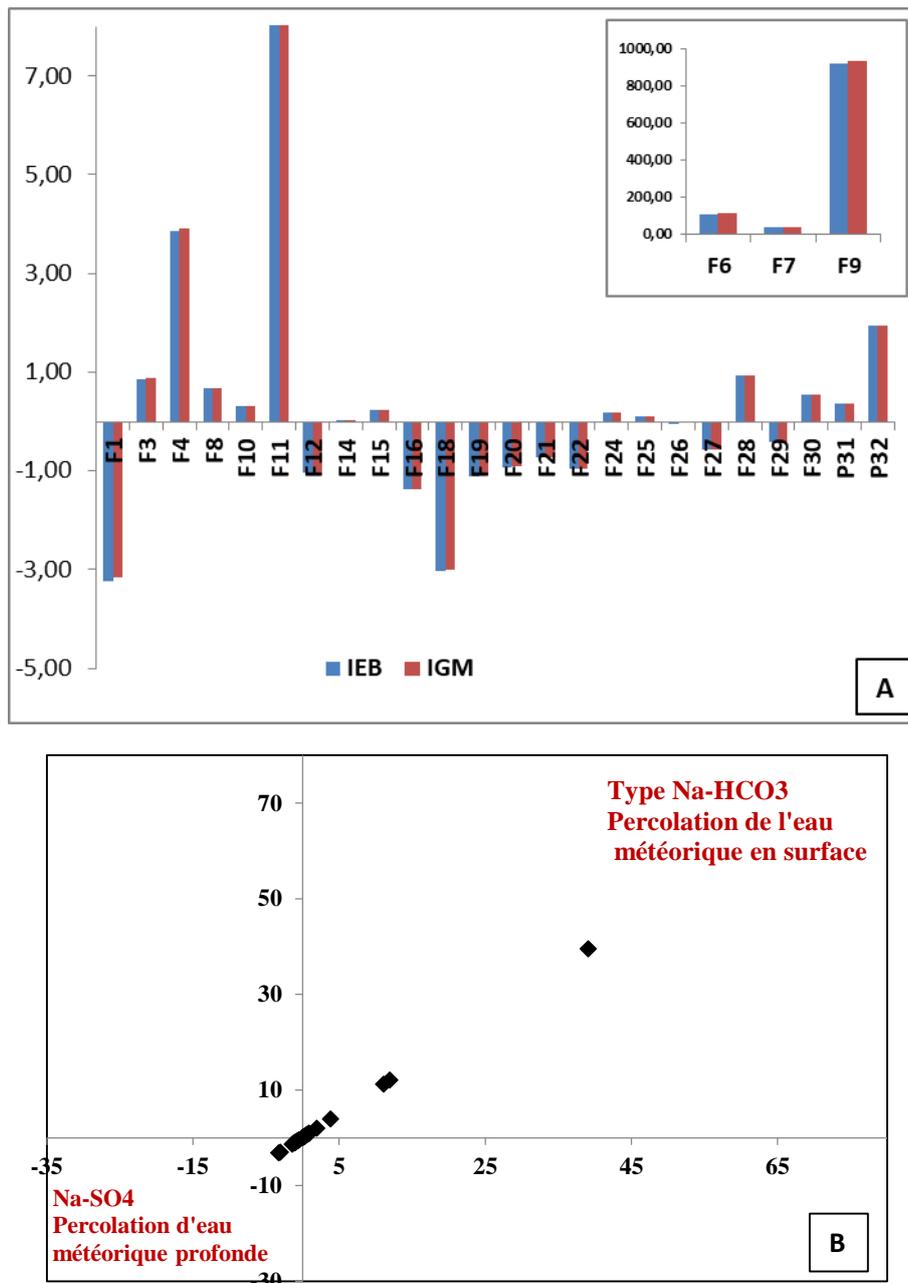


Figure 28. IEB vs IMG

III. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

L'évaluation qualitative des eaux souterraines du secteur délimité de la région de Maghnia, a été tentée pour les usages de potabilité et d'irrigation. En premier lieu, par comparaison des résultats obtenus avec les normes de potabilité publiées par le Journal Officiel de la République Algérienne (JORA 2011) et celles de l'organisation mondiale de la santé (OMS 2017). Ensuite par, l'utilisation des directives publiées par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture dite FAO (Ayers et Westcot 1985) et des indices d'irrigation, cités au chapitre 2 dédié à la méthodologie d'étude.

A. Pour la consommation humaine

Globalement, les eaux échantillonnées dans les aquifères de la région de Maghnia présentent des valeurs des paramètres analysés supérieures aux valeurs des seuils recommandés par le JORA (2011) et l'OMS (2017) (Tableau 19).

A l'exemple des valeurs de la conductivité électrique (703-5090 $\mu\text{S}/\text{cm}$), bien qu'inférieures majoritairement à la norme algérienne (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), elles dépassent celles de l'OMS (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dans presque tous les échantillons.

Les teneurs en nitrates dépassant la norme de 50 mg/L, exigée par le JORA et l'OMS, ont été observées dans certains échantillons. Elles concernent les points d'eau F10 (52,87 mg/L), F18 (73,98 mg/L), F20 (27,52 mg/L), F21 (37,40 mg/L), F24 (114,77 mg/L), F25 (56,85 mg/L), F26 (61,56 mg/L), F28 (60,70 mg/L), P31 (168,90 mg/L), et P32 (159,51 mg/L).

Selon les normes de l'OMS, les teneurs en Na^+ , Cl^- et HCO_3^- sont supérieures aux seuils fixés (Tableau 19) dans presque la totalité des points d'eau. De même, les concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} dépassent leurs limites respectives (75 et 50 mg/L par l'OMS) dans la moitié des forages prélevés (F14-F15-F16-F18- F20-F22-F24-F25-F26-F27-F28-P31-P32). Il convient de préciser que Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} , Cl^- et HCO_3^- , les seuils fixés sont relatifs aux goûts détectables dans l'eau et ne reposent sur aucun argument sanitaire (OMS 2017).

Ces différents résultats pourraient démontrer que les eaux souterraines de la région de Maghnia présentent une minéralisation élevée et des concentrations préoccupantes en nitrates dans plusieurs points d'échantillonnage, les rendant impropres à la consommation humaine.

Tableau 19. Classifications des eaux souterraines de la région de Maghnia selon les standards relatifs à la potabilité.

Paramètre	Unité	Standards Algériens (JORA 2011)	OMS (2017)	Qualité	Points d'eau concernés
T	°C	25	/	×	F11- F20- F29
pH	---	$\geq 6,5$ et ≤ 9	6,5–8,5	✓	---
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$	2800	1000	×	F9-F15-F18-F24>2800
TDS	mg/L	/	600-1000	×	Tous sauf : F1-F8-F10-F11-F12-F25-F29
Ca	mg/L	/	75	×	F15-F16-F18-F20-F22-F24-F25-F26-F28-P31-P32
Mg	mg/L	/	50	×	F14-F15-F16-F18-F24-F26-F27-P31-P32
Na	mg/L	/	200	×	Tous sauf :F8-F25-F26-F29
HCO_3	mg/L	/	250	×	Tous sauf :F16-F25-F29
Cl	mg/L	500	200-300	×	Tous sauf : F4-F8-F10-F11-F12-F25-F26-F27-F29
SO_4	mg/L	400	---	✓	----
NO_3	mg/L	50	50	×	F10-F18-F24-F25-F26-F28-P31-P32

✓ : conforme aux normes ; × : non conforme aux normes

B. A des fins agricoles

1. Classification des eaux d'irrigation selon la FAO

La classification de la qualité de l'eau destinée à l'utilisation agricole est effectuée, en fonction des différents groupes représentatifs des problèmes potentiels d'irrigation, à savoir : (a) risque de salinité, (b) problèmes d'infiltration et de perméabilité, (c) risques de toxicité et (d) problèmes divers (Tableau 3).

1.1. Risque de salinité

La salinisation du sol est un processus irréversible qui rend les terres agricoles inutilisables. La salinité est l'un des critères de qualité de l'eau très influent sur la productivité des cultures (Yebdri 2023).

La conductance est une fonction importante des solides ioniques dissous totaux. Une mesure de la conductivité électrique ou une analyse des solides dissous totaux (TDS) pourrait être utilisée pour évaluer la salinité de l'eau.

La figure 29, A et B montrant les répartitions ponctuelles et spatiales successives de la CE et de la TDS, des points d'eau échantillonnés au niveau des aquifères de la région, classent les eaux souterraines dans la catégorie « Qualité modérée » dans plus de 70% de la surface considérée, les 30% restant, localisée au Nord-Ouest se démarquent par une qualité mauvaise des eaux (CE > 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et TDS > 2000 mg/L).

1.2. Infiltration

Le problème de la perméabilité se produit lorsque des teneurs en ions sodique élevées diminuent le taux de percolation des eaux d'irrigation à travers les couches inférieures du sol.

A propos des éventuels problèmes d'infiltration du sol, et d'après la classification (Tableau 20) établie à partir des directives de la FAO, les valeurs de la conductivité relatives aux valeurs du SAR, pour les eaux échantillonnées, montrent que les eaux souterraines des aquifères de la région suscitée sont de qualité bonne à modérée.

Tableau 20. Classification des eaux selon le SAR et la conductivité (FAO).

Problème d'infiltration	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Points d'eau	Classification
SAR 0-3	>700	F8-F27-F29-F12	Néant
SAR 3-6	300-1200	F1-F11	Légère à modérée
	>1200	F10-F16-F19-F25-F26	Néant
SAR 6-12	500-1900	F3-F4-F14-F28-F30	Légère à modérée
	>1900	F18-F20-F21-F22-F24-P31-P32	Néant
SAR 12-20	1300-2900	F2-F6-F7	Légère à modérée
	>2900	F15	Néant
SAR 20-40	2900-5000	F9	Légère à modérée

1.3. Toxicité ionique spécifique

1.3.1. Par sodium

Le sodium a des effets néfastes spécifiques sur les propriétés physiques du sol et la survie des plantes. Les symptômes de toxicité typiques sur la plante sont la brûlure des feuilles et la mort des tissus le long des bords extérieurs des feuilles (Ayers et Westcot, 1985).

Son risque est exprimé par le SAR qui définit les proportions relatives de sodium par rapport aux ions calcium et magnésium dans un échantillon d'eau.

Il a été constaté que pour les eaux souterraines échantillonnées, les valeurs du SAR oscillent entre 1.5 et 22.5, classant en 3 catégories (Fig. 29 C) :

Eaux à toxicité sévère ($SAR > 9$) qui occupent toute la partie orientale du secteur, eaux à toxicité légère à modéré ($3 < SAR < 9$) se situent au centre et à l'Ouest de la région et eaux de bonne qualité par rapport au taux du sodium ($SAR < 3$), observées sur de petites zones orientées sud-ouest et nord-ouest.

1.3.2. Par chlorure

A de faibles concentrations les chlorures sont indispensables pour les cultures mais peuvent cependant, être toxiques pour les cultures sensibles à des teneurs plus élevées.

Les points d'eau échantillonnés dans la zone ouest de la plaine de Maghnia et sud-ouest (Beni-Bousaid) présentent une toxicité légère à modérée (140 - 350 mg/L) (Fig. 29 D). A l'encontre de cette zone, les points échantillonnés affichent des concentrations supérieures à 350 mg/L, qualifiant ainsi leurs eaux comme étant mauvaises pour l'irrigation. Ces valeurs excessives en Cl^- , entraînent des effets toxiques perçus par les brûlures de feuilles ou la mort de tissus foliaires.

1.4. Effets divers

1.4.1. Azote des nitrates (N-Nitrate)

Des quantités excessives de nitrates dans les sols et les eaux pourraient entraîner un retard de maturité de la récolte, une croissance intempestive ou de dépôts disgracieux sur le fruit ou le feuillage. Ces problèmes pourraient, à leur tour, entraîner une réduction du rendement ou de la qualité de la culture.

Les teneurs en nitrate montrent, principalement deux zones distinctes : La première située à l'Ouest et au centre de la région d'étude, caractérisée par des valeurs inférieures à 5 mg/L de $N-NO_3$, indiquant que les eaux souterraines dans cette dite-zone, sont à faibles risques de contamination liés à ce paramètre.

Cette toxicité devint légère à modérée (5-30 mg/L de $N-NO_3$) dans la seconde partie du secteur suscité, localisée au Nord-Est et Sud-Ouest (Fig. 29 E), à l'exception des deux

puits dans la région de Béni-Bousaid (P31 et P32), où la qualité est relativement sévère (Fig.29 E).

Cette distribution spatiale des nitrates pourrait être assimilée à l'utilisation de fertilisants et engrais très répandue dans les pratiques agricoles mais aussi à l'infiltration des eaux usées dans les proximités géographiques des habitations.

1.4.2. Bicarbonates

Des taux élevés de carbonates amènent les ions calcium et magnésium à former des minéraux insolubles favorisant la prédominance de l'ion sodium en solution (Simsek et Gunduz 2007 *in* Yebdri 2023). Ils sont indirectement responsables des dangers que provoquent des concentrations élevées en sodium sur les cultures irriguées et le sol. Ainsi, il est possible de rajouter que les eaux d'irrigation hautement alcalines pourraient intensifier les conditions du sol sodique.

Selon les directives de la FAO relatives à la qualité de l'eau à des fins d'irrigation, la totalité des valeurs des concentrations en HCO_3^- sont comprises entre 91,5 et 518,5 mg/L. Elles indiquent que les eaux souterraines de la plaine de Maghnia et de Beni-Boussaid sont de qualité modérée pour l'irrigation (Fig. 29 F).

1.4.3. pH

Les résultats obtenus lors des analyses in-situ durant la campagne de prélèvement de Mars 2024, montrent que toutes les valeurs de pH sont conformes aux normes (6,5 – 8,5) relatives à la qualité des eaux d'irrigation (Fig.28, G). Cette plage de pH est considérée comme normale pour l'irrigation et ne devrait pas poser de problèmes particuliers pour la plupart des cultures.

2. Indices d'irrigation

Sept indices ont été utilisés pour l'évaluation des eaux souterraines destinées à l'irrigation.

2.1. Dureté (TH)

La dureté résulte de la présence de cations tels que le calcium et le magnésium dans les eaux souterraines.

Notons que la totalité des valeurs calculées pour la dureté totale (TH) sont inférieures à 75 mg/L. Elles indiquent que les eaux souterraines des aquifères de Maghnia sont des eaux douces, excepté le forage F18 où l'eau est modérément dure ($75 < \text{TH} < 150$ mg/L de CaCO_3).

2.2. Pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%)

La spatialisation du pourcentage de sodium soluble (SSP ou Na%) (Fig. 30 B) montre que les eaux souterraines de la région d'étude appartiennent principalement aux classes admissible (40-60%) et médiocre (60-80%). Quelques forages au Sud la zone (F27-F28-F39F) ont des eaux bonnes à l'irrigation et d'autres au centre de la plaine de Maghnia (F2, F6, F7 et F9) inappropriées à l'utilisation agricole.

2.3. Risque du magnésium (M H)

Dans les eaux d'irrigation, les teneurs élevées en Mg affecteront défavorablement la qualité du sol et le transformeront en sol alcalin réduisant ainsi la production agricole (Ayers and Westcot 1985).

La majeure partie de la région d'étude présente des valeurs de MH inférieures à 50%, indiquant que l'eau convient généralement à l'irrigation selon ce critère (Fig. 30 C). Cependant, des zones distinctes aux extrémités nord et sud, affichent des valeurs de MH comprises entre 51 et 65, classant les eaux dans la catégorie moyenne en termes de risque lié au magnésium.

2.4. Indice de perméabilité (Permeability index)

Le sodium, le calcium, le magnésium et le bicarbonate influencent la perméabilité du sol en modifiant ses propriétés physiques et chimiques. Ces éléments chimiques ont été utilisés par Doneen (1964) pour le calcul d'un indice pour la classification des eaux d'irrigation, énoncé indice de perméabilité (PI).

D'après cette classification, les eaux souterraines de la région d'étude présentent des valeurs de PI comprises entre 44,41 et 101,17. Elles se rangent entre la classe de la qualité modérée ($25 < PI < 75$) au Sud, à l'Ouest et au Nord, et la classe la qualité adapté ($PI > 75$) pour l'utilisation agricole pour le reste de la région (Fig.30D).

2.5. Rapport de Kelly (Kelly's Ratio)

Ce rapport permet l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation en termes de concentration en Na^+ par rapport à Ca^{2+} et Mg^{2+} .

La figure 30 E montre une prédominance de valeurs de KR supérieures à 2 dans une grande étendue de la zone d'étude, notamment au centre et à l'Est, indiquant un déséquilibre prononcé entre le sodium et les cations calcium et magnésium. Ces eaux souterraines sont considérées comme inappropriées pour l'irrigation. La partie restante de la surface est couverte de valeurs de KR comprises entre 1 et 2, offrant une classification des eaux peu convenable à l'irrigation. Ces zones adaptées permettent une plus grande flexibilité dans le choix des cultures et des pratiques d'irrigation.

2.6. Carbonate de sodium résiduel (RSC)

Le carbonate sodium résiduel est principalement dû à une eau à forte concentration de bicarbonate où le calcium et le magnésium ont tendance à précipiter sous forme de carbonates.

La classification de la qualité de l'eau d'irrigation, en fonction des valeurs du RSC révèle une variation allant de -20 à 5. La qualité des eaux d'irrigation est alors répartie en trois (3) classes : bonne qualité aux extrémités sud, ouest et nord, inappropriée à l'Ouest, et médiocre pour le reste de la zone. (Fig. 30 F).

Cette augmentation du RSC indique un risque croissant d'accumulation de sodium dans le sol, ce qui pourrait affecter la structure du sol et la croissance des plantes à long terme (Ayers et Westcot 1985). Particulièrement alarmante a la large zone au centre-est classée comme inappropriée pour l'irrigation.

2.7 Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC)

Similaire à l'indice précédent, le RSBC calculé pour les eaux échantillonnées aux aquifères de la région d'étude montre une fluctuation des valeurs de -4,16 à 7,18. Ces valeurs classes les eaux en qualité satisfaisante à plus de 85 % de la surface traitée (Fig. 30 G). Seuls quelques points d'eau au centre de la plaine de Maghnia présentent une eau à qualité marginale pour l'irrigation (Fig. 30 G).

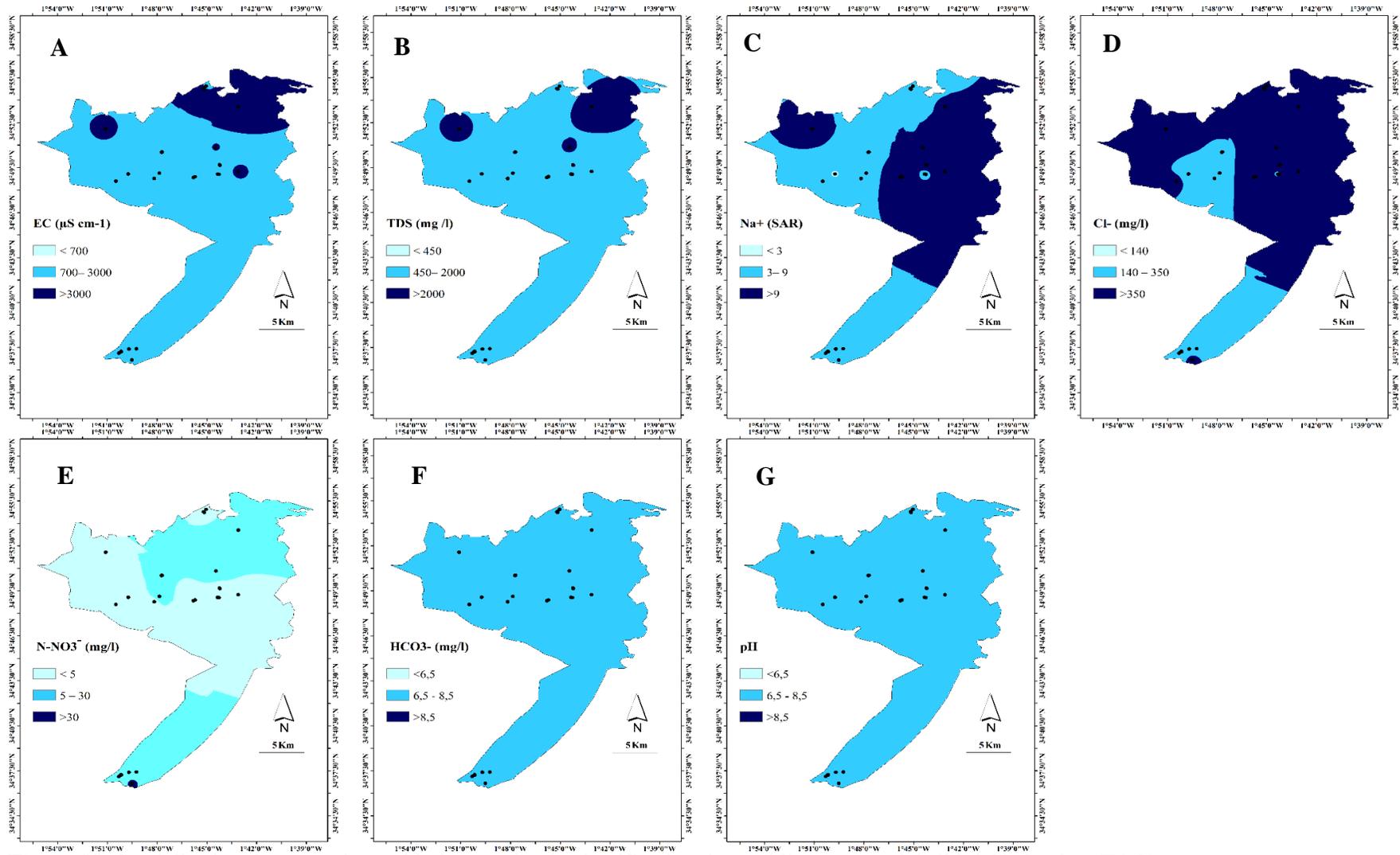


Figure 29. Spatialisation des paramètres chimiques selon la classification des problèmes potentiels liés à l'irrigation (FAO).

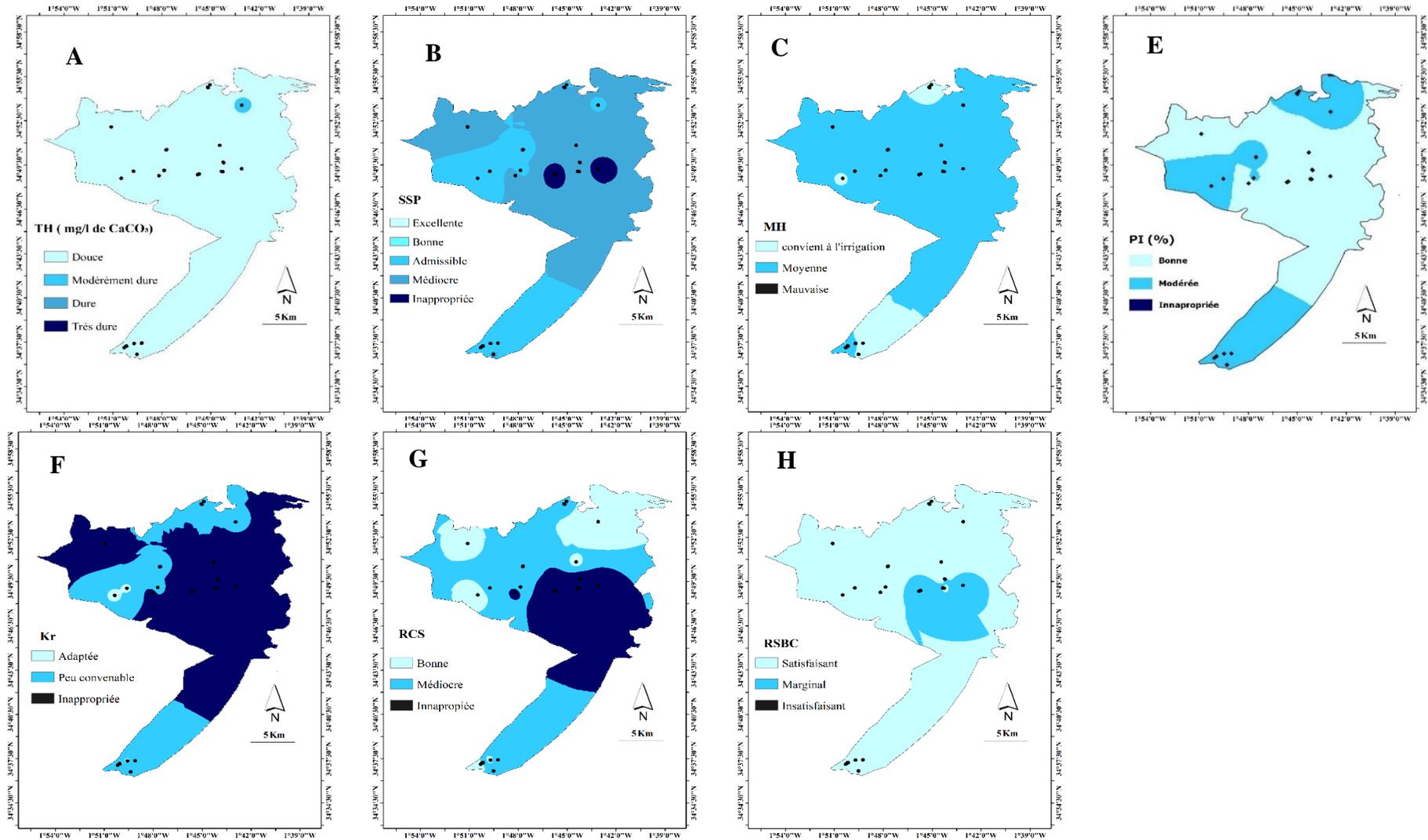


Figure 30. Variation spatiale des valeurs des indices d'irrigation

3. Diagrammes de classification des eaux d'irrigation

Dans le cadre de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Maghnia, nous avons utilisé deux outils graphiques largement reconnus : le diagramme de Wilcox et celui de Riverside (également connu sous le nom de diagramme USSL).

3.1. Diagramme de Wilcox

Le report des résultats de SSP (Na%) en fonction de CE sur le diagramme de Wilcox représenté sur la figure 31, indique que 62% des points échantillonnés dans les eaux de souterraines de la région de Maghnia, se positionnent dans les catégories bonne et admissible pour l'utilisation à des fins d'irrigation. En outre, 38 % des points d'eau, sont divisés entre la qualité médiocre (F2-F6-F7-F22-P31-P32) et mauvaise (F9-F15-F24-F18). F30 localisé à Beni-Boussaid fait exception avec la qualité excellente de ses eaux pour l'irrigation.

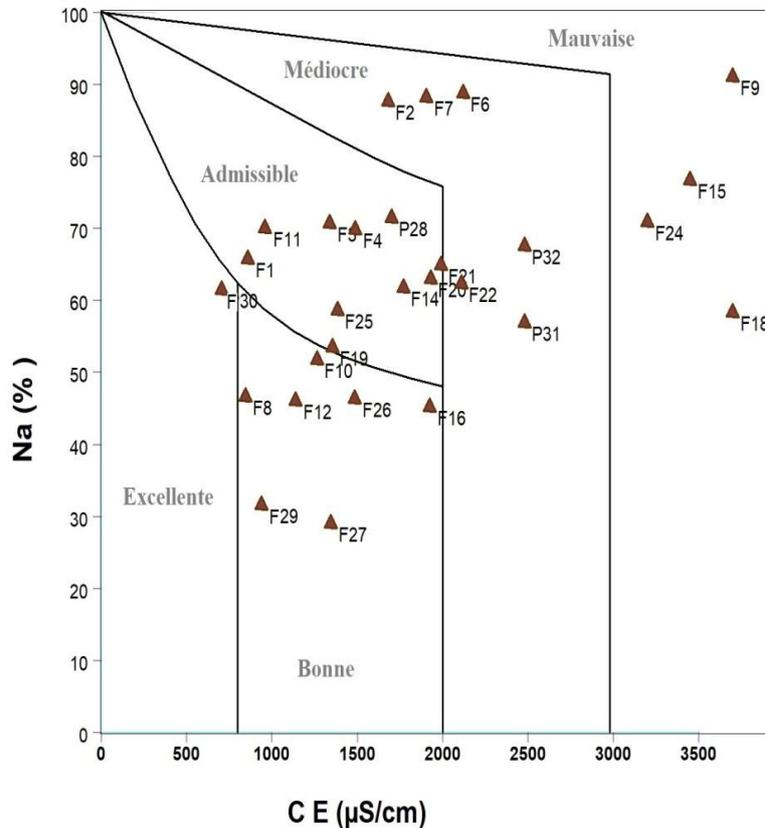


Figure 31. Diagramme de Wilcox.

3.2. Diagramme de Riverside (Richards)

Dans cette représentation graphique de Riverside, il apparaît que les échantillons d'eau prélevés dans les eaux souterraines de la région de Maghnia, appartiennent à plusieurs classes (Fig. 32).

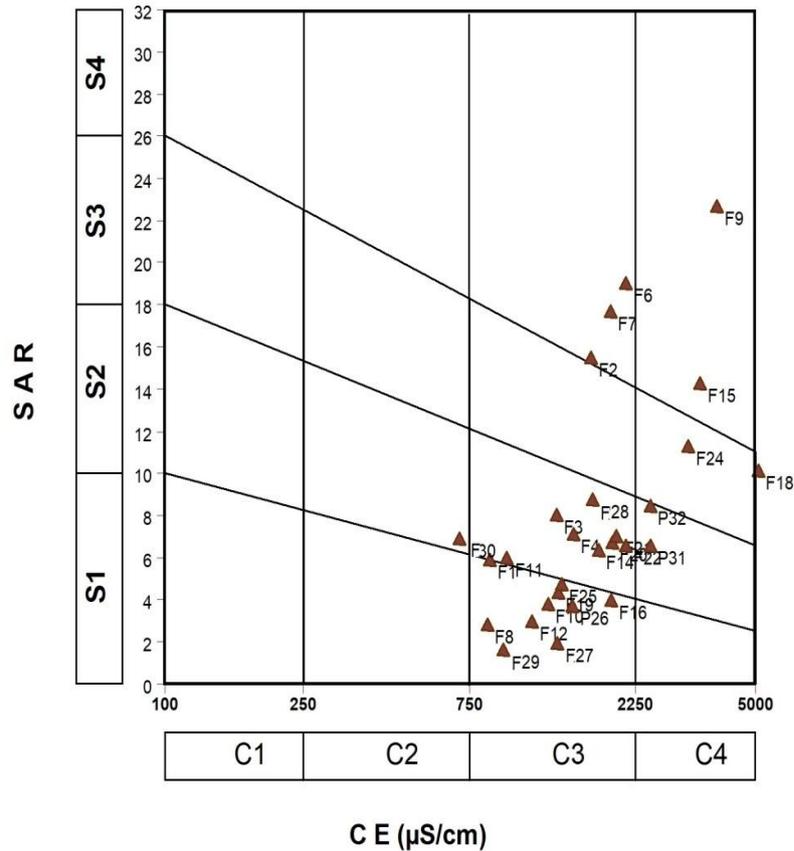


Figure 32. Diagramme de Riverside 1954.

D'abord, la classe C3S1 regroupant 32% des prélèvements des eaux souterraines, présentant des eaux à salinité élevée mais admissible pour l'irrigation. L'utilisation de ces eaux ne doit pas être sur des sols à drainage restreint, et aussi un choix spécifique des cultures à bonne tolérance aux sels doit être effectué.

De même, un groupe de prélèvement également de 32%, est pointé à la classe C3S2, indiquant une salinité très élevée des eaux souterraines et un risque de sodicité appréciable surtout dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange cationique, en particulier dans des conditions de faible lessivage. Ces eaux sont médiocre à mauvaise pour l'irrigation ;

18% des échantillons réparties entre les classes C3S4 et C4S3, signalent des eaux échantillonnées dans plusieurs forages de qualité très mauvaise à l'irrigation, à n'utiliser que dans des circonstances très particulières. Il s'agit des forages F2, F6, F7, F18 et F24.

Enfin le groupe renfermant les forages F9 et F15 classé en C4S4, contiennent des eaux à risque sodique très élevé, rendant ainsi l'eau inutilisable pour l'irrigation.

IV. DISCUSSION

Ce chapitre consacré à l'étude caractérisation géochimique et l'évaluation de la qualité des eaux souterraines dans la région de Maghnia, il en ressort ce qui suit :

La minéralisation des eaux souterraines du secteur suscitée est très variable, avec des valeurs de CE qui oscillent entre 703 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (F30), et 5090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (F18), et une moyenne de 1933,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Des teneurs en chlorure et sodium, très élevées surtout dans la partie Nord et Nord-Est de zone délimitée.

Les diagrammes de Piper, Berkaloff et Durov, indiquent une dominance des faciès hydrochimiques de type chloruré sodique, les eaux sont alcalines à acides forts prédominants, liées à un échange d'ions inverse. Ceci a été confirmé par les indices Chloro-alcalins qui affirment qu'un échange cationique inverse dans les eaux souterraines est effectué par fixation du sodium ou du potassium et solubilisation du calcium.

Les indices de saturation IS indiquent que les eaux souterraines de la région de Maghnia, sont en état de sous-saturation en minéraux évaporitiques, suggérant une tendance à la dissolution de ces minéraux, notamment pour l'halite. Cet enrichissement distingué en sodium, chlorures de l'eau souterraines, principalement, en zones nord de la région de Maghnia, est effectué probablement à son passage par les formations évaporitiques néogéniques abondants dans ces zones.

Pour les minéraux carbonatés, les valeurs IS majoritairement positive indiquent un état de sursaturation surtout par rapport à la dolomite, à l'exception des eaux de F14 sous-saturées en calcite et en dolomite.

En terme de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, les eaux souterraines dans les aquifères de la région de Maghnia, présentent une minéralisation élevée qui affectent considérablement leur goût, ainsi que des concentrations préoccupantes en nitrates supérieures à la norme de 50 mg/L fixée par le JORA et OMS, dans plusieurs points d'échantillonnage, qui les rendent impropres à la consommation humaine. Cependant, en ce qui concerne, la qualité des eaux à des fins d'irrigation, les classifications basées sur les standards de la FAO, indices d'irrigation et diagrammes, démontrent que globalement les eaux souterraines de la superficie d'étude sont de qualité modérée à mauvaise pour l'irrigation surtout dans la partie nord et nord-est, où les valeurs excessives en Na^+ et Cl^- , entraînent des effets néfastes spécifiques sur les propriétés physiques et chimiques des sols et la survie des plantes. Ces symptômes de toxicité typique sur les plantes par les brûlures de feuilles et la mort des tissus le long des bords extérieurs des feuilles, ont été perçus sur terrain durant la campagne environnementale effectuée.

De ce fait, l'irrigation doit être accompagnée d'un drainage adéquat, avec une gestion spécifique pour le contrôle de la salinité, ainsi qu'un choix sélectif de cultures tolérantes aux sels. Tout cela permettra un meilleur rendement agricole dans la région de Maghnia.

CINQUIEME CHAPITRE
APPLICATION DES MODELES SIMPLIFIES WQI

Cinquième chapitre : Application des modèles simplifiés WQI

Dans ce dernier chapitre, la problématique de la qualité des eaux souterraines de la région de Maghnia est accentuée, en ciblant deux secteurs d'utilisation, à savoir la potabilité et l'irrigation. Cette approche est réalisée par l'utilisation de modèle simplifié, constitué l'indice de pollution par nitrate (NPI), d'indice de qualité d'eau potable (DWQI), et d'indice de qualité d'eau d'irrigation (IWQI). Ces indices permettent de donner une idée sur la convenance des eaux à des fins spécifiques.

Une évaluation de ces indices couplée d'une cartographie d'occupation des eaux souterraines de la région suscitée sera conduite.

I. INDICE DE POLLUTION PAR NITRATE (NPI)

Le calcul de l'indice de pollution par nitrate (NPI) a révélé que cinq (5) classes sont identifiées : Eau claire, Faible pollution, pollution modérée, importante pollution et très importante pollution. Correspondantes aux valeurs successives de <0 , 0-1, 1-2, 2-3 et >3 .

Les sites de forages et puits se plaçant aux classes à importante et très importante pollution ont des taux de NO_3^- qui excèdent le seuil de potabilité, fixé par l'organisation mondiale de la santé (OMS). La distribution spatiale du NPI est présentée sur la figure 33 :

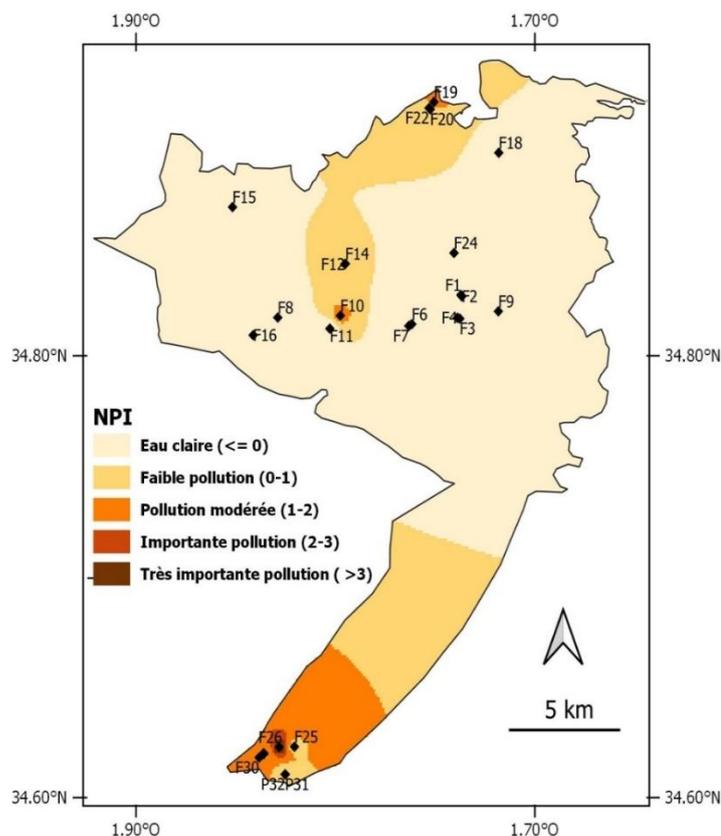


Figure 33. Variation spatiale de l'indice NPI dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.

Deux grandes zones de pollution qui évoluant de pollution modérée à pollution très importante, sont mises en évidence, au Nord-Est et au Sud-Ouest de la zone d'étude, où de potentielles sources de nitrates dans les eaux souterraines sont probables. Il s'agit des eaux usées domestiques non traitées de la ville de Maghnia et aussi les engrais agricoles.

II. INDICES DE QUALITE DES EAUX (WQI)

Les figures 34 et 35 représentent, respectivement, les variations spatiales des indices DWQI et IWQI, à travers les eaux souterraines de la région de Maghnia et de Béni-Boussaid durant la campagne d'échantillonnage.

A. Indice DWQI

Les valeurs de l'indice de qualité d'eau potable (DWQI) sont comprises entre 52,91 (F8) et 277,9 (F19) et appartiennent de ce fait, aux classes : II (Bonne 5-100) se trouvant principalement au centre et à l'ouest de la plaine de Maghnia ; III (Pauvre 100-200) répartie dans le reste du secteur délimité et la classe IV (très pauvre 200-300) au forage F19 localisé en extrême nord de la zone d'étude (Fig. 34).

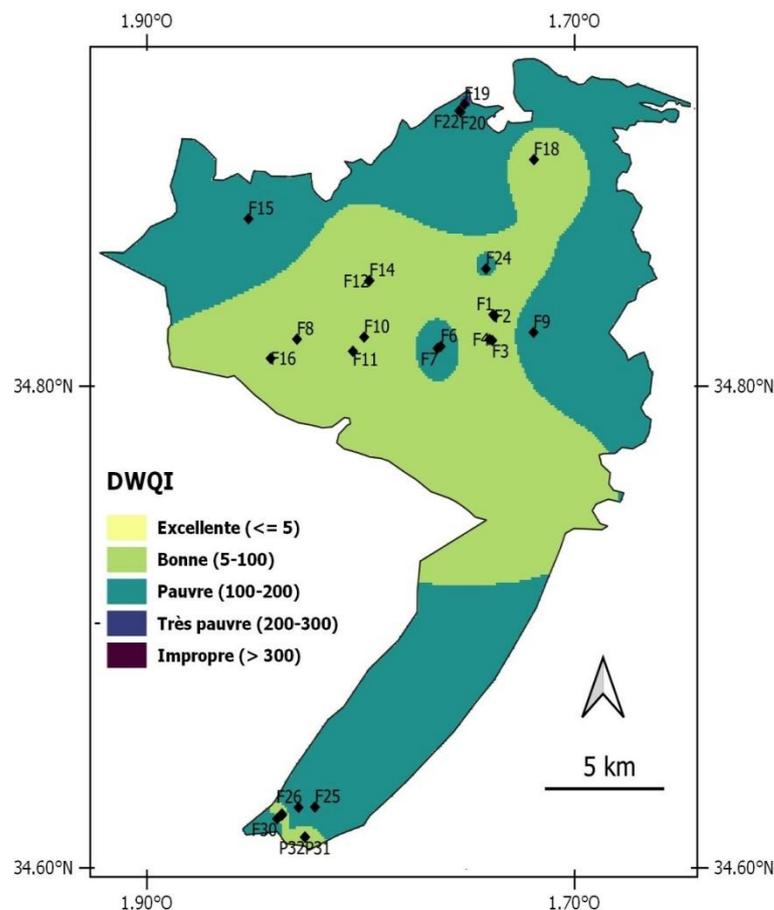


Figure 34. Variation spatiale de l'indice DWQI dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.

B. Indice IWQI

La spatialisation des données ponctuelles indiquées sur la figure 35 montre que les eaux souterraines de la région de Maghnia, appartiennent majoritairement aux classes de restriction d'utilisation des eaux pour l'irrigation élevée à sévère, par rapport à l'indice de Meireles.

Dans la partie nord et est de la zone d'étude où l'eau souterraine est à restriction sévère de par ses fortes teneurs en sels, son utilisation doit être évitée pour l'irrigation dans des cas normaux, les sols doivent avoir une perméabilité élevée et l'eau excédentaire doit être évacuée pour éviter l'accumulation de sel. Seules les plantes à forte tolérance au sel peuvent être implantées (Meireles 2010).

La tranche ouest et sud du secteur suscitée est pratiquement à restriction élevée concernant l'utilisation des eaux souterraines, ceci implique que l'irrigation peut être utilisée dans des sols à haute perméabilité sans couches compactes, ces eaux doivent être utilisées pour l'irrigation de plantes ayant une tolérance modérée à élevée aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité (Meireles 2010).

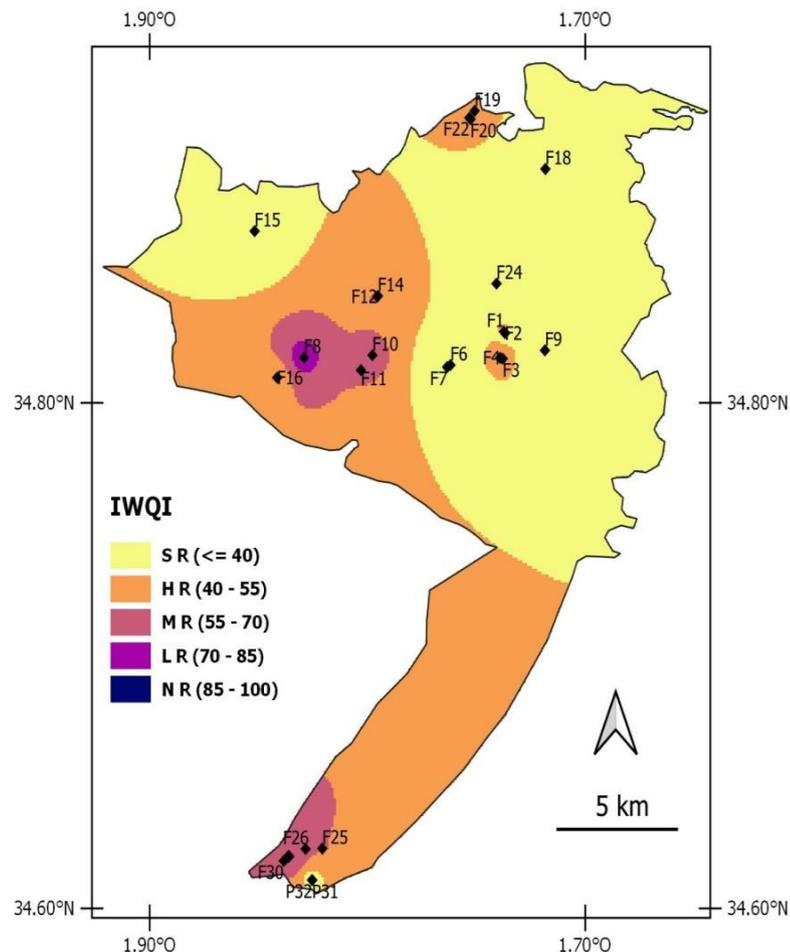


Figure 35. Variation spatiale de l'indice IWQI-MEIRELES dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.

Notant également la présence de petites zones classées en catégories : restriction modérée (MR) et faible (LR), principalement situées à l'ouest et en extrême sud-ouest de la région considérée, autour des forages F10, F11, F25, 26, F28 (pour MR) et les forages F8, F27 et F29 (pour LR). Ces eaux peuvent être utilisées dans les sols à perméabilité modérée ou élevée. Il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols à forte teneur en argile. Les plantes présentant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées (Meireles 2010).

III. DISCUSSION

La confrontation de la carte d'occupation des sols avec les différentes classifications d'indices NPI, DWQI et IWQI, représentée sur la figure 36, indique ce qui suit :

Malgré la confirmation de la probabilité de la contamination des eaux souterraines par les nitrates provenant soit des infiltrations des rejets d'eaux usées non traitées ou des fuites des systèmes d'assainissement à proximité des zones d'habitations de la région d'une part et des utilisations non contrôlées et excessives des engrais et fertilisants dans certaines parcelles agricoles d'autre part, cartographiée sur la figure 36 A. il s'avère que la pollution par les nitrates restent relativement faibles dans la majeure partie de la surface étudiée et n'impacte que peu sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Les projections des valeurs d'indices NPI et DWQI sur la carte d'occupation des sols de région de Maghnia présentent des similitudes de spatialisation, où les zones à qualité pauvre en termes de potabilité sont principalement celles à importante pollution par Nitrates (Fig. 36 A et B).

Cependant, il est important de sensibiliser la population consommatrice des eaux souterraines de la région, que l'ingestion excessive des nitrates à long terme, pourrait être à l'origine des cancers (gastrique et non gastrique) chez l'homme, des absorptions spontanées, des malformations congénitales, des infections des voies respiratoires et des modifications du système immunitaire (Hill 1996; Pannala et al. 2003; Fewtrell et al. 2004; Lohumi et al. 2004; Ward et al. 2005; Bryan et Loscalzo 2011; Rahman et al 2019 *in* Yebdri, 2023). De ce fait, l'évaluation des risques de ce contaminant est très importante pour prédire le danger sur la santé humaine.

Toutefois, la qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation de la dite-région devint inquiétante en raison de leurs classifications en restrictions élevée à sévère surtout en zones agricoles (Fig. 36 C). Ces eaux marquées par une accumulation de fortes teneurs en sels, réduisent leurs utilisations mais aussi le choix d'implantation et de culture, ceci affecte considérablement la productivité agricole importante pour l'économie régionale.

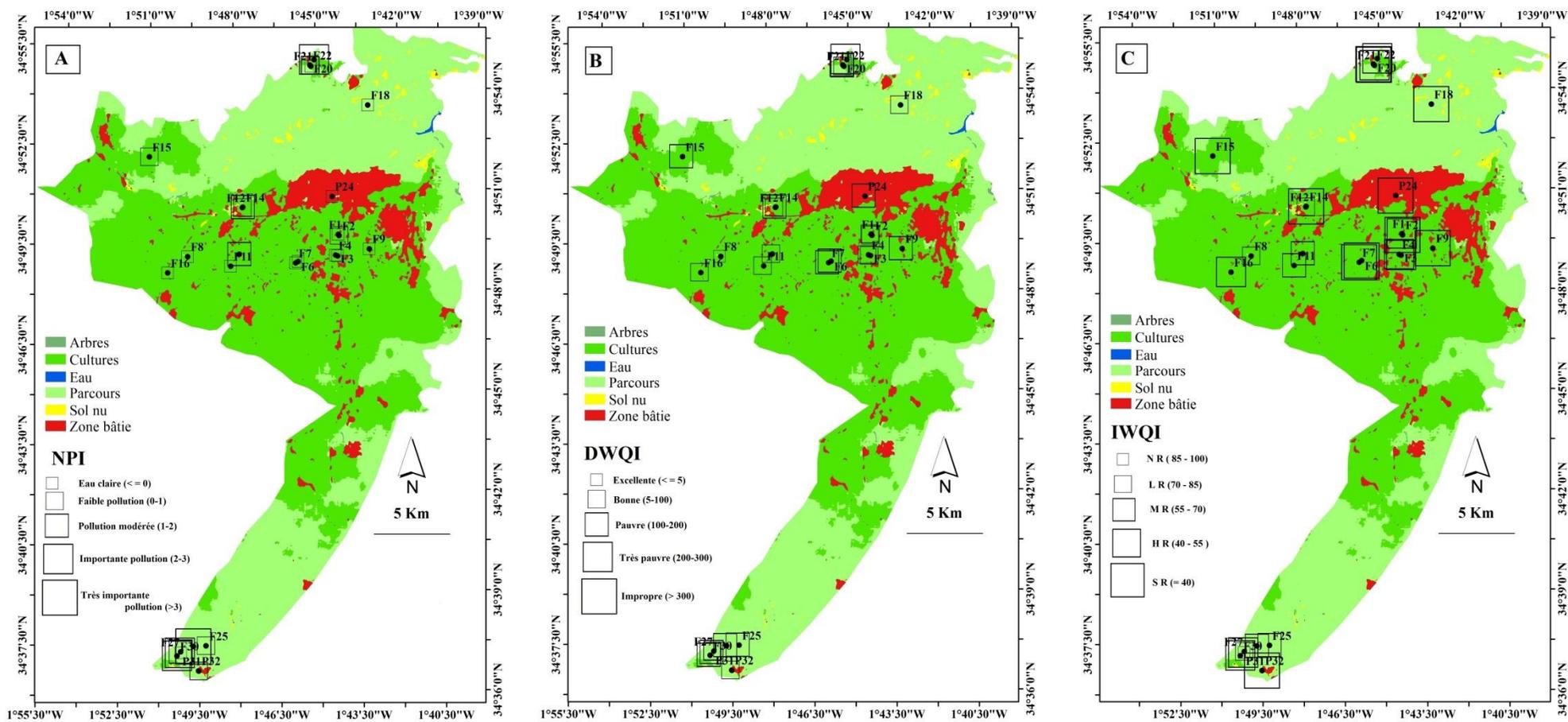


Figure 36. Confrontation des valeurs d'indices avec la carte d'Occupation des sols (OS). A. OS & NPI ; B. OS & DWQI ; C. OS & IWQI

CONCLUSION

Conclusion

Au terme de ce mémoire consacré à l'étude qualitative des eaux souterraines de la région de Maghnia, les principaux résultats obtenus seront ici promptement résumés :

- Sur le plan géomorphométrique et climatique

La zone d'étude délimitée couvre la totalité de la plaine de Maghnia et une partie de la région de Béni-Boussaid. Elle s'étend sur une aire drainée de 393,34 km² et d'un périmètre d'environ 146.4 km. Sa variation altimétrique est comprise entre 237 et 961 m et ses pentes évoluent de 0 et 27 %. Son réseau hydrographique est caractérisé par une structure dendritique. L'occupation de ses sols offre un paysage varié constitué de terrain agricole, d'espaces boisés, de terrains bâtis et des zones à sol nu et une retenue d'eau.

Le climat de la région d'étude est de type semi-aride, manifesté par deux périodes, une **humide** qui s'étend du début du mois de novembre à mi-avril et une autre **sèche** qui dure pendant le reste de l'année.

- Sur le plan hydrogéochimique

La minéralisation des eaux souterraines de la région de Maghnia est très variable, avec des valeurs de CE qui oscillent entre 703 µS/cm et 5090 µS/cm. Les teneurs en chlorure et sodium, très élevées, atteignent des concentrations respectivement de 1948 mg/L (Cl⁻) et 832,40 mg/L (Na⁺), surtout dans la partie nord et nord-est de zone délimitée.

Les diagrammes de Piper, Berkaloff et Durov, indiquent une dominance des faciès hydrochimiques de type chloruré sodique, les eaux sont alcalines à acides forts prédominants, liées à un échange d'ions inverse effectué par fixation du sodium ou du potassium et solubilisation du calcium.

Les indices de saturation IS indiquent que les eaux souterraines de la région de Maghnia, sont en état de sous-saturation en minéraux évaporitiques, suggérant une tendance à la dissolution de ces minéraux, notamment pour l'halite. Cet enrichissement distingué en sodium, chlorures de l'eau souterraines, principalement, en zones nord de la région de Maghnia, est du probablement à son passage à travers les formations évaporitiques néogéniques abondantes dans ces zones. Alors que pour les minéraux carbonatés, les valeurs IS majoritairement positive indiquent un état de sursaturation surtout par rapport à la dolomite.

Les indices d'échange de base IEB et IGM démontrent que 60,71% des points d'eaux souterraines échantillonnés sont de type Na⁺-HCO₃⁻, avec une source d'eau météorique de surface peu profonde. Et que le reste des points d'eau soit 39,28 % sont de type Na - SO₄, avec une prévalence fort probable des eaux de percolation d'eau météorique profonde.

- Sur le plan qualitatif

La qualité des eaux souterraines des aquifères de la région de Maghnia destinées à la consommation humaine, est relativement mauvaise, ceci est due à la forte minéralisation qui affectent considérablement le goût, ainsi que les concentrations préoccupantes en nitrates (> 50 mg/L fixée par le JORA et OMS) dans plusieurs points d'échantillonnage, rendant ces eaux impropres à la potabilité.

Pendant, en ce qui concerne, la qualité des eaux à des fins d'irrigation, les classifications basées sur les standards de la FAO, indices d'irrigation et diagrammes, démontrent que globalement les eaux souterraines du secteur d'étude sont de qualité modérée à mauvaise pour l'irrigation surtout dans la partie nord et nord-est, où les valeurs excessives en Na^+ et Cl^- , entraînent des effets néfastes spécifiques sur les propriétés physiques et chimiques des sols et la survie des plantes.

De plus, l'utilisation des indices de pollution par nitrates ainsi que des indices de qualité des eaux potables (DWQI) et d'irrigation (IWQI), couplée au Système d'Information Géographique (SIG), a permis de confirmer la probabilité de la contamination des eaux souterraines par les nitrates, provenant soit des infiltrations des rejets d'eaux usées non traitées ou des fuites des systèmes d'assainissement à proximité des zones d'habitations, soit des utilisations non contrôlées et excessives d'engrais et de fertilisants dans certaines parcelles agricoles.

Les projections des valeurs des indices NPI et DWQI sur la carte d'occupation des sols de région de Maghnia présentent des similitudes de spatialisation, où les zones à qualité pauvre en termes de potabilité sont principalement celles à importante pollution par NO_3^- .

Toutefois, la qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation de la dite-région devient inquiétante en raison de leurs classifications en restrictions élevée à sévère en zones agricoles.

Cette accumulation de fortes teneurs en sels, réduisent à la fois l'utilisation de ces eaux souterraines à des fins d'irrigation, mais aussi le choix de culture, ce qui impactera considérablement la productivité agricole régionale.

A l'issue des résultats obtenus dans ce travail, quelques perspectives nous apparaissent, en particulier:

- Effectuer des études hydrogéologiques de la région de Maghnia, afin de compléter l'identification des aquifères, de déterminer leurs caractéristiques hydrodynamiques et d'établir des cartes hydrogéologiques récentes ;
- Mettre en place un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines et de surface pour évaluer l'état ponctuel et spatial des eaux du point de vue chimique mais aussi biologique ;
- Dresser un planning d'information et de sensibilisation des agriculteurs avec les services tuteurs du secteur agricole autour de l'intérêt d'une connaissance approfondie sur les sols et les ressources hydriques souterraines, ainsi que

l'introduction des cultures spécifiques et adaptées à la région de Maghnia. L'utilisation rationnelle des fertilisants et pesticides et l'installation des systèmes d'irrigation appropriés doivent être évoqués dans ces campagnes de sensibilisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Albinet, A. (1963). La pollution des eaux souterraines, Etude Documentaire. BRGM, Paris. 151p.
- Asadi, E., Isazadeh, M., Samadianfard, S., Ramli, M.F., Mosavi, A., Shamshirband, S., Chau, K.W. (2019). Groundwater Quality Assessment for Drinking and Agricultural Purposes in Tabriz Aquifer, Iran. Preprint-Engineering, Civil Engineering.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture, FAO irrigation and Drainage. 29 Paper, Rev I. Food and Agriculture Organisation, Rome. 174p.
- Baba-Hamed, K. (2007). Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique, application à la nappe de Maghnia. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 158 p.
- Bendjeffal, H., Chater, M.M. (2020). Contribution a l'etude de l'origine des eaux traitees par la station de legfef (Maghnia, NW-Algerie). Mém. Master, Hydrogéologie, Université de Tlemcen, Algérie, 155p.
- Benmansour, N., Kouri, L., Taibi, A.N. (2019). Evolution d'occupation du sol et ses impacts sur les ressources hydriques dans la plaine de Maghnia (Nord-Ouest algérien). Revue des Sciences de l'Eau, 32(3), 219-230.
- BENEST, M. (1982). Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie occidentale). Revue de Géologie dynamique et de Géographie Physique, Vol. 23, Fasc. 5, pp. 345-362, Paris.
- Brown, R.M., McLelland, N.I., Deininger, R.A., O'Connor, M.F. (1972). A water quality index - crashing the psychological barrier. Indicators of Environmental Quality, 1(1), 173-178.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (2015). Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford, 3rd edition, 328 p
- BONNET, M. (1965). Étude hydrogéologique de la plaine de Maghnia. Rapport S.E.S n°59/GE, Oran, 45p.
- BRYAN, N.S., LOSCALZO, J. (2011). Nitrite and Nitrate in Human Health and Disease. Humana Press, Totowa, New Jersey, 306p.
- Chadha, D.K. (1999). A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. Hydrogeology Journal, 7, 431-439.
- D.R.E.W. TLEMCEN. (2003). -Etude de dépollution du barrage de Hammam Boughrara wilaya de Tlemcen. Rapport scientifique établi par E.N.H.P.O.
- Djedjai, H., Hadjela, M., Belaroui, K., & Benabdellah, M. (2013). Study of water quality on the plain of Maghnia (Western Algeria). *Desalination and Water Treatment*, 51(16), 3177-3185. Taylor & Francis.
- Durand, J.H. (1973). Utilisation des eaux salines pour l'irrigation. Bulletin Technique d'Information (B.T.I), 276, 39-58.
- Durov, S.A. (1948). Natural Waters and Graphic Representation of Their Composition. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 59(3), 87-90.

- DONEEN, L.D. (1964). Notes on water quality in agriculture. Water Science and Engineering Paper 4001, Department of Water Sciences and Engineering, University of California, 48p.
- Eaton, F.M. (1950). Significance of carbonates in irrigated water. *Soil Sciences*, 69, 127-128.
- ESRI (2021). ArcGIS Desktop 10.8.2. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
- FEWTRELL, L. (2004). Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: A discussion. *Environmental Health Perspectives*, 112, pp. 1371-1374.
- Grattan, S.R. et Grieve, C.M. (1998). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 127-157.
- GUARDIA, P. (1975). Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord occidentale. Thèse Doctorat, Université de Nice, 256p. 139 fig., 5 pl.
- HILL, M. (1996). *Nitrates and nitrites in food and water*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 196p.
- Journal Officiel de la République Algérienne (J.O.R.A.) (2011). Décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.
- Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., Bourrié, G. (2019). Water Quality Indices: Challenges and Application Limits in the Literature. *Water*, 11, 36
- Karakuş, C.B. (2020). Evaluation of water quality of Kızılırmak River (Sivas/Turkey) using geo-statistical and multivariable statistical approaches. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 4735-4769.
- Kelley, W.P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. *Soil Science*, 95, 385-391.
- Kumar, P.J.S. (2013). Interpretation of groundwater chemistry using piper and Chadha's diagrams: a comparative study from perambalur taluk. *Elixir Geoscience*, 54, 12208-12211.
- Langguth H.R. (1966) - Groundwater verhältnisse in Bereiech Des Velberter Sattles. Der Minister Fur Erahrung, Land Wirtsch Forste Duesseldorf, 127 p.
- Li, J., Heap, A.D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189.
- LOHUMI, N., GOSAIN, S., JAIN, A., GUPTA, V.K., VERMA, K.K. (2004). Determination of nitrate in environmental water samples by conversion into nitrophenols and solid phase extraction spectrophotometry, liquid chromatography or gas chromatography-mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 505, pp. 231-237.
- Lloyd, J.W., Heathcoat, J.A. (1985). *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: an introduction*. Oxford University Press, New York, 296p.
- López-Chizhevsky, V.M., Lagutina, M.V., Voblikova, V.A., Ignatkina, A.V. (2021). The use of Durov diagram in studying the hydrogeochemical features of the underground water: A case study

- of the Privolzhskaya Upland in the Nizhniy Novgorod Region. *Environmental Earth Sciences*, 80(14), 1-18.
- LUCAS, G. (1942). Description géologique et pétrographique des Monts de Rhar Rouban et du Sidi El Abed. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, Alger, série 2, n°16, 539p., 131 fig., 34 pl.
- Matthess, G. (1982). The properties of groundwater. Department of Environmental Science, John Wiley and Sons, New York, 406p.
- Meireles, A.C.M., Andrade, E.M., Chaves, L.C.G., Frischkorn, H., Crisostomo, L.A. (2010). A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciência Agronômica*, 41, 349-357.
- Merkel, B., Planer-Friedrich, B., Nordstrom, D. (2008). *Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. Groundwater Geochemistry. Ed., D.K. Nordstrom, Springer, 200p.
- O.M.S. (Organisation Mondiale de la Santé) (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. Intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality : 4th Ed. Incorporating first addendum, 539p.
- Obeidat, M.M., Massadeh, A.M., Al-Ajlouni, A.M., Athamneh, F.S. (2012). Assessment of nitrate contamination of karst springs, Bani Kanana, northern Jordan. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(3), 771-783.
- PANNALA, A.S., MANI, A.R., SPENCER, J.P.E., SKINNER, V., BRUCKDORFER, K.R., MOORE, K.P., RICE-EVANS, C.A. (2003). The effect of dietary nitrate on salivary, plasma, and urinary nitrate metabolism in humans. *Free Radical Biology and Medicine*, 34, pp. 576-584.
- Piper, A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
- RAHMAN, M., BODRUD-DOZA, M., MUHIB, M.I., HOSSAIN, K.F.B., HOSSAIN, M.S., AKTER, S., SIKDER, M.T., SHAMMI, M., UDDIN, M.K. (2019). Human Health Risk Assessment of Nitrate and Trace Metals Via Groundwater in Central Bangladesh. *Earth Sciences*. <https://doi.org/10.20944/preprints201901.0075.v1>
- Ravikumar, P., Somashekar, R.K., Prakash, K.I. (2015). A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India. *Elixir Earth Sciences Journal*, 80, 31073-31077.
- Richards, L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook, 60. US Department of Agriculture, Washington, DC, 160p.
- Roberts, D., Sutton, B., Flinn, B. (1990). Synchronous and high frequency germination of interior spruce somatic embryos following partial drying at high relative humidity. *Canadian Journal of Botany*, 68(5), 1086-1090.
- Saaty, T.L. (1984). Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision. Vol. 7. Esf Editeur.
- Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K., Liaghat, A.M. (2014). Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3827-3843.

- SAWYER, C.N., MACARTHY, P.L., PARKIN, G.F. (2003). Chemistry for environmental engineering and science. McGraw-Hill, New York, 5th Edition, 752p.
- Schoeller, H. (1962). Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie, Paris, 642p.
- Schoeller, H. (1965). Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigation and development. Water Rese Series,-33, UNESCO, Delft, 54-83.
- Schoeller, H. (1977). Geochemistry of groundwater. In: Groundwater studies-an international guide for research and practice, supplement no. 3 to groundwater studies. UNESCO Technical Papers Hydrology, 7, UNESCO, Paris, chap. 15, 1-18.
- Singh, C.K., Shashtri, S., Mukherjee, S. (2011). Integrating multivariate statistical analysis with GIS for geochemical assessment of groundwater quality in Shiwaliks of Punjab, India. Environmental Earth Sciences, 62, 1387-1405.
- Subba Rao, N., Srihari, Ch., Deepthi Spandana, B., Sravanthi, M., Kamalesh, T., Abraham Jayadeep, V. (2019). Comprehensive understanding of groundwater quality and hydrogeochemistry for the sustainable development of suburban area of Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 25, 52-80.
- Szabolcs, I., Darab, C. (1964). The influence of irrigation water of high sodium carbonate content of soils. Proceedings of 8th international congress of ISSS, Trans, 803-812.
- Todd, D.K., Mays, L.W. (2004). Groundwater hydrology (3rd Ed.). Wiley, New York, 656p.
- USGS (United States Geological Survey) (2021). Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS).
- WARD, M.H., DEKOK, T.M., LEVALLOIS, P., BRENDER, J., GULIS, G., NOLAN, B.T., DERSLICE, J.V. (2005). Workgroup report: Drinking-water nitrate and health- Recent findings and research needs. Environmental Health Perspectives, 113, pp. 1607-1614.
- Wilcox, L.V. (1948). The Quality of Water for Irrigation Use. Technical Bulletins, 962, United States Department of Agriculture, Economic Research Service. 40p.
- Wilcox, L.V. (1955). Classification and use of the irrigation waters. U.S. Department of Agriculture Circular, 969, Washington, District of Columbia, 19p.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. (2000). Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York.
- Yebdri, L. (2023). Etude de la vulnérabilité des eaux du bassin versant de la Tafna (Algérie, Nord-Occidentale). Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 208 p.

LISTE FIGURES ET TABLEAUX

Liste des Figures

Figure 2	Situation géographique de la plaine de Maghnia	3
Figure 2	Réseau hydrographique de la plaine de Maghnia.	5
Figure3	Série lithostratigraphique	8
Figure4	Localisation des points d'échantillonnage	10
Figure5	Diagramme de Piper	13
Figure 6	Diagramme de Schoeller-Berkalof.	13
Figure 7	Diagramme de Durov	14
Figure 8	Diagramme de Wilcox	19
Figure 9	Modèle numérique de terrain appelé (MNT) du secteur d'étude	25
Figure 10	Image satellite Landsat 8	26
Figure 11	Délimitation de la zone d'étude	28
Figure 12	Carte des faciès du secteur d'étude	29
Figure 13	Carte altimétrique de la zone d'étude	30
Figure 14	Carte des pentes de la zone d'étude	31
Figure 15	Carte du réseau hydrographique du secteur d'étude	32
Figure 16	Occupation du sol de la zone d'étude	33
Figure 17	Variations des totaux pluviométriques annuels enregistrées à la station de Maghnia (1972/73-2022/23).	34
Figure 18	Variation des températures moyennes mensuelles enregistrées à la station de Maghnia (1976/77-2022/23).	36
Figure 19	Diagramme pluviothermique de la station de Maghnia (1976/77-2022/23)	37
Figure 20	Degré d'aridité annuelle de DE-MARTONNE	38
Figure 21	Degré d'aridité mensuel selon DE-MARTONNE	39
Figure 22	Analyse par boîte à moustache (A. Anions) (B. Cations).	40
Figure 23	Diagramme de PIPER appliqué pour les eaux souterraines de la région de Maghnia.	42
Figure 24	Diagramme de Scholler-Berkaloff.	43
Figure 25	Diagramme de Durov.	44
Figure 26	Evolution des indices de saturation des eaux dans le secteur d'étude	46
Figure 27	Corrélation entre : CAI-1 vs CAI-2	47
Figure 28	IEB vs IMG	48
Figure 29	Spatialisation des paramètres chimiques selon la classification des problèmes potentiels liés à l'irrigation (FAO).	55
Figure 30	Variation spatiale des valeurs des indices d'irrigation	56
Figure 31	Diagramme de Wilcox	57
Figure 32	Diagramme de Riverside 1954	58
Figure 33	Variation spatiale de l'indice NPI dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.	60
Figure 34	Variation spatiale de l'indice DWQI dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.	61
Figure 35	Variation spatiale de l'indice IWQI-MEIRELES dans les eaux souterraines de la région de Maghnia.	62
Figure 36	Confrontation des valeurs d'indices avec la carte d'Occupation des sols (OS).	64

Liste des tableaux

Tableau 1	Caractéristiques des points d'échantillonnage des eaux souterraines	10
Tableau 2	Classification des eaux selon le diagramme de Durov	15
Tableau 3	Directives pour l'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation	18
Tableau 4	Indices d'irrigation utilisés	18
Tableau 5	Classification de la qualité des eaux d'irrigation sur Diagramme de Richards	20
Tableau 6	Classification NPI	20
Tableau 7	Poids et poids relatifs attribués pour DWQI basés sur les standards du JORA (2011) et de l'OMS (2017).	22
Tableau 8	Classification de la qualité de l'eau basée sur les valeurs de DWQI.	22
Tableau 9	Valeurs limites des paramètres de la qualité (qi)	23
Tableau 10	Poids des paramètres utilisés dans le calcul d'IWQI	23
Tableau 11	Caractéristiques des indices de qualité des eaux d'irrigation	24
Tableau 12	Moyennes pluviométriques saisonnières. Station de Maghnia (1972/73-2022/23)	34
Tableau 13	Précipitations moyennes mensuelles. Station de Maghnia (1972/73-2022/23).	34
Tableau 14	Répartition thermométrique moyenne mensuelle minimale, maximale et moyenne de la station de Maghnia (1976/77- 2022/23).	35
Tableau 15	Valeurs pluviométriques et thermométriques moyennes mensuelles de la station de Maghnia (1976/77- 2022/23).	36
Tableau 16	Valeurs des indices d'aridité de DE Martonne mensuels.	38
Tableau 17	Valeurs minimales, maximales, et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines	40
Tableau 18	Indice de saturation selon le logiciel Phreeq des eaux souterraines de la zone d'étude	46
Tableau 19	Classifications des eaux souterraines de la région de Maghnia selon les standards relatifs à la potabilité.	49
Tableau 20	Classification des eaux selon le SAR et la conductivité (FAO).	50

ANNEXES

Annexes

ANNEXE 1

