Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master 2

Sciences de la Terre

Option : hydrosystèmes et roessources en eau

THÈME

Classification et cartographie des indices de qualité des eaux souterrain de la nappe jurassique supérieur de la plaine de Ghriss.

Présenté par :

M. CHAKLEL Chaimaa

M. ZAHED Meriem

Devant le jury composé de :

M. BAKHTI Amel	**Université d'Oran 2**	**P r é s ident**
M. BELKHIR Khadidja	**Université d'Oran 2**	**E n c adreur**
Mr.BERGANE Cheikh	**Université d'Oran 2**	**Examinateur**

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à :

- **Mon encadrante, Madame [belkhier khadidja] :** Pour sa précieuse orientation, sa patience, et ses conseils avisés qui ont éclairé mon chemin tout au long de la réalisation de ce travail. Je la remercie chaleureusement pour son dévouement et son soutien constant.
- **Messieurs et Mesdames les membres du jury :** Pour avoir honoré ce travail en acceptant de l'évaluer, de le critiquer et de l'enrichir par leurs précieuses remarques.

Nous tenons également à exprimer notre vive gratitude à l'ensemble des enseignants qui ont jalonné notre parcours universitaire, pour leur dévouement et la richesse du savoir qu'ils nous ont transmis.

Enfin, nos remerciements s'adressent aux responsables et au personnel technique de **[l'ADE de Mascara / ANRH]** pour leur accueil chaleureux, leur précieuse collaboration et l'aide qu'ils nous ont apportée durant notre période de stage.

Dédicace de Meriem

Je dédie ce modeste travail :

À ceux dont je porte le nom avec une immense fierté, à ceux qui m'ont soutenue par leurs prières et leur amour inconditionnel... **À ma chère mère et mon cher père**, que Dieu les préserve et leur accorde une longue vie.

À mes piliers et compagnes de route, **mes chères sœurs**, pour avoir partagé avec moi chaque moment avec tant d'affection.

À celle qui a laissé une empreinte indélébile dans mon cœur, **à ma regrettée grand-mère** (Que Dieu lui fasse miséricorde), qui m'a toujours encouragée à poursuivre mes études et qui rêvait de me voir réussir. J'espère que, de là-haut, elle est fière de moi.

À **mon cher grand-père**, que Dieu le protège et lui prête longue vie.

À ceux qui m'ont ouvert leur maison et leur cœur, **à ma tante et son honorable époux**, qui m'ont accueillie durant mes études et m'ont traitée comme leur propre fille. Un grand merci pour votre générosité et votre bienveillance infinies.

À **ma jeune tante**, qui a toujours été un soutien et un encouragement précieux, et à **ma chère cousine**, qui a été pour moi bien plus qu'une parente, mais une véritable sœur, la plus proche et la plus chère à mon cœur.

Dédicace de Chaimaa

À mes très chers parents, Ma source de force et d'inspiration. Merci pour vos sacrifices et votre amour inconditionnel. C’est grâce à vous que j'en suis arrivée là. Que Dieu vous préserve.

À la douce mémoire de mon oncle maternel, j'aurais tant voulu que tu sois présent pour partager ce moment. Ton souvenir restera à jamais gravé dans mon cœur.

Que Dieu t'accueille dans Son vaste Paradis.

À mon cher frère, pour ton soutien constant et ta présence rassurante à mes côtés. Je te souhaite tout le bonheur et la réussite du monde.

À ma famille mes amis, et à tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin.

À ma chère binôme Meriem, pour cette belle collaboration, son soutien et les moments inoubliables passés ensemble pour accomplir ce travail.

À tous ceux qui me sont chers, je dédie ce succès.

1. TABLE DES MATIÈRES :

TITRE DES CHAPITRES ET SECTIONS	
Résumé / Abstract	**1**
Introduction Générale	**1**
Chapitre I : Cadre d'étude de la plaine de Ghriss	**2**
I.1. Situation géographique du bassin de la plaine de Ghriss	**2**
I.2. Contexte Géologique	**3**
I.3. Caractéristiques Géomorphologiques	**4**
I.4. Contexte Climatique et Pluviométrie	**5**
I .5. Contexte Hydrogéologique et Aquifères	**6**
I.5.1. Aquifère du Plio-Quaternaire	**7**
I.5.2. Aquifère des calcaires dolomitiques du Jurassique	**8**
I.6. Piézométrie et sens d'écoulement de la nappe	**9**
Chapitre II : Matériels et Méthodologie	**10**
II .1. Collecte des données et Réseau d'échantillonnage (ADE Mascara)	**10**
II.2. Analyse Spatiale et Interpolation par Krigeage Ordinaire (SIG)	**11**
II.3. Méthodologie de calcul de l'Indice de Qualité des Eaux (IQE / GWQI)	**12**
II.4. Évaluation de l'aptitude à l'irrigation (SAR, KI, PI)	**13**
Chapitre III : Résultats et Discussions	**14**
III.1. Caractérisation Hydrochimique et statistiques des éléments majeurs	**14**

TITRE DES CHAPITRES ET SECTIONS	
III.2. Évaluation de la potabilité via l'indice GWQI (IQE)	**15**
III.3. Évaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le diagramme de Richards	**16**
III.4. Modélisation spatiale et Validation croisée (Semi-variogrammes)	**17**
III.5. Distribution spatiale et zonage de la qualité des eaux (Cartographie)	**18**
III.5.1. Cartographie prédictive de l'IQE (Zone de Guerdjoum)	**18**
III.5.2. Distribution spatiale de l'Indice de Kelley (KI)	**19**
III.5.3. Distribution spatiale de l'Indice de Perméabilité (PI)	**20**
III.5.4. Distribution spatiale de l'indice Sodium Adsorption Ratio (SAR)	**21**
Conclusion Générale	**22**
Bibliographie	**23**

2. LISTE DES CARTES :

NUMÉRO	TITRE EXACT DE LA CARTE	
Figure 01	Situation géographique du bassin de la plaine de Ghriss.	**2**
Figure 02	Carte géologique de la plaine de Ghriss (Benfetta H. 1997).	**3**
Figure 03	Carte géomorphologique de la plaine de Ghriss (Bekkoussa, 2020).	**5**
Figure 04	Carte pluviométrique du bassin de la plaine de Ghriss.	**5**
Figure 06	Carte piézométrique de l'aquifère Jurassique année 2012 (Bekkoussa, 2020).	**9**
Figure 07	Situation des forages retenus pour l'étude de la nappe du Jurassique.	**10**

Figure 12	Distribution spatiale de l’IQE de la nappe du jurassique de la plaine de Ghriss.	**18**
Figure 13	Distribution spatiale de KI de la nappe du jurassique de la plaine de Ghriss.	**19**
Figure 14	Distribution spatiale de PI de la nappe du jurassique de la plaine de Ghriss.	**20**
Figure 15	Distribution spatiale de l'indice de Sodium Adsorption Ratio (SAR) au sein de l'aquifère jurassique.	**21**

3 .LISTE DES FIGURES :

NUMÉRO	TITRE EXACT DE LA FIGURE	
Figure 05	Coupe hydrogéologique du Bassin d'Oued Fekan (la plaine Ghriss) (Bekkoussa et al., 2008).	**8**
Figure 08	Organigramme de calcul de l'IQE.	**12**
Figure 09	Répartition des concentrations (moyenne des ions majeurs) en meq/l.	**14**
Figure 10	Les résultats des analyses portés sur le diagramme de Richards.	**16**
Figure 11	Semi-variogramme expérimentaux et théoriques des indices de qualité des eaux de la nappe jurassique de la plaine de Ghriss.	**17**

Résumé :

L'objectif principal cette étude est d'évaluer l'aptitude des eaux de l'aquifère profond du Jurassique de la plaine de Ghriss situé au nord_ouest Algérien à la consommation humaine et à l'irrigation durable. La démarche méthodologique repose sur l'intégration des indices numériques de qualité des eaux telle que le IQE ,indice de Kelly,SAR ,indice de perméabilit IP% dans un environnement de Systèmes d'Information Géographique (SIG), en utilisant la méthode du Krigeage ordinaire pour la cartographie prédictive des ces indices. La cartographie de ces indice et la répartition spatiale de ces classes permettent d'identifier les zones de bonne qualité chimiques pour la consommation humaine et pour l'irrigation,et les zones de mauvaise qualité où l'eau nécessite un traitement préalable avant toute consommation humaine ou utilisation industrielle.ces zones sont localisé dans la partie sud-ouest de la plaine de Ghriss , précisément dans la région de Guerdjoum, où l'IQE atteint des valeurs critiques comprises entre 100 et 200, pour les autre indices restent largement inférieur aux seuils critiques ce qui confirme que l'eau de la nappe jurassique est de qualité "Excellente" pour l'irrigation.

Mots-clés : Plaine de Ghriss, Hydrochimie, Krigeage,indice de Qualité des eaux,carthographie.

Abstract:

The main objective of this study is to assess the suitability of the waters of the deep Jurassic aquifer in the Ghriss plain, located in northwestern Algeria, for human consumption and sustainable irrigation. The methodological approach is based on the integration of numerical water quality indices, such as the IQE (Water Quality Index), Kelly criterion, SAR (Seasonal Area Ratio), and IP% (Permeability Index), within a Geographic Information System (GIS) environment, using ordinary kriging for predictive mapping of these indices. Mapping these indices and the spatial distribution of these classes allows for the identification of areas of good chemical quality for human consumption and irrigation, and areas of poor quality where the water requires pretreatment before any human consumption or industrial use. These areas are located in the southwestern part of the Ghriss Plain, specifically in the Guerdjoum region, where the Water Quality Index (WQI) reaches critical values between 100 and 200. Other indices remain well below critical thresholds, confirming that the Jurassic aquifer water is of "Excellent" quality for irrigation.

Keywords: Ghriss Plain, Hydrochemistry, Kriging, Water Quality Index, Mappin.

ملخص :

تتمثل الأهداف الرئيسية لهذه الدراسة في تقييم مدى ملاءمة مياه الخزان الجوفي العميق للجوراسي في سهل غريس (المتواجد في الشمال الغربي الجزائري) للاستهلاك البشري والري المستدام. تعتمد المنهجية المتبعة على دمج المؤشرات ، ومؤشر (SAR) ، ونسبة امتزاز الصوديوم(KI) ، ومؤشر كيلي(IQE) الرقمية لجودة المياه، مثل: مؤشر جودة المياه Ordinary) باستخدام طريقة الكريجنج العادي (SIG) ، وذلك ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية(PI%) النفاذية لرسم الخرائط التنبؤية لهذه المؤشرات. وتسمح هذه الخرائط والتوزيع المكاني لفئاتها بتحديد المناطق ذات (Kriging الجودة الكيميائية الجيدة للاستهلاك البشري والري، والمناطق ذات الجودة الرديئة التي تتطلب فيها المياه معالجة مسبقة قبل أي استهلاك بشري أو استخدام صناعي. تقع هذه المناطق الرديئة في الجزء الجنوبي الغربي من سهل غريس، وتحديداً في إلى قيم حرجة تتراوح بين 100 و200. أما بالنسبة للمؤشرات (IQE) منطقة غردجوم، حيث يصل مؤشر جودة المياه .الأخرى، فإنهاتظل أقل بكثير من العتبات الحرجة، مما يؤكد أن مياه الخزان الجوفي للجوراسي ذات جودة "ممتازة" للري

الكلمات المفتاحية: سهل غريس، الهيدروكيمياء، الكريجنج، مؤشر جودة المياه، رسم الخرائط.

Introduction Générale

Introduction Générale :

Dans les régions semi-arides du Nord-Ouest algérien, la sécurité hydrique repose sur une compréhension fine des hydrosystèmes souterrains. Au cœur de la wilaya de Mascara, la plaine de Ghriss constitue un pôle agricole majeur où la demande en eau ne cesse de croître. Si la nappe superficielle du Plio-Quaternaire est la plus exploitée, elle est aujourd'hui vulnérable aux pollutions de surface. Dans ce contexte, la nappe profonde du Jurassique apparaît comme une ressource stratégique alternative d'une qualité exceptionnelle.

L'aquifère jurassique, protégé par des formations géologiques plus profondes, présente une signature chimique complexe influencée par les bordures montagneuses des Béni Chougrane et des Monts de Saïda. L'évaluation de cette ressource nécessite une approche rigoureuse combinant l'hydrochimie et la modélisation spatiale. Ce travail de recherche vise à caractériser cet aquifère en utilisant des outils de pointe comme le Krigeage et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), afin de cartographier avec précision son aptitude à l'irrigation et à la consommation d'humaine.

Ce travail vise à évaluer la qualité des eaux souterraines de la nappe du jurassique. Cette région se distingue par une géologie complexe, où les formations sédimentaires telles que les alluvions, les calcaires et les argiles sableuses influencent directement la composition minérale des eaux. La méthodologie adoptée repose sur l'analyse des données physico-chimiques des forages fournis par l'Algérienne Des Eaux (ADE) de Mascara,ensuite L'évaluation de la potabilité via l'Indice de Qualité des Eaux (IQE) et de l'aptitude à l'irrigation à travers les indices SAR, Kelley (KI) et de Perméabilité (PI) , Grâce aux outils de télédétection et aux systèmes d'information géographique (SIG), les indices de qualité des eaux ont été modélisés spatialement. La techniques d'interpolation par krigeage ordinaire utilisée a conduit à la création de cartes des indices de qualité des eaux ,qui offrent une représentation globale et visuelle de l'état de la nappe. Ces cartes se révèlent être des instruments clés pour favoriser une gestion durable et assurer la protection des ressources hydriques de la plaine de Ghriss face aux dangers liés à la pollution

Ce présent document est subdivisé en trois (3) chapitres :

- Le premier chapitre présente le cadre physique de la zone d'étude et les contextes géologiques et hydrogéologiques ;

- Le second correspond à la méthodologie :

1.Echantillonnage d'eau .

2. Cartographie des données.

3 Estimation de l'indice de la qualité des eaux (IQE).

4. estimation les indices de qualité pour l' aptitude à l'irrigation :

- le taux d'adsorption de sodium (SAR).
- l'indice de Kelley.
- l'indice de perméabilité (PI) .

Chapitre I :

CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE ET CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

I.1. Situation géographique de la wilaya de Mascara :

Mascara, une ville chargée d'histoire et symbole de résistance, est située à environ 80 km au sud-est d'Oran, sur le flanc sud des monts de Béni Chougrane. Elle est le chef-lieu de la Wilaya de Mascara, qui comprend huit localités modestes, où vit une population significative dans des douars dispersés à travers la plaine environnante. Parmi ces localités, Sidi Kada se distingue par son mausolée, celui de Sidi Mahiéddine, qui a hébergé, dans le passé, la Smala de l'Émir. Sur le plan agricole, cette région est reconnue comme l'une des plus fertiles de l'Oranie, contribuant de manière significative à la production agricole de la région. La Wilaya de Mascara est délimitée à l'est par la Wilaya de Tiaret, au nord par celles d'Oran et de Mostaganem, à l'ouest par Sidi Bel Abbès et au sud par Saïda. En outre, la plaine de Ghriss, qui fait partie intégrante du bassin hydrologique de la Macta, s'étend sur une superficie de 1185 km², englobant tout le sous-bassin de l'oued Fékan. Historiquement, cette plaine était marquée par la présence de marécages, dont certains subsistent encore aujourd'hui, notamment dans la région de Maoussa, où se trouvent les marais de Sidi Lahssen, ainsi que dans le nord de Tizi, illustrant la richesse écologique et hydrologique de cette zone.

1.1.Situation géographique La Plaine de Ghriss :

La Plaine de Ghriss, située dans le Nord-Ouest algérien sous un climat semi-aride, représente un pôle agricole stratégique pour la Wilaya de Mascara. Dans ce contexte marqué par la rareté des eaux de surface, les ressources souterraines et particulièrement la nappe du Plioquaternaire constituent l'unique moteur du développement socio-économique et de la sécurité alimentaire locale. Cependant, cette ressource vitale fait face à une double pression : une surexploitation quantitative inquiétante et une évolution qualitative complexe de sa minéralisation. Pour répondre aux défis d'une gestion durable, une approche intégrée et devenue nécessaire. D'une part, l'étude de la géométrie du réservoir par la modélisation mathématique en différences finies permet de simuler l'impact des prélèvements sur les niveaux piézométriques. D'autre part, la compréhension de l'origine de l'eau et de sa composition chimique, via des analyses statistiques multivariées (ACP et CAH) sur 35 forages, permet d'identifier les mécanismes de recharge et les risques de dégradation liés aux activités humaines.

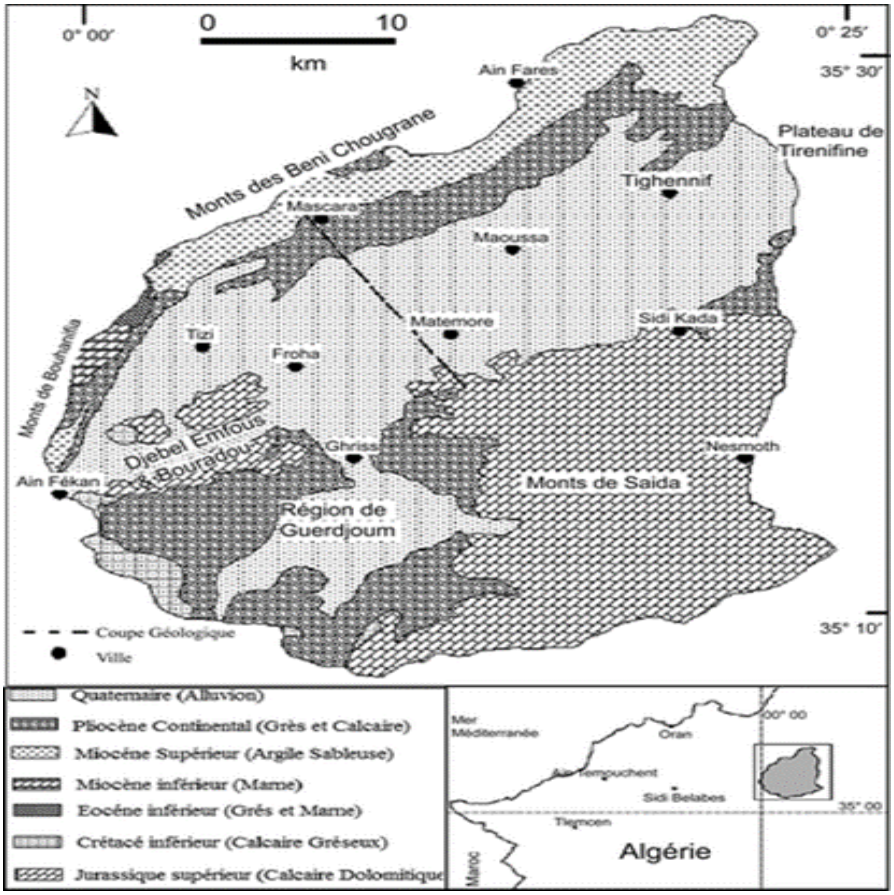


Figure1 : Situation géographique du bassin de la plaine de Ghriss(Bekkoussa et al., 2013).

l.2.situation géologique :

2.1. Introduction :

La plaine de Ghriss, située au nord-ouest de l'Algérie dans l'État de Mascara, est une région d'une importance géologique et hydrogéologique considérable. Cette plaine fait partie intégrante de la grande structure géologique de l'Atlas tellien, qui est caractérisée par une diversité de sédiments, principalement d'origine néogène et quaternaire. Les formations géologiques de cette région témoignent d'un passé géologique riche et complexe, influencé par des processus tectoniques variés.

La plaine repose sur un substrat constitué de formations argilo-calcaires, qui jouent un rôle crucial dans la dynamique des eaux souterraines. Ces formations, en raison de leur

composition et de leur structure, influencent la perméabilité et le stockage des eaux, ce qui est essentiel pour la gestion des ressources en eau dans cette région. De plus, la circulation des eaux souterraines est étroitement liée aux caractéristiques géologiques de la plaine, ce qui nécessite une compréhension approfondie des interactions entre les différentes couches géologiques.

Ainsi, une analyse détaillée de la stratigraphie, de la tectonique et des aquifères de la plaine de Ghriss est indispensable pour mieux cerner ses caractéristiques géologiques et hydrologiques. Ce chapitre se concentrera sur l'examen des formations géologiques et tectoniques les plus significatives de la zone à étudier, en mettant en lumière leur impact sur l'environnement hydro-géologique local et leur importance pour les études futures.

2.2. Effleurements géologiques :

La plaine de Ghriss se présente comme une unité hydrogéologique distincte, entourée de reliefs qui exhibent une grande diversité géologique. Son évolution géologique peut être décrite à travers plusieurs périodes clés :

La plaine de Ghriss constitue une entité hydrogéologique délimitée par des formations topographiques présentant des caractéristiques géologiques variées. Au nord et au nord-ouest de la plaine, les pentes sud des montagnes de Beni Chougrane se caractérisent par un terrain fortement plissé, soutenu par un cadre géologique du Crétacé, ainsi qu'un mort-terrain tertiaire exceptionnellement épais. Ce terrain est recouvert de marnes du Crétacé et de couches marno-calcaires, complété par des dépôts isolés de gypse et de sel du Trias, datant du Miocène.

Les formations nummulitiques, datées de l'Éocène et de l'Oligocène, se composent de constituants marneux et de grès, et se juxtaposent aux strates du Crétacé ou du Miocène. Ces dépôts néogènes, qui présentent un léger plissage, recouvrent actuellement la majorité de l'étendue sud des montagnes de Beni Chougrane.

Les limites nord et ouest de la plaine de Ghriss sont formées de formations marneuses et de dépôts argileux, auxquels s'ajoutent des terres perméables de divers degrés, essentielles pour l'alimentation des aquifères de la plaine. Dans le secteur nord-est de la plaine, et plus précisément à l'est de l'agglomération de Tighennif, l'élévation des dépôts marneux et argileux datant des périodes oligocène et miocène constitue une barrière relativement

imperméable. Cette barrière limite considérablement le bassin hydrologique de la plaine de Ghriss par rapport à celui de l'Oued Mina.

La limite sud du bassin versant de la plaine de Ghriss est délimitée par les montagnes de Saïda. Cette chaîne de montagnes est caractérisée par des formations karstiques, qui ont subi une tectonique fragile considérable. Des vestiges de cette tectonique sont encore observables, notamment dans les horsts du Djebel Emfouss et du Bourradou. Cet assemblage géologique présente un léger affaissement vers le nord, facilitant ainsi l'écoulement et le drainage des eaux karstiques vers la plaine.

Au niveau de la source d'Ain Fekan, cet assemblage calcaire-dolomitique du Jurassique supérieur est délimité par une faille qui le juxtapose à des argiles de grès du Crétacé, constituant ainsi une barrière importante. L'interruption soudaine de la perméabilité à cet endroit est à l'origine de l'émergence de la source d'Aïn Fekan.

Enfin, au centre de la plaine, une cuvette d'effondrement s'est formée, où se sont déposés des calcaires lacustres, particulièrement au nord de cette dépression, ainsi que des argiles rouges, des graviers roulés détritiques, des sables fins et des graviers d'origine quaternaire. Les seuls phénomènes tectoniques répertoriés dans la plaine de Ghriss sont les failles d'effondrement affectant le substratum jurassique (Sourisseau, 1972).

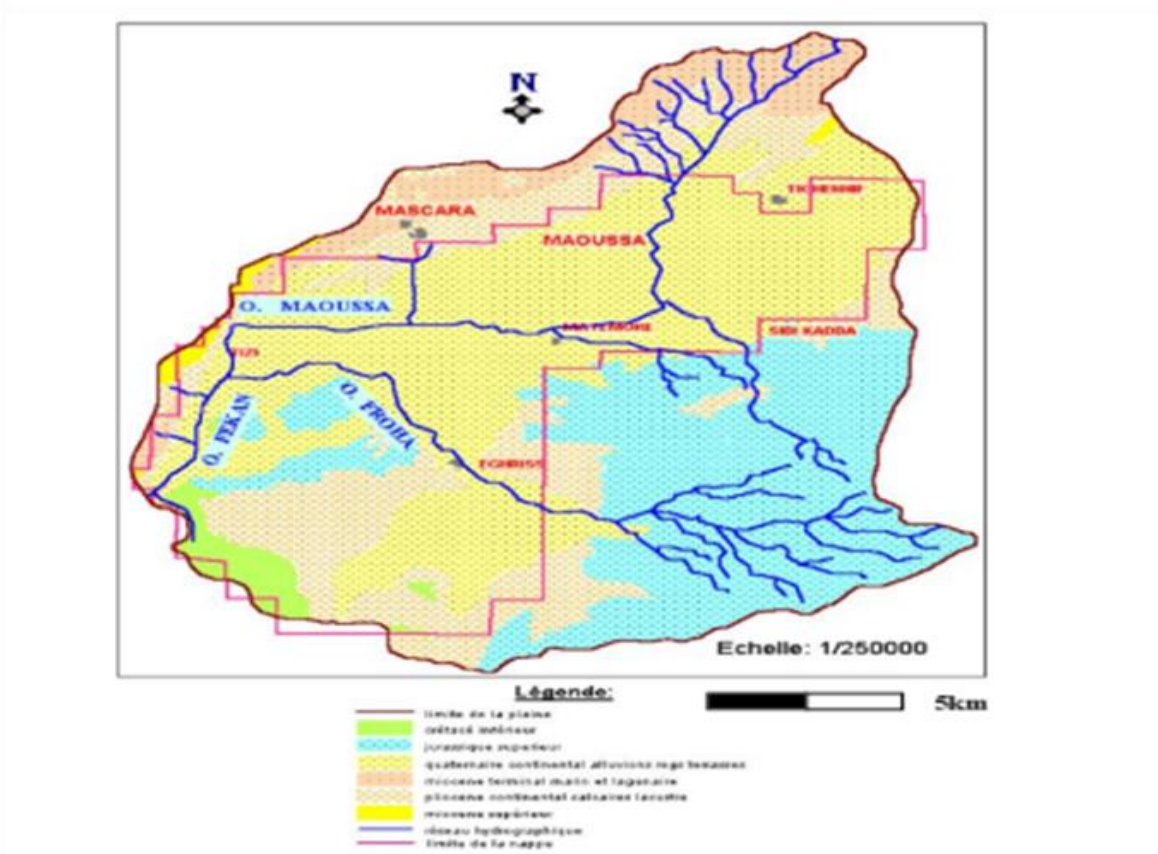


Figure 02 : Carte géologique de la plaine de Ghriss (Benfetta H. 1997).

I.3. Situation géomorphologie :

La plaine de Ghriss, autrefois largement occupée par des marécages, conserve encore aujourd'hui des vestiges de ces zones humides, notamment dans la région de Maoussa (Marais de Sidi Lahsen) et au nord de Tizi. Cette plaine présente une légère pente vers l'ouest, avec un relief globalement plat en son centre, tandis que ses bordures sont légèrement surélevées, à l'exception de sa partie occidentale, qui abrite le point le plus bas de la région.

La morphologie de la plaine se distingue par plusieurs aspects notables :

- Au Nord, à l'Ouest et au Sud : Des piémonts formant des bas-reliefs qui structurent le paysage environnant.

- Au Centre : Des buttes témoins d'un ancien environnement, accompagnées de monticules rocheux relativement élevés.
- Au Sud : Un important massif d'aspect tabulaire, coiffé de sommets dépassant 1000 mètres, notamment les Monts de Nesmot.
- À l'Est : Un relèvement du sol forme le col Temaznia, qui s'étend entre Tighennif et la vallée de l'Oued Haddad (HADADJI Abderrahmane et HICHOUR Bachir, 2007).

Ce bassin se caractérise par une topographie presque plane, à une altitude d'environ 470 mètres, entourée de reliefs culminant à environ 800 mètres. Il est délimité par :

- Au Nord et au Nord-Ouest : Les Béni Chougrane, constitués de terrains plissés et charriés, formant une barrière imperméable et continue, recouverte de formations perméables.
- Au Sud et au Sud-Est : Les monts de Saïda et Sidi Kadda (anciennement Cacherou), qui se composent de terrains rigides, peu plissés et fortement fracturés, assurant une limite méridionale perméable.
- À l'Ouest : Une barrière imperméable formée par le Crétacé inférieur, située entre les Béni Chougrane et les monts de Saïda, ce qui provoque la remontée des eaux à Ain Fekan.
- À l'Est : Une limite imperméable marquée par l'affleurement des marnes de l'Oligo-Miocène, ainsi que par la transition latérale des calcaires lacustres du Pliocène vers des calcaires marneux.

L'analyse approfondie réalisée dans le cadre de cette étude a permis d'identifier les principaux attributs géographiques, morphologiques et climatologiques de la plaine de Ghriss, ainsi que son réseau hydrographique. Il est important de souligner que la région présente un climat méditerranéen semi-aride, caractérisé par un hiver riche en précipitations et un été marqué par une faible pluviométrie. Cette dynamique climatique entraîne des variations périodiques du taux de reconstitution des eaux souterraines dans la plaine, influencées par les précipitations durant les saisons humides et par les effets thermiques pendant les saisons arides, tels que l'évaporation. Ces facteurs auront sans aucun doute un impact significatif sur les oscillations des niveaux d'eau de ces aquifères, qui constituent des réservoirs d'eau souterraine essentiels pour la région.

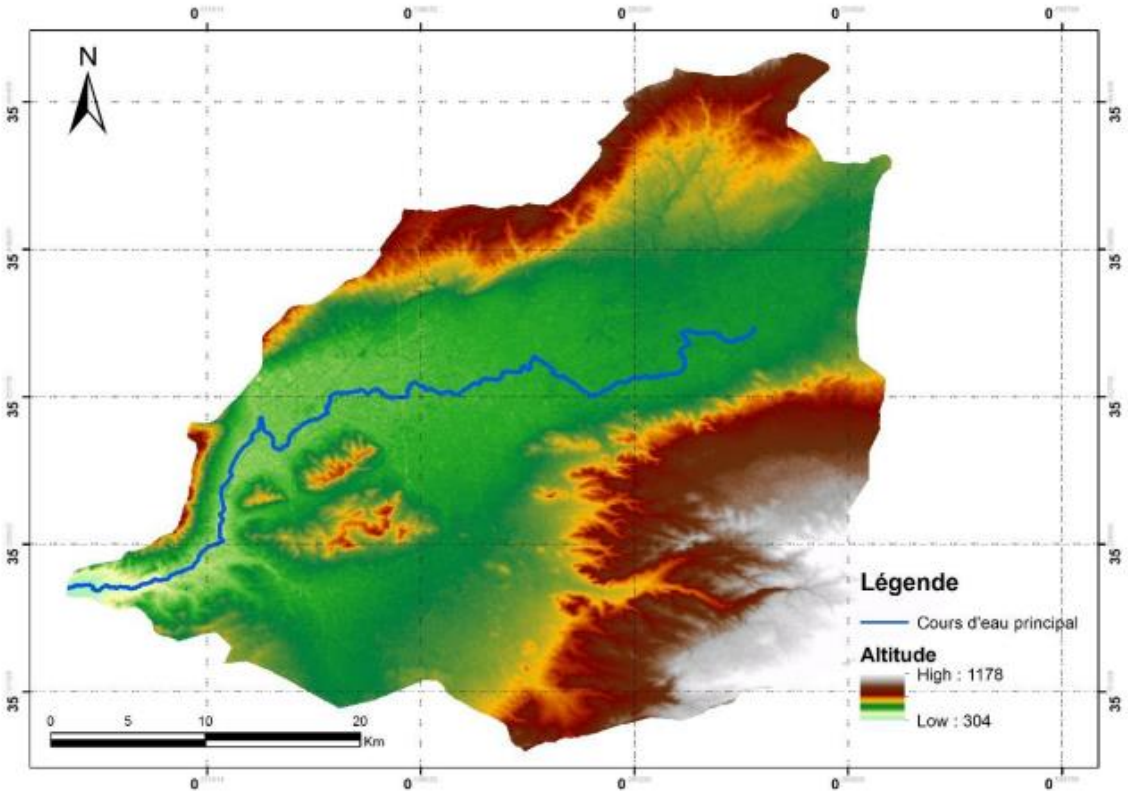


Figure 03 : carte géomorphologique de la plaine de Ghriss (Bekkoussa, 2020).

I.4. Situation hydro climatique :

La région de la plaine de Ghriss fait partie intégrante du grand bassin versant de la Macta, qui s'étend sur une superficie de 14 390 km².

Ce bassin est drainé par deux principaux cours d'eau : l'Oued Mebtouh à l'ouest et l'Oued El Hammam à l'est. Au nord, le bassin versant de la Macta est soumis à un climat méditerranéen, tandis qu'au sud, une tendance continentale se manifeste, se traduisant par une aridité marquée, des hivers froids et des étés particulièrement chauds.

Les précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station de Sig pour la période de 1986 à 2009 varient entre 79,7 mm et 488,2 mm, avec une moyenne interannuelle de 275,4 mm. En ce qui concerne les températures, la moyenne annuelle à la station de Mascara est de 17 °C, avec des moyennes mensuelles oscillant entre 23 et 27 °C durant les mois de juin et septembre, et entre 8,8 et 18,6 °C d'octobre à mai.

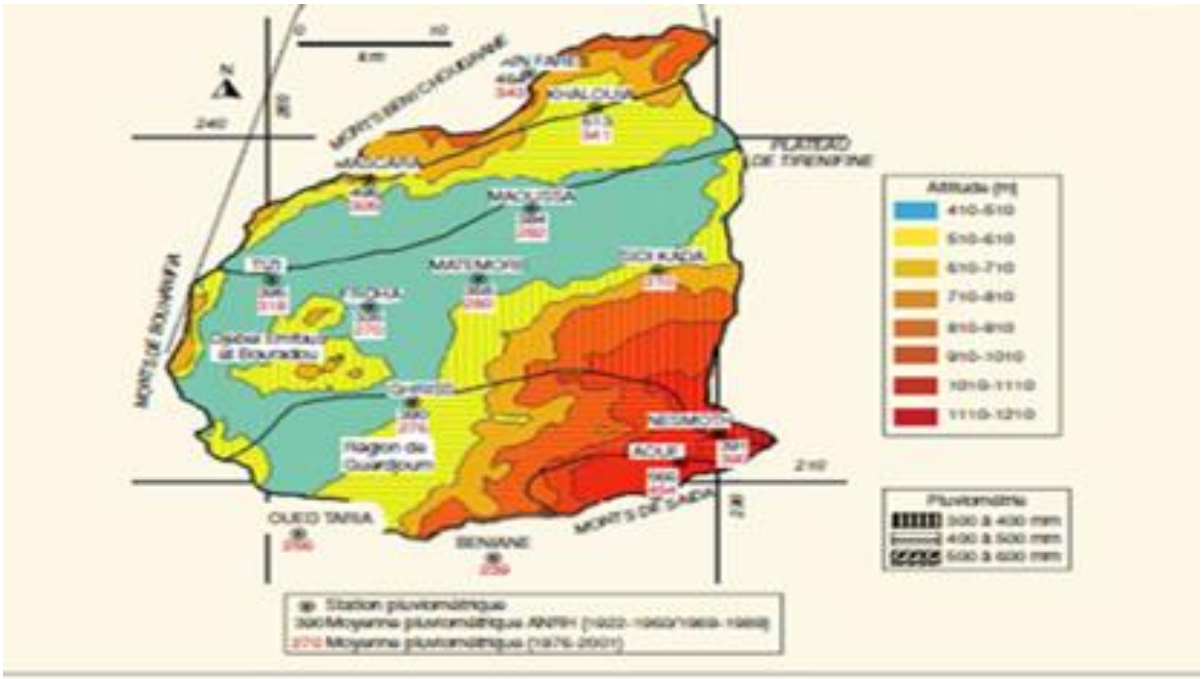


Figure 04 : carte pluviométrique du bassin de la plaine de Ghriss(Bekkoussa et al., 2008).

La diminution des pluies a touché l'ensemble de l'Algérie, mais elle a été particulièrement marquée dans sa partie occidentale. Les données de précipitations enregistrées dans la région depuis 1930 montrent de nombreuses années déficitaires, notamment durant les décennies 1940, 1980 et 1990 (Meddi et al., 2009). Dans le bassin versant de la Macta, une rupture de stationnarité a été observée fin 1975 à Ain Fekane, où les précipitations annuelles moyennes avant et après ce point de rupture étaient respectivement de 429 mm et 266 mm, représentant une diminution de 38 %.

Le régime hydrologique de la région est marqué par une grande irrégularité d'écoulement, tant saisonnière qu'annuelle. Les crues sont souvent rapides et violentes, tandis que les apports liquides restent relativement faibles en raison du déficit pluviométrique prononcé que subit l'Oranie depuis le début des années 1980. Comparativement à la période de 1949 à 1976, les écoulements enregistrés à la station de Trois Rivières sur la période de 1976 à 2002 ont connu une diminution relative de 36 % (Meddi et al., 2009).

Cependant, en raison des variations interannuelles significatives, la rupture de la stationnarité des chroniques hydrologiques est moins marquée que celle observée pour les précipitations. Les apports solides mesurés à la station de Trois Rivières, qui est la principale station hydrométrique de l'Oued El Hammam, varient d'une année hydrologique à l'autre. Entre 1993

et 2004, un maximum de 6,84 millions de tonnes d'apports solides a été enregistré, correspondant à 124,77 Hm³ d'apport liquide durant l'année hydrologique 1994-1995. En revanche, durant l'année 1998-1999, les apports solides n'ont guère dépassé 0,15 million de tonnes, correspondant à 33,22 Hm³ d'apport liquide. Cela illustre l'irrégularité interannuelle importante des apports.

En 1995, le débit liquide instantané d'une crue a atteint 2 335,8 m³/s. Malgré l'apport liquide significatif enregistré durant certaines années, comme 1997-1998, l'apport solide reste modeste, indiquant que l'action érosive est un phénomène complexe résultant de la combinaison de plusieurs paramètres. À l'échelle mensuelle, le mois d'octobre est celui où l'on enregistre le pic des apports liquides et solides pour l'Oued El Hammam.

I.5. Situation hydrogéologie :

Les études entreprises sur la région ont permis d'identifier trois aquifères régionaux :

I.5.1. Aquifère Plio-Quaternaire : Un aquifère libre, se compose d'alluvions, de calcaires blancs altérés, poreux et fissurés, de sables issus de désagrégation, de grès et de calcaires lacustres. Ce réservoir souterrain s'étend sur l'ensemble de la plaine. Également connu sous le nom de nappe Plio-Quaternaire, il est alimenté principalement par l'infiltration des eaux pluviales à travers son impluvium, complétée par des retours d'eau provenant des zones irriguées. Il reçoit en outre des apports latéraux en provenance de l'aquifère jurassique situé au sud et au sud-est, ainsi que de celui des calcaires et grès du Pliocène dans le nord. Cet aquifère repose sur des marnes du Miocène. Sa profondeur par rapport au niveau du sol varie généralement entre -6 mètres et -80 mètres. Les eaux de cet aquifère convergent vers un exutoire commun nommé Ain Fekan, aujourd'hui une source asséchée. Le taux d'infiltration dans la plaine est estimé à environ 20 % des précipitations annuelles (selon Sourisseau, 1972). La transmissivité des alluvions dans cette région fluctue entre 5×10^{-5} et 10^{-2} m²/s. Cependant, la zone de Guerdjoum, située au sud-ouest de Ghriss, se caractérise par une faible perméabilité avec une transmissivité moyenne autour de 10^{-5} m²/s. Ces données résultent d'essais par pompage réalisés sur une cinquantaine de puits agricoles répartis dans la région (Sourisseau, 1972). Néanmoins, aucune précision n'est donnée sur la durée ou les méthodes utilisées pour ces essais réalisés au début des années 1970. Enfin, le coefficient d'emmagasinement varie entre 0,1 et 0,25 en moyenne, témoignant d'une porosité relativement élevée pour l'aquifère Plio-Quaternaire.

I.5.2. Aquifère des calcaires et grès du Pliocène : Est situé dans les monts de Béni Chougrane, où les calcaires lacustres affleurent au-dessus des grès de l'Astien. Ensemble, ces deux formations géologiques constituent une entité hydrogéologique homogène. Au nord de Tighennif, les grès sont exposés sur une grande surface, alors qu'au sud, l'aquifère gréseux devient captif, enfoui sous les calcaires lacustres à faciès marneux. Cette couche aquifère s'amincit en direction de la plaine avant de disparaître au sud de la limite reliant les Djebels Emfous et Bouradou, ainsi que le flanc nord des monts de Saïda. Elle repose sur un substrat peu perméable, composé d'argile rouge au sud et de marnes épaisses du Miocène au nord, le tout limité par une ligne passant par Tizi-Matemore. L'exutoire principal de cet aquifère se situe à son interface avec les dépôts Plio-Quaternaires. L'eau s'infiltre vers ces formations par un phénomène de drainance ascendante, tandis que la drainance descendante reste improbable en raison de la grande épaisseur et de la perméabilité réduite du substratum sous-jacent. Le niveau piézométrique de la nappe contenue dans les calcaires lacustres varie entre -23 et -50 mètres par rapport au sol, tandis que celui des grès fluctue entre -6 et -23 mètres. Les essais de pompage effectués sur les forages exploités dans cette formation pliocène ont permis d'estimer une transmissivité comprise entre 5×10^{-5} et 3×10^{-3} m²/s. Le coefficient d'emmagasinement de ces formations est évalué à environ 5×10^{-3}, selon les travaux de Sourisseau en 1972.

I.5.3. Aquifère des calcaires dolomitiques du Jurassique : Est un système karstique relativement bien développé. Les affleurements de calcaires et dolomies datés du Jurassique se localisent notamment sur les monts de Saida, ainsi que sur les Djebels Emfous et Bouradou (Fig. 2). L'écoulement des eaux se fait à travers un réseau karstique qui s'étend sous la plaine pour alimenter la source d'Ain Fekan. À ce point précis, les eaux émergent au niveau d'une faille en contact avec des couches imperméables d'argiles gréseuses du Crétacé. L'aquifère est également drainé par des dépôts de galets et conglomérats du piedmont voisin. Le socle de l'aquifère est constitué de roche calcaro-dolomitique compacte, saine et non fissurée, tandis que son recouvrement se compose de marnes datant du Miocène ou d'argiles rouges détritiques associées au Pliocène. La profondeur de la nappe phréatique, mesurée dans les forages captant cet aquifère, varie entre 6 et 66 mètres sous la surface du sol. Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère ont été déterminées grâce à des essais de pompage réalisés sur ces forages. La transmissivité est comprise entre 10^−4 et 10^−2 m²/s, tandis que le coefficient d'emmagasinement est évalué à environ 3 × 10^−3 (Bekkoussa et al., 2008).

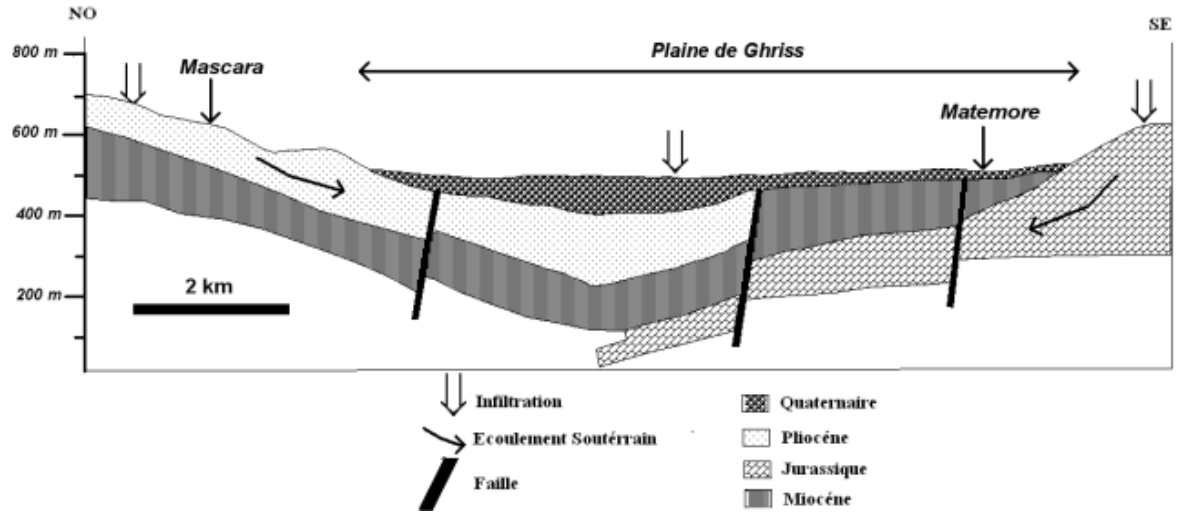


Figure 05: Coupe hydrogéologique du Bassin d'Oued Fekan (la plaine Ghriss) (Bekkoussa et al., 2008).

I.6.Piézométrie et la qualité chimique des eaux de la nappe du Jurassique :

La carte piézométrique a été réalisée avec les relevées de 59 forages répartis sur l'ensemble de la région d'étude durant l'année 2012. Les niveaux statiques des forages varient de 5 à 120 m. l'écoulement de la nappe se dirige du sud-est vers le centre de la plaine, en occurrence des zones de recharges situées dans les monts de Saida vers les partie profonde de l'aquifère qui s'enfonce sous la plaine. La direction de l'écoulement met en évidence la recharge latérale de l'aquifère du Plio-Quaternaire par les formations carbonatés du Jurassique. Cependant, il n'existe pas de mesures piézométriques de la nappe du Jurassique au niveau des Horst des Djebel Emfous et Bouradou. Cette lacune n'a pas permis de visualiser le rôle de ces formations dans l'écoulement général des eaux souterraines. Néanmoins, la surélévation du niveau sur la limite nord par rapport au centre de la plaine indique qu'une recharge se produit plus au sud c'est-à-dire au niveau de horsts précédemment cités. A noter que le gradient hydraulique au centre est plus important que sur les cotés, ce qui reflète des débits plus conséquent

Les eaux de la nappe du jurassique sont d'excellente qualité sauf pour quelque rare forage ou la concentration en Cl dépasse la norme de potabilité. Les eaux sont caractérisées par un facies Ca-Mg-HCO3 qui est typique des eaux d'origine karstique(Bekkoussa, 2020).

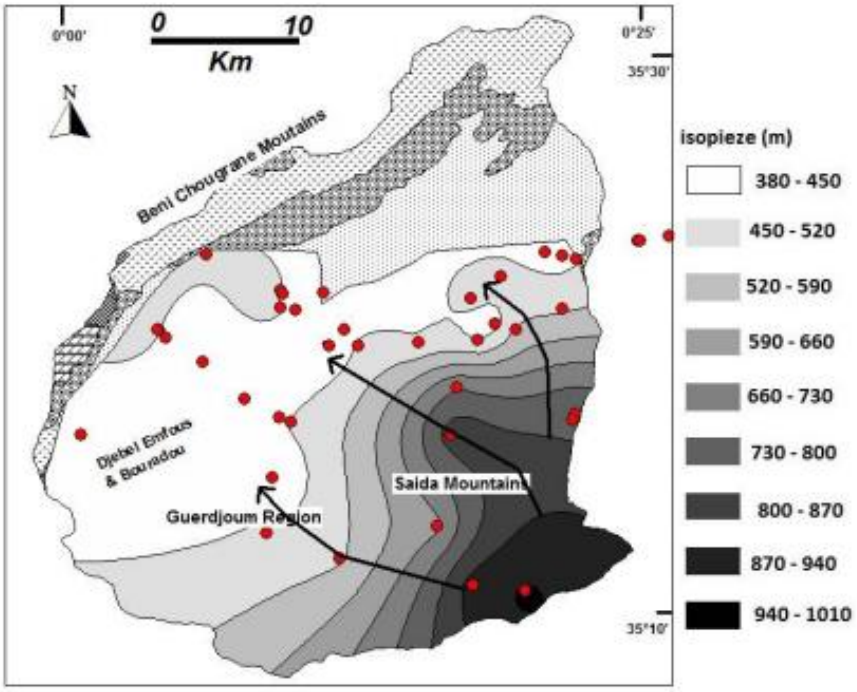


Figure 06 : Carte piézométrique de l'aquifère Jurassique année 2012. (Bekkoussa, 2020)

.

Chapitre II :

Matériels et Méthodes

II.1. Échantillonnage d'eau :

Dans le cadre de la surveillance qualitative de la nappe du jurassique, des prélèvements sont effectués sur plusieurs puits et forages répartis sur toute la plaine de Ghriss et captant uniquement cette nappe au cours de l'année 2015. fournis par l'Algérienne Des Eaux (ADE) de Mascara. Cependant, cet échantillonnage ne se fait pas systématiquement sur la totalité des puits. Les analyses chimiques concernent les concentrations des éléments majeurs (Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^{+2}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{-2}, HCO_3^{-} et NO_3^{-}) et les variables physico-chimiques (conductivité électrique, température et pH) ,Cette étude permettra d'affiner notre compréhension des eaux souterraines de la région et de mieux orienter leur gestion et leur usage.

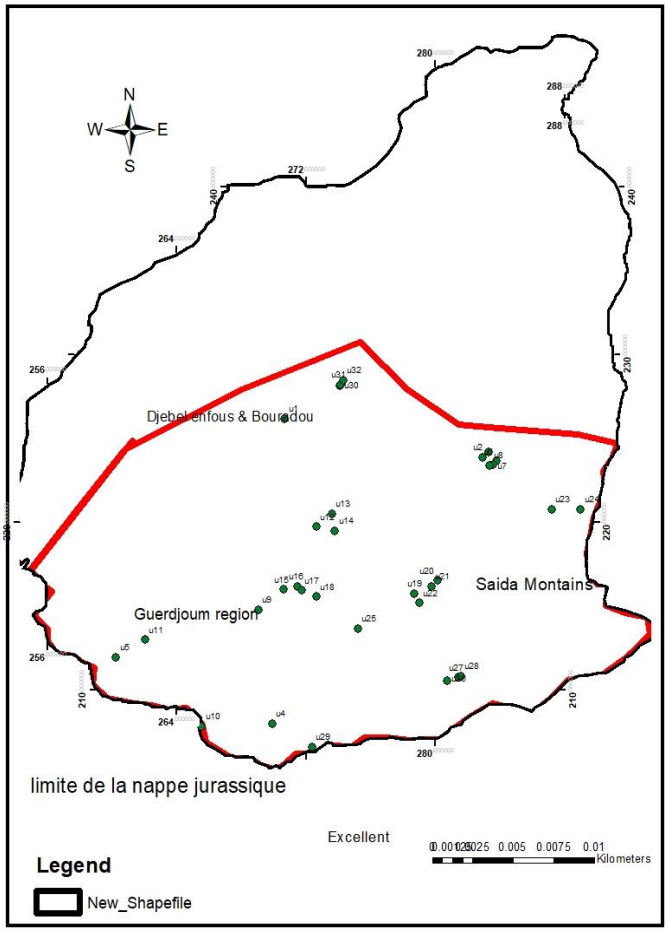


Figure 07: situation des forages retenue pour l'étude de la nappe du Jurassique .

II.2. Cartographie des données :

L'interpolation spatiale est une procédure de prédiction de la valeur des attributs sur des sites non échantillonnés à partir de mesures effectuées à des points situés dans la même zone. Les méthodes de Krigeage ont été utilisées pour l'interpolation des valeurs et la création de cartes de distribution spatiale des paramètres hydrochimiques (variables). Pour chaque variable, les histogrammes et les QQplots ont été tracés afin d'examiner la normalité des données observées. Les paramètres qui ne sont pas distribués de façon normale ont été transformés (Log et BoxCox) pour qu'elles satisfassent l'hypothèse d'une égale variabilité. Pour la méthode de Krigeage, plusieurs types de modèles de semivariogrammes ont été examinés pour chaque paramètre de qualité de l'eau afin d'obtenir le meilleur ajustement. Les performances prédictives des modèles ajustés ont été vérifiées sur la base de tests de validation croisée

- **Modélisation du variogramme :** Grâce au module Geostatistical Analyst, nous avons réalisé la modélisation du variogramme, une phase essentielle qui a permis d'évaluer la structure spatiale et le degré de corrélation des paramètres de pollution observés dans la nappe de Ghriss. Cette analyse a permis de sélectionner le modèle mathématique le plus pertinent (sphérique, exponentiel ou gaussien) pour refléter au mieux les conditions réelles du terrain.
- **Interpolation par Krigeage :** En s'appuyant sur les résultats obtenus avec le variogramme, la méthode du Krigeage a été mise en œuvre pour convertir les données ponctuelles issues des forages en surfaces continues. Cette technique avancée d'interpolation spatiale offre une estimation précise de la répartition géographique de la pollution dans les zones pour lesquelles aucune mesure directe n'a été collectée.
- **Cartographie thématique et aide à la décision :** Les analyses ont conduit à la création de cartes thématiques détaillées, qui dépassent leur rôle d'illustrations pour devenir de véritables outils stratégiques. Ces représentations cartographiques permettent une visualisation claire des données et constituent un support précieux pour la prise de décision en matière de gestion durable des ressources en eau, notamment face aux risques de dégradation qualitative dans la région de la wilaya de Mascara.

II.3. Aptitude des eaux à l'alimentation en eaux potable :

L'aptitude des eaux à l'alimentation en eau potable peut être évalué par comparaison des valeurs des paramètres physico-chimiques des eaux étudiées avec les normes de potabilité ou en utilisant l'indice de qualité des eaux (IQE).

. Estimation de l'indice de la qualité des eaux (IQE).

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est défini comme une technique de notation qui exprime l'influence composite d'un paramètre individuel de qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine (Vasanthavigar et al., 2010, Herojeet et al., 2015). Elle a été utilisée pour la première fois par Horton (1965) dans le cadre d'une étude portant sur les critères de qualité de l'eau, norme pour les cours d'eau et les affluents. Cinq ans après, Brown et al (1970) l'ont développé en attribuant un poids approprié à chaque paramètre de bases des éléments d'analyses. De nos jours, l'IQE est devenu un paramètre important dans la gestion des ressources en eaux, largement utilisée à travers la communauté scientifique (ElFadel et al., 2013)

La méthodologie est présentée dans la figure ci-dessous :

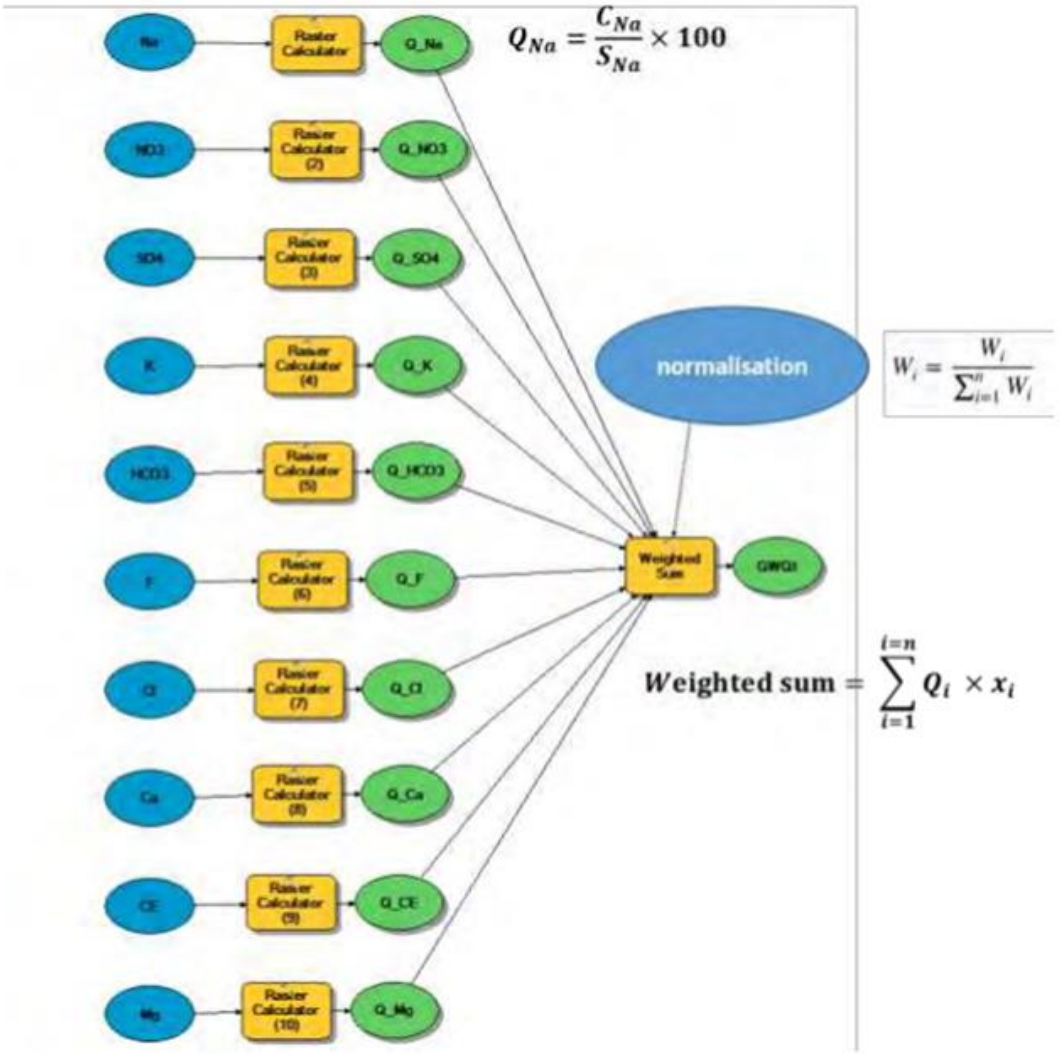


Figure 08: Organigramme de calcul de l'IQE.

II.4. Aptitude des eaux à lirrigation :

La composition chimique de l'eau, les types de sol et les pratiques culturales jouent un rôle important dans l'évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation. le taux d'adsorption de sodium (SAR), l'indice de Kelley, l'indice de perméabilité (PI) et sont les paramètres importants qui sont largement utilisés pour évaluer l'aptitude de l'eau à être utilisée pour l'irrigation

II.4.1 Indice de perméabilité (PI) :

La perméabilité, qui est l'aptitude du sol à laisser passer l'eau et l'air, est déterminée à partir de certaines caractéristiques physiques importantes des sols, telles que la porosité et la perméabilité. L'utilisation prolongée de l'eau d'irrigation a eu un impact sur la perméabilité du sol, car elle est déterminée par l'eau souterraine contenant des ions tels que le Na+ , le Ca2+, le Mg2+ et le HCO3- présents dans le sol (Singh et al. 2013 a, Singh et al. 2013b). (Doneen, 1964) suggère une technique de catégorisation de l'eau d'irrigation fondée sur l'indice de perméabilité (IP).

Cet indice est proposé pour classer l'eau en fonction de son aptitude aux activités d'irrigation il est défini en terme de Na+ , Mg2+ et HCO3 comme suit

$$PI=100\times \frac{Na^{+}+\sqrt{HCO_3^{-}}}{Na^{+}+Ca^{+2}+Mg^{+2}}$$

Où, les concentrations sont données en meq / l.

Les IP sont réparties en trois catégories : excellente, bonne et inappropriée, qui reflètent la qualité des eaux souterraines employées pour l'agriculture (Doneen, 1964 et Ragunath, 1987). Selon l'OMS (1993), la qualité des eaux souterraines est évaluée en tenant compte de l'IP comme suit :

Indice de perméabilité (IP)	classification
> 75	excellente
25_75	Bonne_approprieé
< 25	inappropriée

II.4.2 Indice de Kelly (KI) :

L'équation de Kelly (KI) (kelly 1963) est décrit comme suite :

$$\mathbf{KI} = Na^{+}/Ca^{2+}+Mg^{2+}$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l KI est inferieur à 1, cela signifie que les eaux aptes à irrigation et KI >3 les eaux sont inaptes à l'irrigation (Kelly, 1957) .

II.4.3 Indice d'Adsorption de Wilcox (SAR) :

Une eau chargée en sels, peut provoquer cette action. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR qui est défini par la relation est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau. [9] Le SAR est calculé par la formule suivante:

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

Avec Na+ , K+ , Ca2+et Mg2+exprimée en méq/l.

Tableau 01:Valeurs du SAR selon Richards(1954).

SAR (méq/l)	Classification
<10	Excellent
10-18	Bien
18-26	Permis
>26	Inadapté

Chapitre III :

Résultats et duscussion.

III.1. Typologie des eaux :

III.1.1.caractérisation physico –chimique (statistique descriptive) :

Le tableu suivant résume les paramétres statistique des éléments majeurs analysés dans les eaux de nappe du jurassique . ces données permettent davoir une vision globale sur la composition chimique et la variabilitébdes ions .

paramétre	**moyenne**	**ecartype**	**min**	**max**
ca	2.79	2.81	1.1	10.51
Mg	6.28	2.87	1.88	9.33
Na	2.3	2.59	0.52	10.61
K	0.1	0.11	0.03	0.52
Cl	4.8	6.12	0.93	19.03
SO	1.53	0.69	0.29	4
HCO3	4.77	1.23	2.69	6.98

Tableau 02: résultats de lanalyse statistique descriptive des paramétres physico-chimique en (meq/L).

NO3	0.52	0.34	0.11	1.68

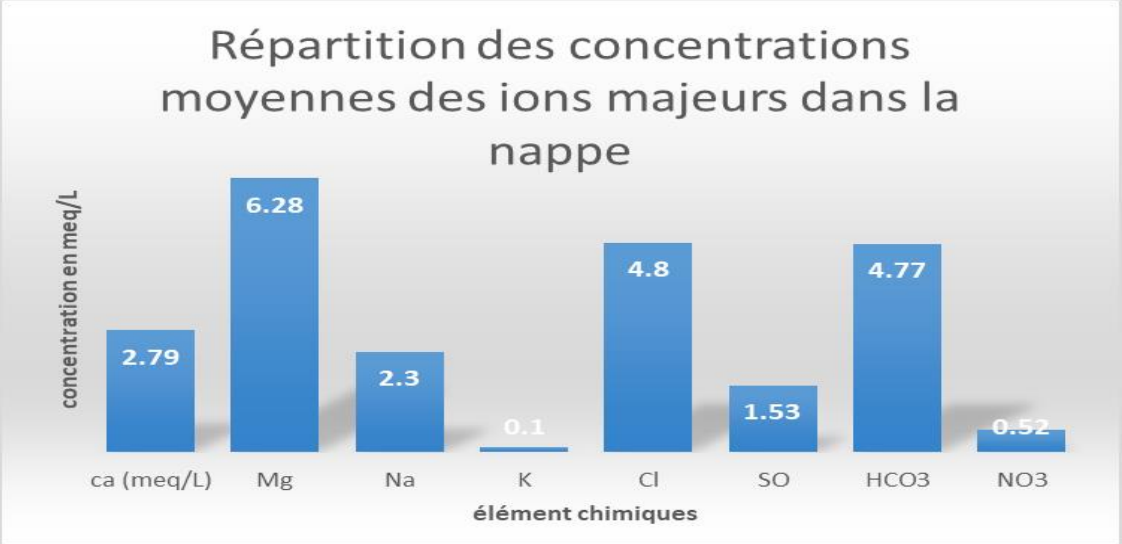


Figure 09 : répartition des concentrations (moyenne des ions majeurs)en meq/l.

III.2.Vérification la fiabilité des données hydrochimiques :

Le contrôle des résultats de l'analyse d'une eau naturelle peut être effectué par l'intermédiaire du bilan ionique : c'est-à-dire par la vérification de l'équation d'électro neutralité. En théorie, et pour un pH voisin de 7, la somme des anions exprimée en mEq doit correspondre exactement à la somme des cations exprime de la même manière

Le calcul des balances ioniques se fonde sur la relation suivante :

$$\mathbf{BI(\%)} = \frac{(\mathbf{cations} - \mathbf{anions})}{(\mathbf{cations} + \mathbf{anions})} \mathbf{x}\ 100$$

Où :

- ✓ BI : la balance ionique exprimée en pourcentage,
- ✓ $Cations$: La Somme des cations (unités en mEq/l).
- ✓ $Anions$: La Somme des anions (unités en mEq/l).

Tout écart doit ainsi être interprété comme un biais induit lors de l'analyse. En règle générale, les résultats des analyses sont considérés de la manière suivante.

- ✓ -1% < BI < 1%: Fiabilité des résultats d'analyses excellente.
- ✓ -5% < BI < 5%: Fiabilité des résultats d'analyses acceptable.
- ✓ -10% < BI < 10%: Fiabilité des résultats d'analyses médiocre.
- ✓ BI > 10%: Mauvaise fiabilité des résultats d'analyses. [4]

Pour l'application de la formule de la balance ionique , on a vérifié la qualité de la l'analyse hydrochémique de nos données qui sont 32 échantillons vérifiés par la balance ionique On a trouvé que :tous les analyses sont entre acceptables et excellentes . donc, on a 16echantillons qui ont une balance ionique oscillent entre [-1 ;1] c'est-à-dire les resultats sont excellents. Ainsi, on remarque quele reste est oscillent entre [-6,11 ;-1.59] et [1.70 ;3.11] autrement-dit la fiabilité les resultats sont acceptable.

III.3.1 L'indice de qualité de l'eau (IQE) :

La méthode de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI_(IQE).) reflète l'influence composite des différents paramètres de qualité de l'eau sur l'aptitude à la consommation (Sahu et Sikdar, 2008). La qualité de l'eau souterraine a été estimée à l'aide de l'indice GWQI qui est calculé en utilisant l'équation suivante (Vasanthavigar et al. 2010) en incluant les normes OMS et les normes algérienne (pour les éléments qui ne possèdent pas de norme mondiale).

$$GWQI = \sum SI_i = \sum W_i q_i = \sum \left[\left(\frac{w_i}{\sum_n^{i=1} w_i} \right) * \left(\frac{C_i}{S_i} * 100 \right) \right]$$

Où Ci représente les concentrations de chaque paramètre, Si représente les valeurs limites, wi se voit attribuer un poids en fonction de son importance relative dans la qualité globale de l'eau utilisée à des fins de consommation (tableau 4), qi correspond à la cote de qualité de l'eau, Wi correspond au poids relatif et SIi est le sous-indice des i ème paramètres. GWQI est un nombre sans dimension et exprime la qualité globale de l'eau dans une région donnée en combinant différentes variables de la qualité de l'eau dans un même nombre. Les limites permises pour l'eau potable fixées par les normes de l'OMS et algériennes ont été utilisées pour calculer le GWQI dans la présente étude. 10 paramètres (pH, TDS, Ca2+, Mg2+ , Na+ , K+ , SO4 2-, Cl- , HCO3 - et NO3 -) ont été sélectionnés. Le calcul de l'indice GWQI comporte 5 étapes. Lors de la première étape, un poids sur une échelle de 5 a été attribué aux 10 paramètres de qualité de l'eau sélectionnés. L'attribution du poids à un paramètre donné (Tableau 4) dépend de l'importance relative de ce paramètre pour influencer la qualité globale de l'eau potable et leur impact sur la santé humaine (Vasanthavigar et al. 2010; Kumar et al. 2014; Jamsin et Mallikarjuna, 2014). La deuxième étape consiste à attribuer des poids relatifs à chacun des paramètres. La troisième étape implique le calcul de l'échelle d'évaluation de la qualité (qi) pour chaque paramètre de chaque échantillon analysé. Dans la quatrième étape, le sous-indice du paramètre Ii est calculé. Enfin, lors de la 5ème étape, le GWQI des échantillons d'eau individuels est calculé en additionnant les valeurs SIi de tous les paramètres.

Tableau 03 : Poids des paramètres utilisés dans le calcul de l'indice GWQI (. IQE)

Chemical parameters	Weight	Relative weight
Ph	3	0.094
TDS	5	0.156
Ca^{2+}	2	0.063
Mg^{2+}	2	0.063
Na^{+}	3	0.094
K^{+}	3	0.094
Cl^{-}	4	0.125
HCO_3^{-}	1	0.031
SO_4^{2-}	4	0.125
NO_3^{-}	5	0.156
Total	32	1

Tableau 04 : Classification de la qualité des eaux souterraines selon l'indice GWQI.

GWQI index classes	fourage	Number of samples (%)
Excellent (<50)	20	62.5%
Good (50 – 100)	10	31.25%
Poor (100 – 200)	2	6.25 %
Very poor (200 – 300)	0	0
Not suitable (>300)	0	0

Les valeurs de GWQI oscillent entre 31,40 à 148,56 avec une valeur moyenne de 54 ,91. Les résultats ont révélées qu'environ 62.5% des échantillons appartenaient à la catégorie excellent et 31.25% à la catégorie bonne, tandis que 6.25 % représentaient une eau de mauvaise qualité, 0% de l'eau de très mauvaise qualité. Le nombre et le pourcentage d'échantillons appartenant à chaque classe sont indiqués dans le tableau 4.

III.3.2.Classification selon le SAR :

Les résultats des analyses portés sur le diagramme de Richards (figure 10) montrent la répartition des points d'eau dans différentes classes.

Les quatre classes trouvées représentent les caractéristiques suivantes :

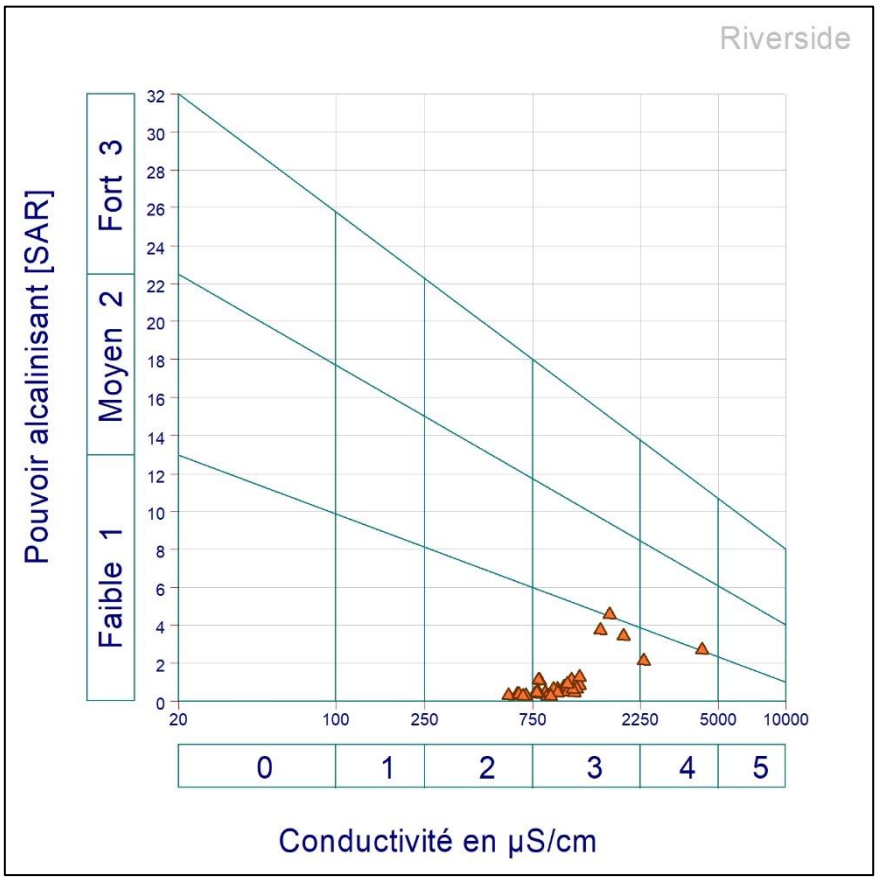


Fig 10 : Classification des eaux selon Les valeurs du SAR (Sodium Hazard) sont exprimées en meq/l et conductivité.

- **Classe 0-faible 1 :** elles représentent les eaux d'excellente qualité pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols. Dans cette classe il n'est y'a pas des points d'eau donc 0%.
- **Classe 2- faible 1:** elles représentent les eaux de bonne qualité convenable aux plants qui ont une tolérance aux sels cependant son utilisation peut générer des problèmes pourles argiles ,Dans cette classe il y'a quatre points d'eau donc 12 ,5%.
- **Classe 3- faible 1, 3-Moyen2:** représente des eaux de qualité admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité. Les points d'eau appartenant à cette classe sont 26 forrages donc 81,25 % la mjorité des points d'eau .

- **Classes 4- faible 1, 4-Moyen2:** elles représentent les eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Les points d'eau appartenant à cette classe sont 2 forrages donc 6,25%.

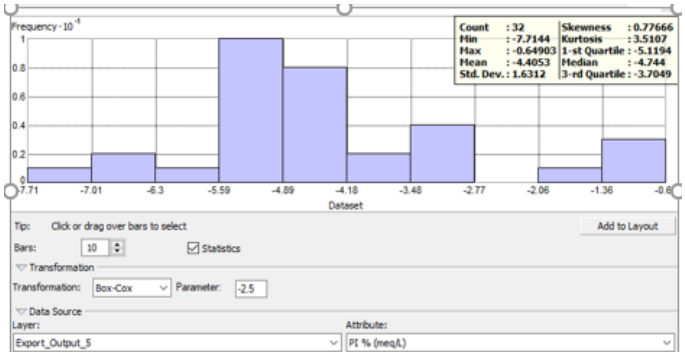
III.3. Interpolation et distribution spatiale des differents indices de qualité (IQE,PI,SAR,KI) :

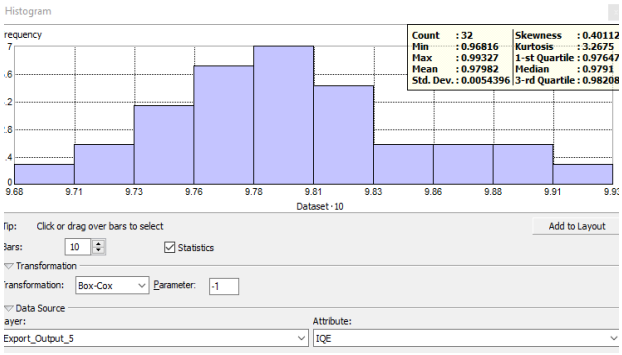
La spatialisation des indicateurs de qualité des eaux a été faite en utilisant la méthode de Krigeage ordinaire, différents types de modèles de semi-variogrammes (stable, gaussien, sphérique, exponentiel), ont été examinés pour chaque indice afin d'obtenir le modèle le plus approprié. Les performances productives des modèles adaptés ont été vérifiées sur la base de tests de validation croisée. Les valeurs de l'erreur moyenne (Mean Error) et de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square) ont été estimées pour vérifier les performances du modèle adopté (tableau5).

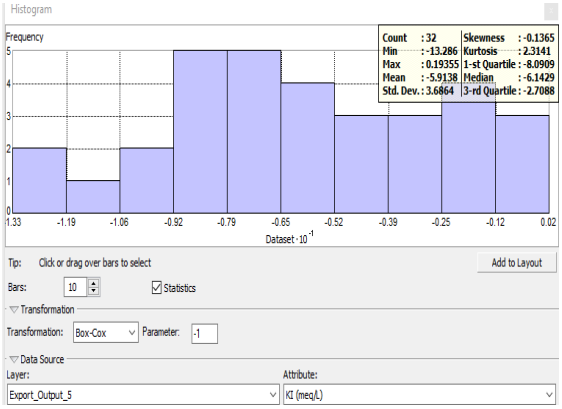
III.1.1.analyse exploratoire des indices de qualité par histogramme :

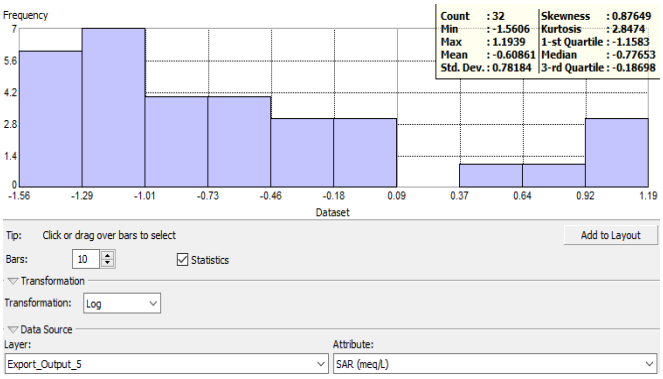
Les tableaux des statistiques présentés sur les cartes de la figure , nous renseigne sur les valeurs de distribution relatives à chaque indice de qualité de la nappe jurassique superieur de la plaine de Ghriss, à savoir : la moyenne, la médiane, les premier et troisième quartiles, le coefficient d'asymétrie (skewness), le coefficient d'aplatissement (Kurtosis).

Certaines méthodes de krigeage fonctionnent mieux si les données sont approximativement distribuées normalement (la courbe en forme de cloche). Une distribution de valeur normale suppose qu'elle possède un coefficient d'asymétrie nul.





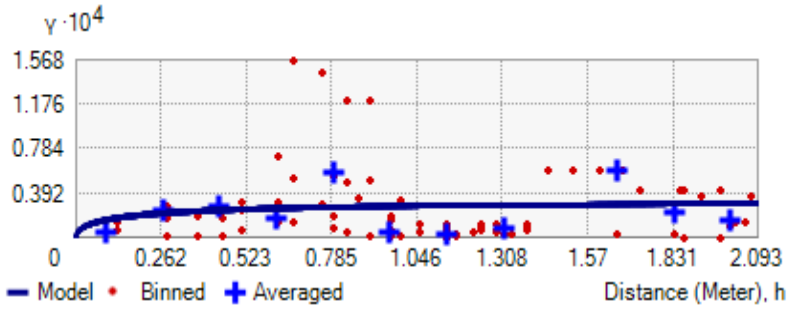




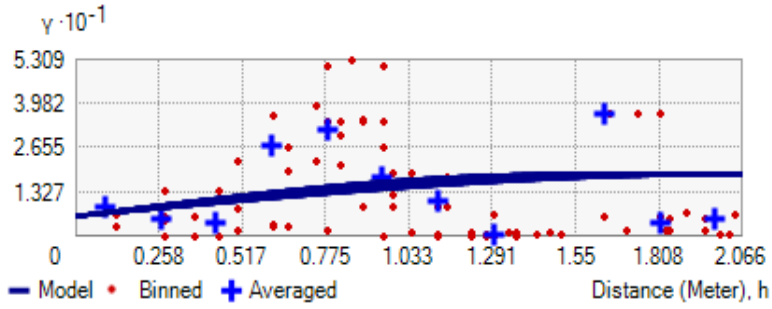
Dans cette étude tous les indices de qualité des eaux (IQE,SAR,KI,PI%) sont caractérisés par un coefficient d'asymétrie non nul. Ces paramètres nécessiteront par la suite une transformation normale pour procéder à l'interpolation par la suite. Une transformation logarithmique ou exponentiel aiderait certainement à rendre plus symétrique.

Tableau 05 : Modèle d'interpolation des indices de qualité des eaux :

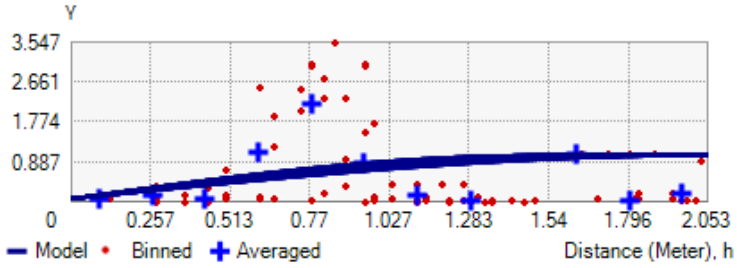
Lndice de qualité	Meilleur modèle	Effet de pépite C0	Palier C	Portée a	angle anisotropie	Erreur moyenne ME	Erreur moyenne quadrique MES
IOE	Linéaire	0	0.000039	2.09	60,3	0.77	2.67
PI%	Linéaire	0.0071	0.02	36.14	60,3	0 .OO16	0.095
SAR	Sphérique	0.068	O.96	2.05	58,2	0.009	0.63
KI	Sphérique	5.95	12.58	2.06	60,1	0.40	0.62



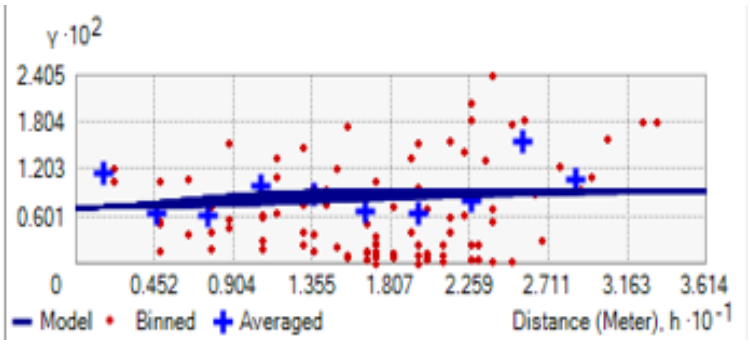
IQE



KI



SAR



PI%

Figure 11 : Semi-variogramme expérimentaux et théoriques des indices de qualité des eaux de la nappe jurassique de la plaine de Ghriss.

L'utilisation du variogramme a mis en évidence une anisotropie spatiale marquée(angle de l'anisotrpie varie entre 58°C à 63°C. Ou la dispersion des indices (IQE, KI, SAR) suit préférentiellement une direction Sud-Ouest/Nord-Est, corrélée au sens d'écoulement préférentiel des eaux.

III.4.Cartographies de la répartititionspastiale des indices de qualité :

III.4.1.L'indice de qualité de l'eau (IQE) :

Après avoir validé la structure spatiale du paramètre IQE à l'aide de l'analyse variographique, une interpolation par krigeage (Kriging Prediction Map) a été réalisée pour spatialiser les informations sur l'ensemble de la zone d'étude.

La carte de prédiction met en évidence une zonation distincte des valeurs de l'IQE à travers la plaine de Ghriss.

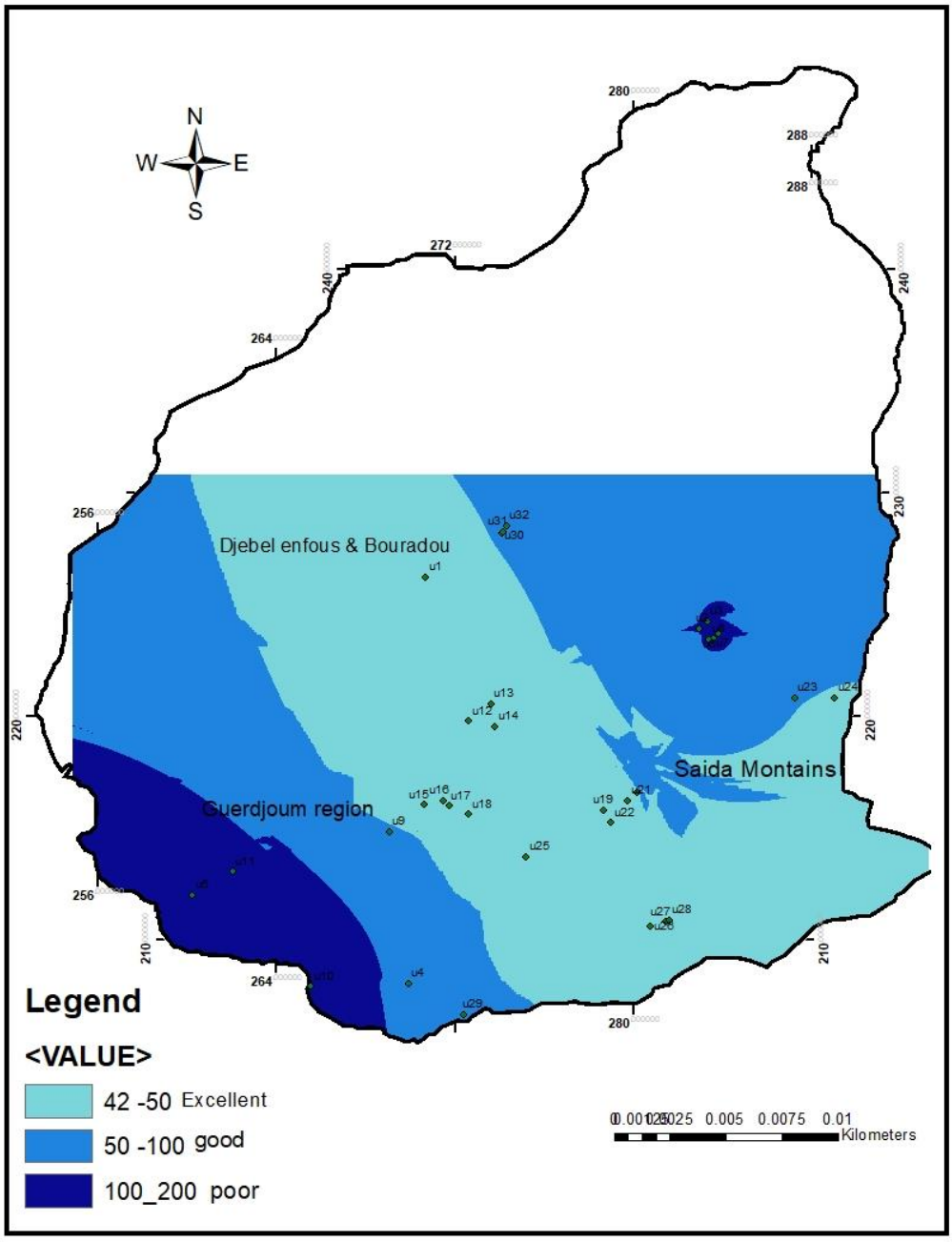


Figure 12 : Distribution spatiale de l'IQE de la nappe du jurassique de la plaine de Ghriss.

L'analyse de la distribution spatiale de l'Indice de Qualité des Eaux (IQE) de la nappe jurassique de la plaine de Ghriss met en évidence une variation notable de la qualité hydrochimique. On distingue trois zones majeures : une zone d'excellente qualité avec des valeurs comprises entre 42 et 50, couvrant largement le centre et le nord (secteur de Djebel Enfous & Bouradou). Cette zone est bordée par des eaux de bonne qualité, dont l'indice varie entre 50 et 100, notamment vers les Saïda Mountains. Enfin, une dégradation nette est

enregistrée dans le sud-ouest, précisément dans la région de Guerdjoum, où l'IQE atteint des valeurs critiques comprises entre 100 et 200, classant ces eaux dans la catégorie « Poor » (Médiocre). Cette hétérogénéité impose une gestion sectorielle de la ressource en fonction des contraintes de minéralisation observées.

III.4.2. Indice de Kelly (KI) :

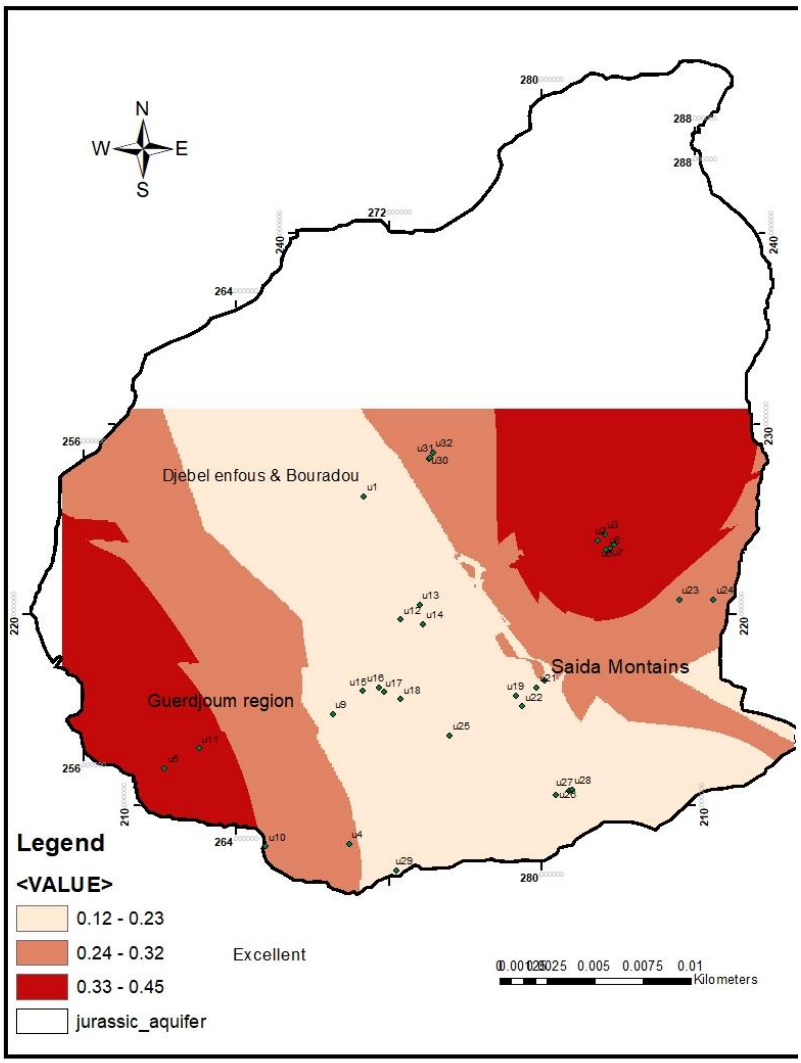


Figure 13 : Distribution spatiale de KI de la nappe du jurassique de la plaine de Ghriss.

L'analyse de la distribution spatiale de l'Indice de Kelly (KI) au sein de la nappe jurassique de la plaine de Ghriss montre des valeurs globalement très faibles, toutes inférieures à l'unité, ce qui témoigne d'une excellente aptitude chimique des eaux pour l'irrigation. La carte se subdivise en trois classes de précision : la classe la plus basse, avec des valeurs comprises entre 0,12 et 0,23, prédomine dans la zone centrale et le secteur de Djebel Enfous & Bouradou. Une classe intermédiaire, variant de 0,24 à 0,32, assure la transition vers les zones

plus minéralisées. Enfin, les valeurs les plus élevées de l'indice, situées entre 0,33 et 0,45, sont localisées au niveau des Saïda Mountains à l'Est et dans la région de Guerdjoum au Sud-Ouest. Bien que ces valeurs augmentent spatialement, elles restent largement en deçà du seuil critique de 1, confirmant que les eaux de la nappe du jurassique ne présentent aucun risque de toxicité sodique pour les sols agricoles de la région de Mascara.

II.4.3 Indice de perméabilité (PI%) :

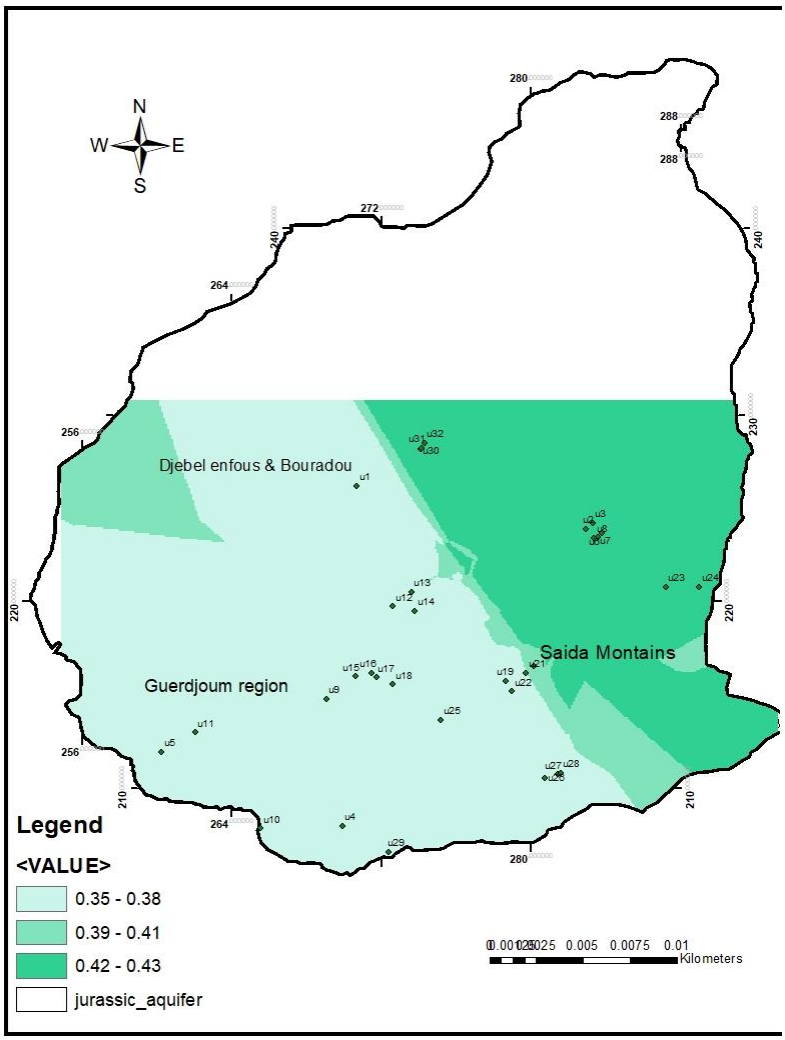


Figure 14 : Distribution spatiale dePI*100 de la nappecdu jurassique de la plaine de Ghriss.

L'examen de la distribution spatiale de l'Indice de Perméabilité (PI%) au sein de la nappe jurassique de la plaine de Ghriss révèle des valeurs extrêmement faibles et homogènes sur l'ensemble de l'aquifère. La cartographie met en évidence trois classes de valeurs très rapprochées : la classe inférieure, allant de 35 à 38, occupe la majeure partie du centre et du

sud-ouest, incluant la région de Guerdjoum. Une classe intermédiaire comprise entre 39 et 41 s'étend vers le nord-ouest (Djebel Enfous & Bouradou). Enfin, les valeurs les plus élevées, bien que restant très basses (entre 42 et 43), se concentrent principalement à l'est vers les Saïda Mountains. Ces résultats indiquent que les eaux de la nappe du jurassique présentent un risque quasi nul de réduction de la perméabilité des sols, confirmant leur bonne adéquation pour une irrigation durable dans la wilaya de Mascara.

III.4.4.Indice d'Adsorption de Wilcox (SAR) :

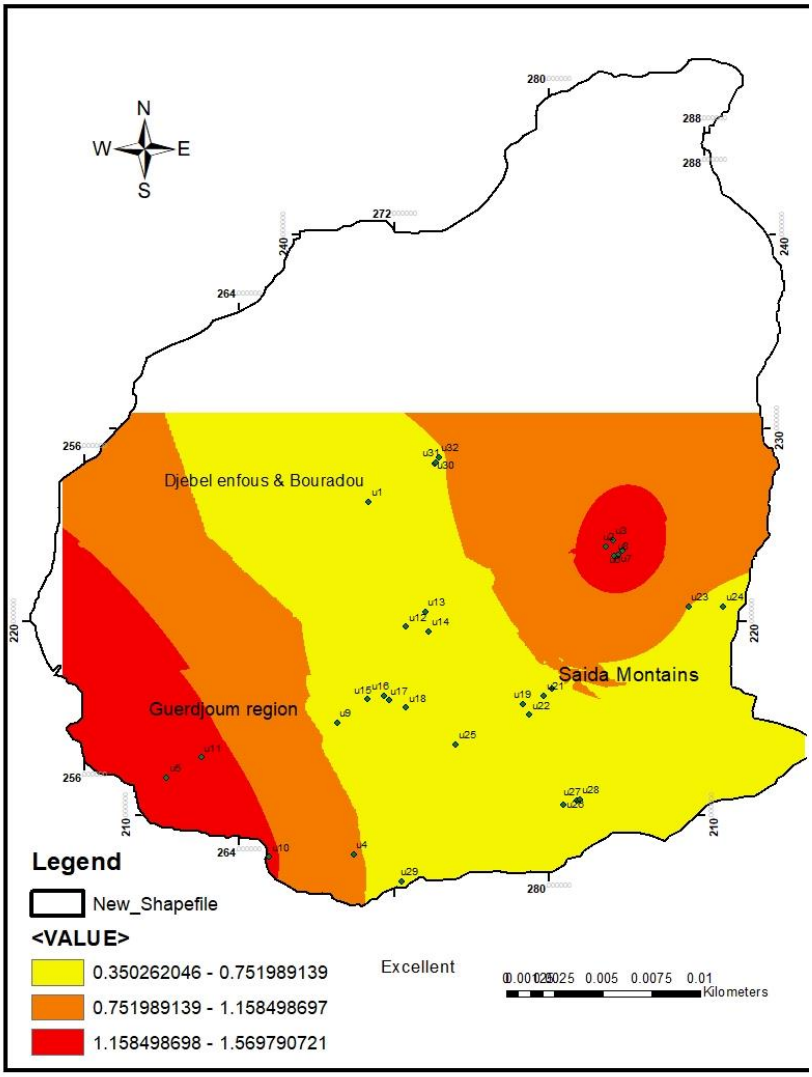


Figure 15: Distribution spatiale de SAR de la nappe du jurassique de la plaine de Ghriss.

l'indice de Sodium Adsorption Ratio (SAR) au sein de l'aquifère jurassique de la plaine de Ghriss reste largement inférieur aux seuils de toxicité sodique. La cartographie met en évidence une zonation qualitative organisée en trois paliers :

Classe d'excellence dominante : avec des indices compris entre 0,35 et 0,75, cette zone couvre la majeure partie de la plaine (secteur central et Djebel Enfous & Bouradou), indiquant une eau à très faible risque de sodisation.

Zone de transition : représentée par des valeurs allant de 0,75 à 1,15, elle assure la liaison entre le cœur de la nappe et ses bordures.

Secteurs de minéralisation relative : les valeurs les plus élevées (1,15 à 1,56) sont localisées dans la région de Guerdjoum et au niveau des Saïda Mountains.

En conclusion, bien que des variations spatiales existent, l'indice SAR confirme que l'eau de la nappe jurassique est de qualité "Excellente" pour l'irrigation, ne présentant aucune menace pour l'alcalinisation des sols de la wilaya de Mascara.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

la plaine de Ghriss constitue un pôle agricole majeur où la demande en eau ne cesse de croître. Si la nappe superficielle du Plio-Quaternaire est la plus exploitée, elle est aujourd'hui vulnérable aux pollutions de surface. Dans ce contexte, la nappe profonde du Jurassique apparaît comme une ressource stratégique alternative d'une qualité exceptionnelle.

L'aquifère jurassique, protégé par des formations géologiques plus profondes, présente une signature chimique complexe influencée par les bordures montagneuses des Béni Chougrane et des Monts de Saïda.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette présente étude qui vise à réactualiser les connaissances sur la qualité chimique de la nappe jurassique à travers les outils cartographiques et géostatistiques. Ces outils sont souvent combinés avec des indices numériques de qualité telle que le IQE ou GWQI (Groundwater Quality Index) ,indice de Kelly,SAR ,indice de perméabilité afin d'apprécier la qualité chimique des nappes

La cartographie de ces indice et la répartition spatiale de ces classes permettent d'identifier les zones de bonne qualité chimiques pour la consommation humaine et pour l'irrigation.

Apports de la Modélisation Spatiale (SIG)

- Analyse de structure : L'utilisation du variogramme a mis en évidence une anisotropie spatiale marquée. Les cartes de prédiction par Krigeage montrent que la dispersion des ces indices suit préférentiellement une direction Sud-Ouest/Nord-Est, corrélée au sens d'écoulement préférentiel des eaux.

Aptitude à la consommation humaine :

- Zonage de la qualité : La cartes de l'Indice de Qualité des Eaux (IQE) permette de distinguer les secteurs où l'eau nécessite un traitement préalable avant toute consommation humaine ou utilisation industrielle.ces secteurs sont localisées dans la partie sud-ouest de la plaine de Ghriss , précisément dans la région de Guerdjoum, où l'IQE atteint des valeurs critiques comprises entre 100 et 200, classant ces eaux dans la catégorie :(Poor ou Médiocre).

Aptitude à l'Irrigation et Durabilité :

l'Indice de Perméabilité (PI%) et l'Indice de Kelly (KI) , au sein de l'aquifère jurassique de la plaine de Ghriss restent largement inférieur aux seuils de toxicité sodique. La cartographie de l'indice SAR confirme que l'eau de la nappe jurassique est de qualité "Excellente" pour l'irrigation, ne présentant aucune menace pour l'alcalinisation des sols de la wilaya de Mascara.

malgré une aptitude globale acceptable, certaines zones présentent des risques de réduction de la perméabilité des sols à long terme.

En conclusion, la combinaison des méthodes hydrochimiques et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) s'est avérée être un outil décisionnel puissant. Elle offre aux gestionnaires des ressources en eau une base scientifique solide pour orienter les politiques de protection des périmètres de captage et promouvoir une gestion durable de l'eau dans la plaine de Ghriss.

La Bibliographie (قائمة المراجع) :

- **Bekkoussa, B. (2020).** *Carte géomorphologique et piézométrique de la plaine de Ghriss*. Thèse de doctorat / Rapport technique, Université de Mascara.
- Bekkoussa, B., et al. (2008). Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de l'aquifère des calcaires dolomitiques du Jurassique de la plaine de Ghriss (Mascara, Algérie).
- **Benfetta, H. (1997).** *Carte géologique de la plaine de Ghriss*. Rapport interne / Publication géologique.
- **Hadadji, A., & Hichour, B. (2007).** Étude morphologique et structurale de la plaine de Ghriss et du col Temaznia (Tighennif). *Rapport hydrogéologique*.
- **Meddi, M., et al. (2009).** Analyse de la baisse des précipitations et de son impact sur les écoulements superficiels dans le bassin versant de la Macta (Algérie Nord-Occidentale). *Journal des Sciences Hydrologiques / Publication spécialisée*.
- **Sourisseau, B. (1972).** *Étude hydrogéologique de la plaine de Ghriss (Wilaya de Mascara)*. Rapports du Service Géologique de l'Algérie, Alger.

2 : Références pour l'indice de qualité de l'eau potable (WQI/IQE) :

- **Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970).** A water quality index - do we dare?. *Water and Sewage Works*, 117(10), 339-343.
- **El-Fadel, M., et al. (2013).** Water Quality Index as a tool for groundwater quality management. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- **Herojeet, R., et al. (2015).** Evaluation of groundwater quality using Water Quality Index (WQI) techniques. *Journal of Environmental Earth Sciences*.
- **Horton, R. K. (1965).** An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), 300-306.
- **Vasanthavigar, M., et al. (2010).** Application of water quality index for groundwater quality assessment: A case study. *Environmental Geology*.

3. Références relatives aux indicateurs d'aptitude de l'eau à l'irrigation (SAR, Kelly, indice de perméabilité) :

- **Doneen, L. D. (1964).** *Notes on water quality in agriculture*. Water Science and Engineering, University of California, Davis.
- **Kelly, W. P. (1957).** Adsorbed sodium, cation exchange capacity and percentage sodium in relation to the irrigation water. *Soil Science*, 84(6), 473-478.
- **Kelly, W. P. (1963).** Use of saline irrigation water. *Soil Science*, 95(6), 355-391.
- **Raghunath, H. M. (1987).** *Groundwater: Hydrogeology, groundwater survey and pumping tests, Rural water supply and irrigation*. New Age International Publishers.
- **Richards, L. A. (1954).** *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture (USDA), Agriculture Handbook No. 60.
- **Singh, A. K., et al. (2013a).** Assessment of groundwater quality for irrigation purposes: Permeability and sodium hazards. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- **Singh, K. P., et al. (2013b).** Hydrochemical characteristics and spatial evaluation of groundwater quality using GIS and Permeability Index. *Journal of Hydrology*.
- **World Health Organization (WHO). (1993).** *Guidelines for drinking-water quality*. Volume 1: Recommendations. World Health Organization, Geneva.